
Comportement mécanique d'un sable renforcé par des nappes de polyéthylène

Saïd Nouri* — Ammar Nechnech** — Belkacem Lamri*

* Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Université Hassiba Benbouali, Chlef, nouri_said@yahoo.fr, lamri_belkacem@yahoo.com

** Faculté de Génie Civil, Université des Sciences technologiques Houari Boumediene, Alger, nechnech_a@yahoo.fr

RÉSUMÉ: Cet article concerne une étude de l'influence des nappes géosynthétique sur la résistance au cisaillement et sur l'évolution des caractéristiques mécaniques du sable de Chlef, afin de transformer le comportement fragile du sable en un comportement plus ductile.

L'étude a été effectuée à l'appareil triaxial quasi-statique sur un chemin de compression drainé pour un confinement de 100 kPa sur un sable renforcé par des polyéthylènes en nappes variant de 1, 2, 3 et 5 lits. Les essais drainés mettent en évidence l'effet des nappes sur les caractéristiques mécaniques : l'angle de frottement, l'angle caractéristique et le module de déformation croît avec la diminution de l'espacement des nappes plastiques de polyéthylène (ou l'augmentation du nombre de nappes), alors que l'angle de dilatance n'est pas affecté de manière significative.

ABSTRACT: This article concerns a study the effect of geosynthetic layers on the shear strength and on the evolution of the mechanical characteristic of the sand of Chlef, in order to transform the sand's brittle behavior to more ductile one. The study has been done to the drained triaxial compression for a confining pressure of 100 kPa on reinforced sand by polyethylenes in material layers varying 1, 2, 3 and 5 beds. The drained tests put in evidence the effect of material layers on the mechanical characteristic: the friction angle, the characteristic angle and the deformation modulus grows with the decrease of the spacing of plastic material layers of polyethylene (or the increase of the number layers), whereas the dilatancy angle is affected slightly by plastic material layers .

MOTS-CLÉS: Renforcement, essai triaxial, propriétés des sols, nappes plastiques, dilatance, angle de frottement.

KEYWORDS: Reinforced soil, triaxial tests, soil properties, plastic material layers, dilatancy, frictionAngle.

1. Introduction

L'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol, support de tout ouvrage en terre de génie civil, est une préoccupation des géotechniciens. Une technique de renforcement des sols consiste à améliorer la résistance initiale et les caractéristiques mécaniques du sol par des inclusions résistantes. Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'amélioration du comportement des sols on peut citer le renforcement des sols par des nappes géosynthétiques (géotextiles et plastiques). L'utilisation de matières plastiques dans le domaine de génie civil et travaux publics n'est pas un événement vraiment nouveau. Un certain nombre d'études et d'expérimentation a été réalisé.

Coulet et al. 1988, ont proposé un 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 expérimentales que théoriques menées sur des essais en laboratoire et en vraie grandeur montrent que la résistance augmente en fonction de la quantité de matières plastiques tandis que l'angle de frottement interne varie très peu.

Rakotondramanitra et al. 1988; Dali et al. 1989 ont constaté que la cohésion anisotrope chute à la rupture des nappes, tandis que l'angle de frottement interne varie faiblement. Ainsi que Messas (1999) et à partir des essais à la boîte de cisaillement à plan vertical sur des échantillons renforcés par l'inclusion de nappes plastiques souples discontinues, a indiqué que l'augmentation de la résistance au cisaillement par les nappes de plastiques se traduit par l'apparition d'une pseudo cohésion, tandis que l'angle de frottement reste constant.

La conclusion commune de ces études a montré que l'ajout d'un pourcentage minimal de ces inclusions en forme de nappes au sable augmente nettement la résistance ultime 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. Dispositifs d'essais

Le dispositif expérimental (Figure 1) utilisé pour cette étude est constitué d'une cellule triaxiale permettant de solliciter des éprouvettes cylindriques d'un diamètre de 70 mm et d'une hauteur de 70 mm. Cette cellule est placée sur une presse ayant une capacité de 40 kN. Les essais triaxiaux sont réalisés à taux de déformation contrôlé (0,23 % par minute) en condition drainé et non drainée.

La cellule est équipée de deux contrôleurs de pression (GDS), qui permettent d'assurer le confinement de l'échantillon et le contrôle de sa variation volumique. Il peut être commandé par ordinateur (Interface Standard, IEEE-488).



Figure 1. Dispositif expérimental: vue d'ensemble de la cellule triaxiale, Deux contrôleurs GDS et chaîne d'acquisition.

3. Matériaux et méthode expérimentale

3.1. Matériaux utilisés

Le matériau utilisé dans ce travail est le sable de Chlef (Algérie), qui est un sable moyen 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 de $e_{\max}=0,99$, $e_{\min}=0,64$. Les compacités maximales et minimales sont $15,6\text{ kN/m}^3$ et $12,9\text{ kN/m}^3$ successivement. La courbe granulométrique de ce matériau est illustrée sur la figure 2 ci-dessous.

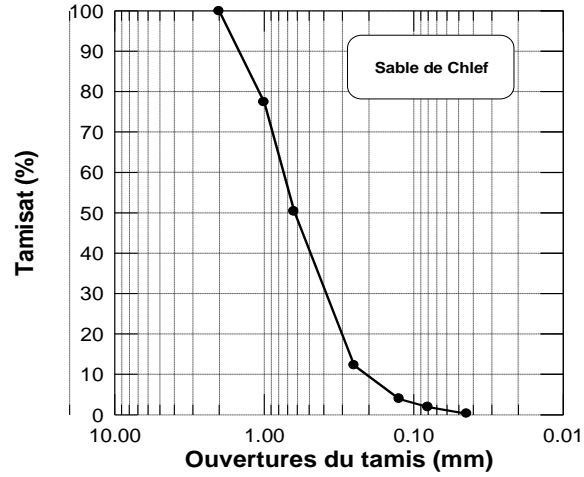


Figure 2. La courbe granulométrique du sable de Chlef.

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 perforé par une aiguille de diamètre $< 0,2$ mm pour faciliter l'écoulement d'eau dans l'échantillon de sable. La figure 3 ci – dessous montre les nappes plastiques en disque utilisées:



Figure 3. Les nappes plastiques utilisées

Les caractéristiques physiques et mécaniques ont été étudiées au laboratoire de mécanique de l'université de Chlef (Algérie), selon les normes ISO (essais de traction par la machine SM 100). La figure 4 montre la résistance à la traction du matériau de renforcement.

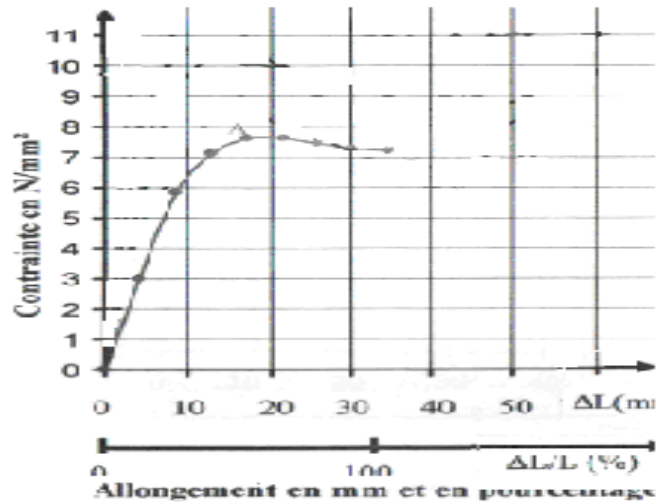


Figure 4. Résistance à la traction du matériau de renforcement.

Le tableau 1 ci-après regroupe les caractéristiques du matériau de renforcement utilisé.

| Masse volumique (g/m ³) | Epaisseur (mm) | Ouverture de filtration (mm) | Angle de frottement sable/plastique | Résistance à la rupture (MPa) | déformation à la rupture (%) |
|-------------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 924 | 0,18-0,20 | <0,2 | 33° | 5,7 | 110 |

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques et physiques du plastique.

3.2. Mode opératoire et essais réalisés

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 50 % (sable moyennement dense). Après chaque couche de sable compacté et nivelé, le renforcement a été placé dans l'éprouvette horizontalement. Le diamètre du renforcement était légèrement moins que celle de l'échantillon. Après la phase de consolidation,

l'échantillon est soumis à un chargement triaxial monotone sous une contrainte de confinement moyenne de 100 kPa en condition drainée. Le cisaillement s'effectue à déplacement axial contrôlé avec une vitesse suffisamment lente (0,17mm/min). La déformation axiale finale pour l'ensemble des échantillons est de l'ordre de 20%.

Le programme expérimental consiste à réaliser des essais triaxiaux monotones drainés d'un sable non renforcé et renforcé par différent nombre de nappes plastiques avec une variété d'emplacement de ces nappes (comme le montre la figure 5). Les nappes plastiques sont disposées horizontalement espacées de ΔH . Quatre espacements ΔH ont été choisis pour nos essais en fonction du nombre de nappes plastiques: $\Delta H=35\text{mm}$ (NP=1), $\Delta H=23,3\text{mm}$ (NP=2), $\Delta H=17,5\text{mm}$ (NP=3) et $\Delta H=11,6\text{mm}$ (NP=5).

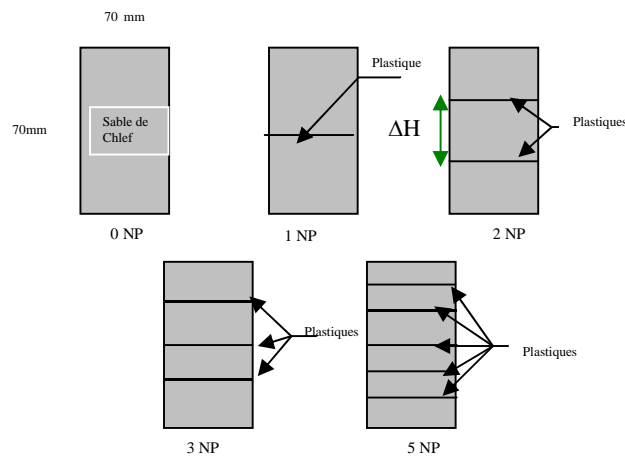


Figure 5. Essais triaxiaux monotones non drainés sur le sable renforcé.

4. Présentation des résultats et discussion

4.1. Comportement contrainte déviatoire – déformation axiale

La figure 6 illustre les résultats des essais drainés réalisés pour différents échantillons de sable non renforcé et renforcé par des nappes géosynthétique avec un espacement des nappes variable de $\Delta H=35\text{mm}$, $\Delta H=23,3\text{mm}$, $\Delta H=17,5\text{mm}$ et $\Delta H=11,6\text{mm}$. On remarque que l'espacement des nappes affecte d'une manière significative le comportement du composite sable – plastique. Par ailleurs nous remarquons sur cette même figure que les courbes contraintes déviatoires en fonction des déformations axiales du sable renforcé croît avec la diminution de l'espacement des nappes plastiques.

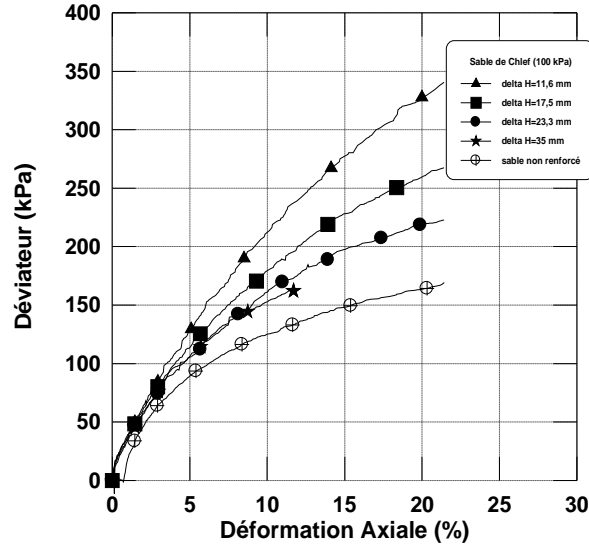


Figure 6. Comportement drainé contrainte – déformation du sable renforcé par des nappes plastiques.

La figure 7 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 ($\varepsilon_1=20\%$) est plus accentuée que celle du déviateur déterminé à $\varepsilon_1=10\%$. La valeur de la pente est égale à 34,4 (pente d'une droite reliant le déviateur en fonction de l'espacement des nappes) pour le déviateur maximal à la rupture (q_{\max} à 20%), tandis que, pour le déviateur maximal à la moitié de déformation totale (q à 10%), cette valeur ne dépasse pas 19. L'augmentation de la résistance au cisaillement est tout à fait significative allant jusqu'à un taux très élevé de 60% à 106% pour q_{\max} et $q_{10\%}$ respectivement pour un espacement des nappes minimal égal à 11,6mm.

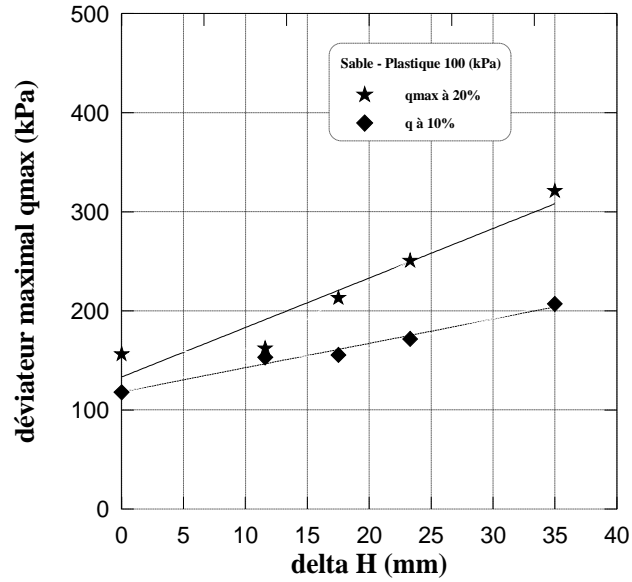


Figure 7. Evolution du déviateur maximal en fonction de l'espacement des nappes plastiques.

4.2. Variation de volume de l'éprouvette

La variation des déformations volumiques est aussi influencée par la présence des nappes plastiques. La courbe d'évolution des déformations volumiques en fonction de la déformation axiale représentée dans la figure 8 traduit un comportement connu : phase de contractance suivie d'une phase de dilatance, plus rapidement dans le sable non renforcé que celles obtenues par les échantillons renforcés.

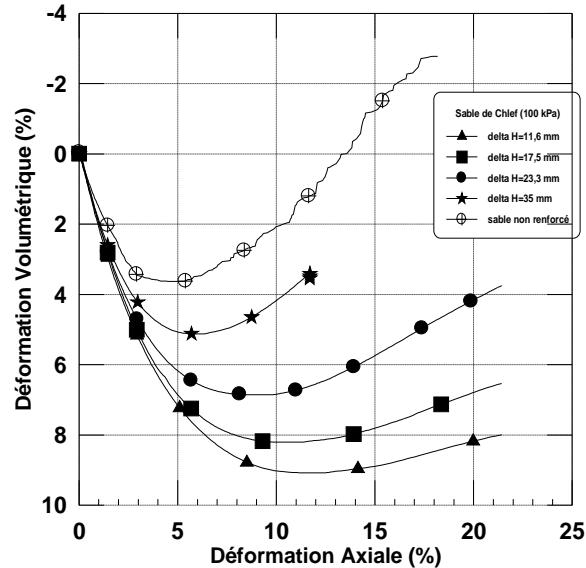


Figure 8. Déformation volumique – déformation axiale du sable renforcé par des nappes plastiques.

La comparaison de l'ensemble des courbes montre que, pour le sable non renforcé et l'échantillon renforcé dont l'espacement des nappes est égal à 35mm, un phénomène de dilatance est apparu rapidement à partir de 5% de déformation axiale, alors que l'échantillon ayant subi un renforcement avec des espacements des nappes de 23,3mm, 17,5mm et 11,6mm, la dilatance ne peut commencer qu'après 9%, 11% et 13% de déformation axiale respectivement. Dans les quatre échantillons renforcés on observe finalement une stabilisation progressive du volume vers les grandes déformations. Nos résultats sont en parfaite concordance avec ceux trouvés par d'autres chercheurs sur les géotextiles (Cordary et Richa, 1992 et Athanasopoulos, 1993).

5. Influence du renforcement sur les caractéristiques mécaniques du sable

La figure 9a montre l'évolution du module de déformation sécant (q/ε_a) avec la déformation axiale (ε_a). On observe que ce module croît avec la diminution de l'espacement des nappes plastiques (ΔH). Cette croissance est très significative jusqu'à une déformation de 0,7%, ensuite le module tend à se stabiliser. On peut remarquer aussi qu'autour de 1% de déformation axiale, le module sécant en sable renforcé est environ 2 fois plus grand que le module sécant du sable non renforcé. Pour les faibles déformations ($< 0,01\%$) le module sécant est amélioré par des facteurs beaucoup importants (supérieur à 10). La figure 9b montre l'influence du matériau de renforcement sur le module de déformation sécant mesuré à $\varepsilon_a = 1\%$. On

constate que ce module croît avec la diminution de l'espacement des nappes plastique de façon non linéaire jusqu'à $\Delta H = 23,3\text{mm}$ ensuite il tend à se stabiliser.

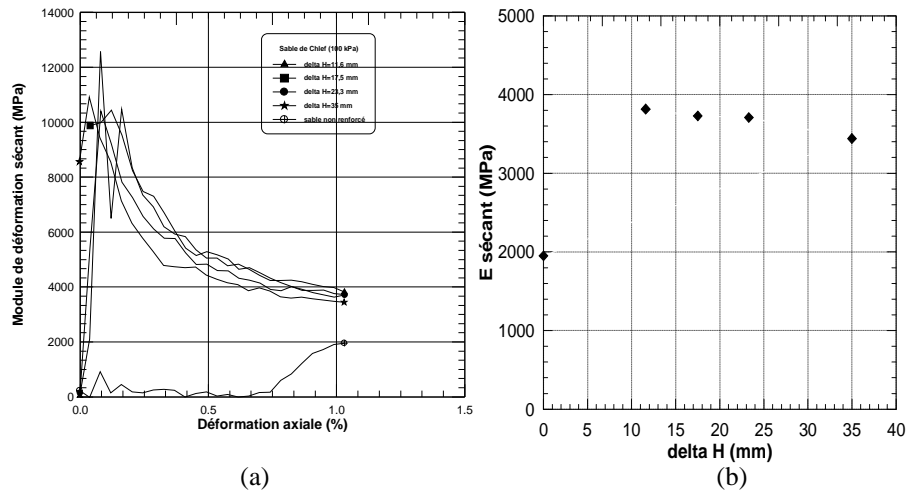


Figure 9. Influence du matériau de renforcement sur le module de déformation sécant: (a) Variation du module sécant-déformation axiale; (b) Module sécant à $e_a = 0,01$

La figure 10 montre l'évolution de l'angle de frottement à la rupture en fonction de l'espacement des nappes plastique (ΔH) pour les comportements monotones drainés. On note que l'angle de frottement augmente avec la diminution de l'espacement des nappes. On peut constater dans cette figure que la variation est presque quasi linéaire. L'angle de frottement interne passe de 27° pour l'échantillon n'ayant pas subi de renforcement à 39° pour l'échantillon ayant subi un renforcement maximal de 5 nappes plastiques ($NP = 5$) où l'espacement est égal à $11,6\text{mm}$.

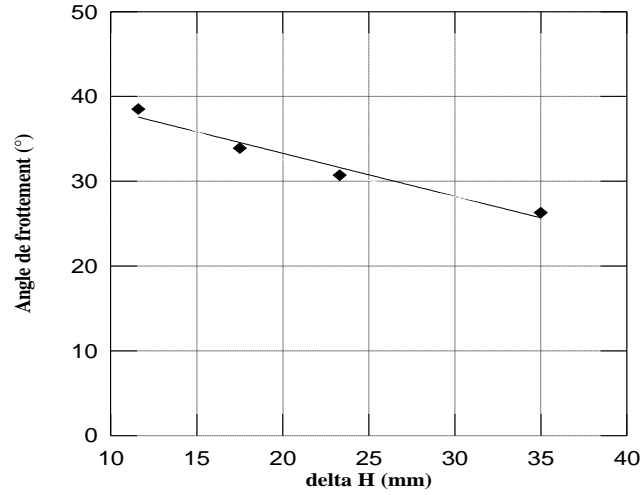


Figure 10. Influence du matériau de renforcement sur l'angle de frottement.

La figure 11 montre la variation de l'angle caractéristique (correspondant au changement de phase contractance/dilatance) en fonction de l'espacement des nappes plastiques (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 11,6mm. On note aussi que cette variation croît selon une relation quasi-linéaire.

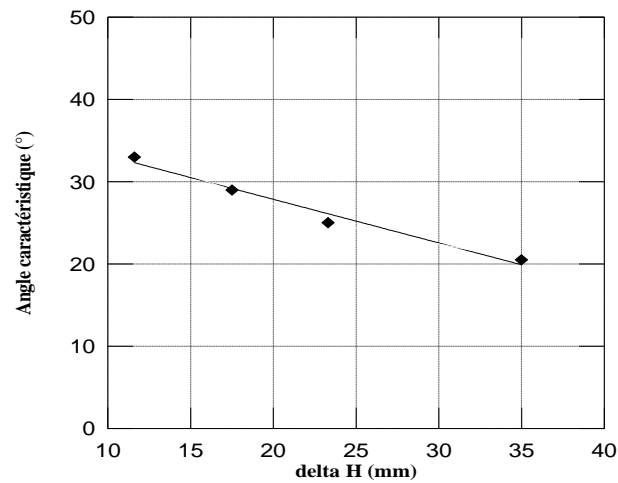


Figure 11. Influence du matériau de renforcement sur l'angle caractéristique

La figure 12 montre l'évolution de l'angle de dilatance maximal en fonction de l'espacement des nappes plastiques (ΔH). On constate que cet angle varie peu avec la diminution de l'espacement des nappes de renforcement (ΔH). On peut expliquer cette faible influence par le fait que la nappe plastique atteint sa limite de compressibilité, et par conséquent son intervention dans les échantillons renforcés est minimisée.

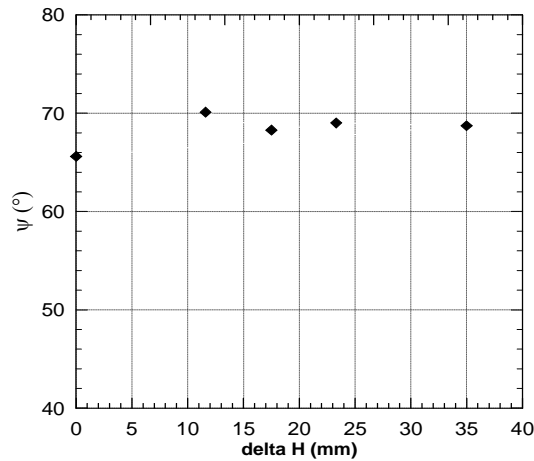


Figure 12. Evolution de l'angle de dilatance en fonction de l'espacement des nappes plastiques.

6. Conclusion

Bien que les résultats soient partiels on note que, le renforcement par inclusion des nappes plastiques apporte un gain de résistance au cisaillement appréciable aussi bien au sol vierge qu'au sol renforcé sous charges monotones. Les essais montrent que la diminution de l'espacement des nappes plastiques (ou l'augmentation du nombre de nappes) augmente les contraintes déviatoires monotones du matériau composite (sable – nappes plastiques), qu'il accroît la phase de contractance de ce matériau. La présence des nappes plastiques, avec un faible espacement entre eux, augmente très fortement l'angle caractéristique et l'angle de frottement, mais qu'elle n'affecte pas son angle de dilatance.

Enfin, l'utilisation des nappes de matières plastiques permet, d'une part, d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols et, d'autre part, de construire une solution économique et écologique aux problèmes posés par leurs déchets.

7. Bibliographie

- Bouferra R., Shahrouh I., "Etude expérimentale de l'influence des éléments fins sur le potentiel de liquéfaction des sols". *3^{ème} Symposium International sur le Génie Sismique*, Chlef, 9, 10 et 11 Octobre 2000, pp. 193-202.
- 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, pp.462-472.
- Gopal Ranjan, Vasan R. M. et Charan H. D., "Behaviour of plastic-fiber-reinforced sand". *Geotextiles and Geomembranes*, n° 13, 1994, pp. 555-565.
- Gray D. H., Asce A. M., Ohashi H., "Mechanics of fiber reinforcement in sand". *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, n° 3, 1983, pp.335-353.
- Haeri S. M., Noorzad R., Oskoorouchi A. M., "Effect of géotextile reinforcement on the mechanical behaviour of sand". *Géotextiles and Géomembranes*, n° 18, 2000, pp. 385-402.
- Messas T., " Caractérisation et renforcement des sols avec inclusion de nappes plastiques souples discontinues", *Revue Française de Géotechnique*, n° 87, 1999, pp. 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, pp. 309-316.
- Nouri S., Laradi N. Charlier R., " Effet de renforcement par nappes plastiques sur le comportement du sable". *4^{ème} Symposium International sur la construction*, Chlef, 22, 23 et 24 Novembre 2005, pp. 132-138.
- Michalowski R. L., Cermak J., "Strength anisotropy of fiber - reinforced sand". *Computers and Geotechnics*, n° 29, 2002, pp.279-299.
- Michalowski R. L., Zhao A., "Failure of fiber reinforced granular soils". *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, n° 3, 1996, pp.226-234.
- Venkatappa Rao G., Dutta R.K., and Ujwala D., "Strength characteristics of sand reinforced with coir fibres and coir géotextiles". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, USA, Vol. 10/B, 2005, <http://www.ejge.com>.