

ETUDE EN LABORATOIRE DU RENFORCEMENT DES SOLS PAR GEOTEXTILES

BRAHIM Abdelkader¹, ARAB Ahmed¹, DELLA Nouredine¹, LAMRI Belkacem¹, BELKHATIR Mostefa¹, DJAFAR HENNI Ahmed¹, MEKKAKIA MAAZA Merouane¹.

¹ Laboratoire des sciences des matériaux et environnement .Faculté des sciences et science de l'Ingénieur .Département de Génie Civil Chlef (Algérie)

Résumé: *La liquéfaction des dépôts de sols sableux pendant les séismes a toujours été l'un des problèmes les plus importants dans le domaine de la géotechnique. Un défi important est l'évaluation de la résistance au cisaillement non drainée appropriée des sols liquéfiables à utiliser dans l'étude de la stabilité de liquéfaction de différents types d'ouvrages en terre (remblais, barrages en terre, etc.). L'objectif de ce travail expérimental est présente une étude en laboratoire des renforcements des sols de Chlef sur le comportement d'un sable limoneux avec une densité relative ($D_r=50\%$). La Note est composée de trois parties. La première présente les sols étudiés ; la seconde donne une analyse des résultats des essais monotones drainés et non drainés réalisés et discute de l'influence de renforcement des sols par des types de géotextiles sur les caractéristiques mécaniques du sable. Les essais montrent que l'augmentation d'utilisation des nappes des géotextiles augmente le déviateur de contrainte du sol et réduit la déformation volumique (ϵ_v) du sol. La troisième partie présente l'influence du module sécant de déformation sur la réponse du sol de Chlef. Les résultats montrent que le module sécant de déformation varie inversement proportionnelle en fonction de la déformation axiale.*

Mots-clefs : *Comportement, sol, renforcement, géotextile, module sécant.*

Abstract: *Liquefaction of sandy soil deposits during earthquakes has been one of the most important problems in the field of geotechnical earthquake engineering. A major challenge is the assessment of the appropriate undrained shear strength of liquefied soils to be used in the study of liquefaction stability of different types of earth structures (embankments, earthdams, etc.). The objective of this laboratory investigation is to study of soil reinforcements Chlef on the behavior of a silty sand with a relative density ($D_r = 50\%$). The Note is composed of three parts. The first presents the soils studied, the second provides an analysis of test results monotonic drained and undrained made and discusses the influence of soil reinforcement by types of geotextiles on the mechanical properties of sand. The tests show that the increased use of geotextile sheets increased the deviator forced soil and reduces the volumetric strain ζ_v soil. The third part presents the influence of the secant modulus of deformation of the soil response of Chlef. The results show that the secant modulus of deformation varies inversely as a function of axial strain.*

Key-words: *behavior, soil, reinforcement, geotextile, secant modulus.*

1. Introduction

Actuellement, les méthodes les plus utilisées pour l'amélioration de la résistance à la liquéfaction agissent sur la densité relative, les conditions de drainage du sol et par inclusions de nappes de géotextiles. Pour ces derniers, leur application sur le terrain est très limitée. Elles sont uniquement utilisées pour la stabilisation des pentes et talus etc.

Plusieurs travaux concernant l'étude en laboratoire du renforcement des sols par géotextiles tels que Ingold et Miller (1983) ont utilisé le kaolin renforcé par des plaques en aluminium et en plastique perméables. Fabian et Fourie (1986) définissent l'effet de la perméabilité du matériau (Argile) renforcée sur chemin UU. Boominathan et Hari (2000) ont étudié le comportement du matériau " Fly Ash" renforcé par des fibres et mailles géosynthétiques (On note que le renforcement par mailles indique une supériorité sur le renforcement par fibres sur la résistance à la liquéfaction. On peut

conclure que l'inclusion de mailles synthétiques dissipe facilement la pression interstitielle et fournit un meilleur emboîtement dans le matériau). Noorzad et al (2010) ont utilisé une série d'essais de cisaillement direct sur sol cohérent très plastique pour évaluer et comparer le comportement des géotextiles tissés et non-tissé sur le comportement de l'argile. Krishnaswamy et Srinivasula Reddy (1988) ont étudié l'influence de la distance entre les matériaux renforcés ainsi que la teneur en humidité de l'échantillon en utilisant des essais triaxiaux non drainés sur une argile limoneuse renforcée par un géotextile. Srivastava et al. (1988) ont étudié le comportement d'un sol limoneux renforcé par géotextiles à l'aide des essais insitu et au laboratoire. Al-Omari et al. (1989) ont effectué des essais triaxiaux drainés et non drainés sur le comportement d'une argile renforcée avec geomesh. Indraratna et al. (1991) ont étudié le comportement des argiles limoneuses renforcées et non renforcées par géotextiles non-tissés et tissés. L'utilisation de géotextiles non tissés pour le renforcement d'une argile limoneuse saturée a été évaluée par Ling et Tatsuoka (1993). Vercueil, Billet et Cordary (1997) ont étudié le comportement du sable d'Hostun Rf renforcé par des nappes de géotextiles ; on note que le gradient augmente avec l'augmentation du rapport de contrainte. Unnikrishnan et al. (2002) ont étudié l'influence du renforcement par la technique de couche sandwich (couche de sable de chaque côté du géotextile) sur un sol argileux du nord de Chennai city (Inde).

D'autres recherches ont été effectuées dans ce domaine comme celles de Ingold et Miller (1982), Ingold (1983), Fourie et Fabian (1987), Miura et al. (1990), Li et al. (1995), Athanasopoulos (1996), Koliass et al. (2005), et Lekha Kavitha (2006), Tang et al. (2007), et Sachan Penumadu (2007), Wang et al. (2007), Prashant et Penumadu (2007), Houston et al. (2008), Kim et al. (2008) et Subaida et al. (2009), où le comportement mécanique et les variations contrainte-déformation des sols cohérents renforcés avec des géotextiles ont été évalués. Les sols cohésifs peuvent avoir une large série d'indices de plasticité. Le comportement de ces sols est également affecté par la compacité relative. Bien que la recherche ait été mentionnée précédemment avec des sols cohérents, les deux paramètres précités n'ont pas encore été évalués pour les argiles renforcées avec des couches de géotextile.

Cette étude présente l'influence du renforcement du sol de Chlef par des inclusions de colonnes ballastées, nappes de géotextiles et des micro-pieux de sable compacté sur la résistance à la liquéfaction et sur les caractéristiques mécaniques.

2. Matériau utilisé

Les essais ont été réalisés sur le sable de Chlef (Algérie) contenant 0,5 % de limon de l'oued qui traverse la ville de Chlef à l'ouest d'Alger. La courbe granulométrique de ce sable est donnée sur la Figure 1. Le sable de Chlef est un sable moyen, arrondi avec un diamètre moyen $D_{50} = 0,61\text{mm}$. Le limon contenu est peu plastique avec un indice de plasticité de 6%. Tableau 1 donne les caractéristiques physiques du sable utilisé. La densité relative et la pression de confinement σ'_c sont constantes tout le long de nos essais et valent respectivement à $I_d = 50\%$ et $\sigma'_c = 100\text{ kPa}$. La masse correspondante est égale à 430 grs. Les caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles utilisés sont données sur le Tableau 2.

Tableau 1 : Caractéristiques du sable de Chlef.

| MATERIEL | e_{min} | e_{max} | γ_s (g/cm^3) | C_u (D_{60}/D_{10}) | D_{50} (mm) | D_{10} (mm) | Forme des particules |
|----------|-----------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|-------------------------|
| O/ Chlef | 0,535 | 0,854 | 2,67 | 3,38 | 0,61 | 0,225 | Arrondie |

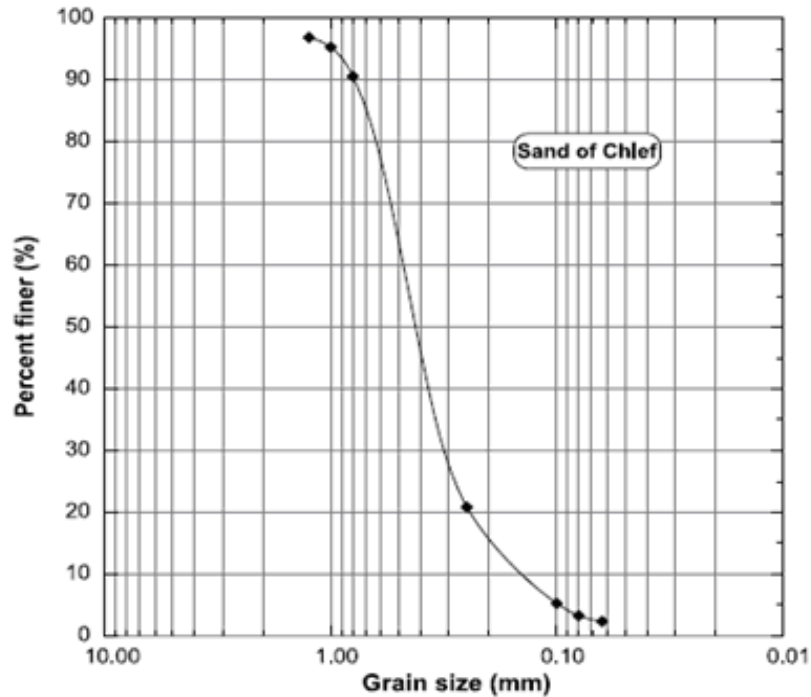


Figure 1. Courbe granulométrique du sable utilisé.

Tableau 2: Les caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles utilisés.

| PROPRIETE | Type de renforcement | |
|--|----------------------|-----------|
| <i>Géotextiles</i> | Bidim-PEC 75 | Bidim-S72 |
| <i>Type de Fabrication</i> | tissé | Non-tissé |
| <i>Masse surfacique, g/m²</i> | 350 | 305 |
| <i>Epaisseur sous 2 kPa, mm</i> | 2,3 | 2,7 |
| <i>Résistance à la traction, KN/m</i> | 79 | 25 |
| <i>déformation à l'effort de traction, %</i> | 11,5 | 80 |
| <i>Rés. au poinçonnement statique CBR</i> | 2,7 | 3,85 |
| <i>Perméabilité normale au plan, m/s</i> | 0,07 | 0,055 |

3. Mode opératoire

Le dispositif expérimental utilisé est présenté sur la **figure 3**. Il comprend: Une cellule triaxiale de type Bishop et Wesley (Bishop et Wesley, 1975); trois contrôleurs de pression ; volume de marque GDS (200 cc); une pompe à un réservoir afin de désaérer l'eau déminéralisée ; une centrale d'acquisition; un micro-ordinateur équipé d'un logiciel permettant le pilotage de l'essai et l'acquisition des données.



Figure 2. Dispositif expérimental utilisé.

3.1. Moule de fabrication des échantillons

Les échantillons sont fabriqués à d'un moule constitué être assemblées ou repoussées l'une de l'autre facilement à l'aide d'un collier de serrage. Un conduit d'aspiration est relié à une pompe à vide afin de plaquer la manchette sur les parois latérales du moule.

3.2. Déversement à sec (DS)

Dans notre étude on a utilisé la méthode de déversement à sec, le sol sec est déposé dans le moule à l'aide d'un entonnoir avec contrôle de la hauteur (figure 3). Pour avoir des échantillons lâches, il faut que la hauteur de chute ne soit quasi-nulle à l'aide d'un entonnoir.

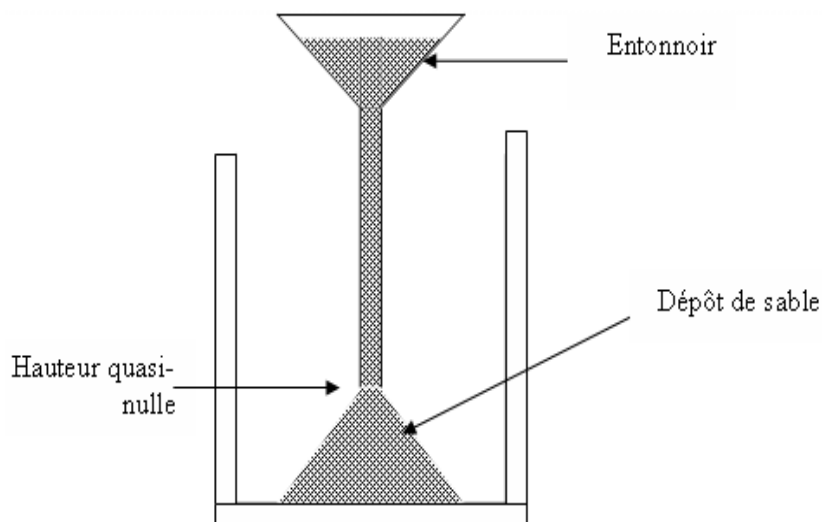


Figure 3. Préparation par pluviation à sec.

3.3. Préparation de l'échantillon

Les échantillons utilisés sont cylindriques d'élancement 1 ($\Phi=70\text{mm}$ et $H=70\text{mm}$). Pour s'assurer d'une bonne homogénéité des contraintes et des déformations au sein de l'échantillon, plusieurs chercheurs (Lee, 1978; Robinet et al, 1983; Tatsuoka et al, 1984; Colliat, 1986; Al Mahmoud, 1997) ont insisté sur la nécessité de réduire les frottements entre l'échantillon et les embases supérieures et inférieures. Ceci peut être obtenu avec de l'embase de surface lisse ou lubrifiée. Le système d'antifrottement utilisé dans cette étude est composé des éléments suivants: une surface lisse de téflon couvrant les embases; une couche de graisse de Silicone (KS63G) (environ $50\mu\text{m}$ d'épaisseur); un disque de latex de $0,2\text{mm}$ d'épaisseur sur chaque embase...

Préparation de l'échantillon comporte les étapes suivantes: mise en place de la manchette en latex; mise en place du moule; remplissage du moule par le matériau; mise en place de l'embase supérieure; application d'un vide (-20KPa); mise en place de la cellule et l'application d'un confinement ($+20\text{KPa}$).

La préparation de l'échantillon utilisé est présentée des différents sol et géotextiles. Il comprend: Deux types des géotextiles (tissé et non tissé), Le nombre des couches du géotextile illustré sur la figure 4, Une densité relative ($D_r=50\%$), Un type de sol (Sable de Chlef), Une valeur de pression de confinement (100 kPa).

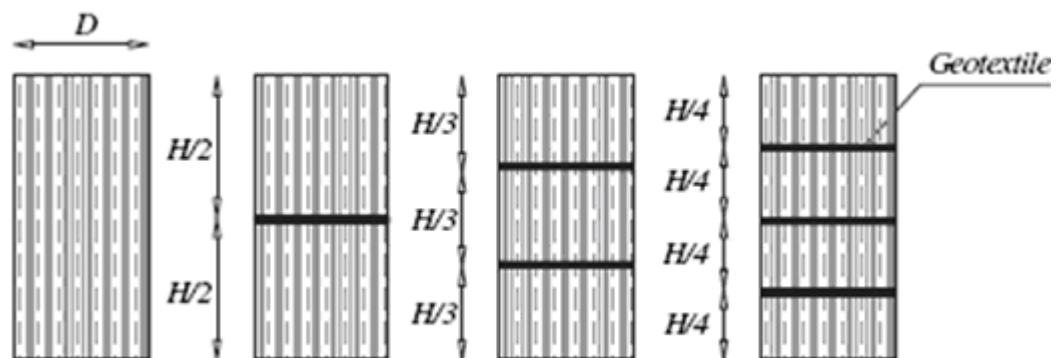


Figure4. Arrangement de géotextile dans différents échantillons.

3.4. Saturation de l'échantillon

La saturation est une étape importante dans la procédure expérimentale car sa qualité conditionne la réponse de l'échantillon sous chargement non drainé. Pour obtenir un bon degré de saturation, on utilise la technique du gaz carbonique élaborée par Lade et Ducan (1973). L'échantillon est balayé par du gaz carbonique pendant vingt minutes, ensuite on fait circuler l'eau désaérée et déminéralisée jusqu'à recueillir un volume d'eau supérieur à une fois et demi le volume de l'échantillon.

3.5. Consolidation de l'échantillon

La phase de consolidation consiste à appliquer parallèlement une montée de pression dans la cellule par l'intermédiaire du contrôleur de pression/volume (GDS1) et à l'intérieur de l'échantillon (GDS2). L'application d'une contre pression à l'échantillon à l'aide du GDS2 améliore la qualité de la saturation en comprimant les micro-bulles du gaz interstitiel qui restent emprisonnés entre les grains du sol. On maintient les pressions dans la cellule et l'échantillon jusqu'à stabilisation des volumes (cellule et échantillon).

La qualité de la saturation est évaluée en mesurant le coefficient de Skempton (B). Ce coefficient B mesuré est égal à $\Delta\mu/\Delta\sigma$. On donne un incrément $\Delta\sigma$ de 100 kPa au GDS1 relié à la cellule et on mesure la variation de la pression interstitielle $\Delta\mu$ dans par le GDS2 relié à l'échantillon.

4. Résultats des essais réalisés

4.1. Essais drainés

4.1.1. Renforcement par géotextile non tissé

Une série d'essais triaxiaux monotone drainés a été réalisés sur le sol de Chlef avec un seul indice de densité relative ($I_d=0,50$) renforcé par des nappes de géotextile non tissé (N_g). La figure 5a montre l'évolution du déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale.

D'après cette figure, on constate que :

- Le déviateur de contrainte augmente avec l'augmentation du nombre de nappes de géotextile (N_g).
- L'apparition du pic de déviateur tend à disparaître lorsque le nombre de géotextile augmente.
- La résistance au cisaillement des échantillons avec 2 et 3 nappes de géotextiles augmente d'une manière linéaire ; la résistance maximale de l'échantillon caractérisée par le déviateur maximal (q_{max}) passe de 150 à 410 kPa quand le nombre de nappes N_g passe de 0 à 3 respectivement.
- La contractance améliorée d'une manière très significative quand le nombre de nappes augmente, les déformations volumiques passe de $\varepsilon_v=-7$ à -26% quand N_g passe de 0 à 3 respectivement (fig.5b). Cette forte d'augmentation de la contractance est à la bonne adhésion entre la nappe de géotextile et le sol. Et on remarque qu'à la fin de l'essai, on n'a pas une forme de tonneau.

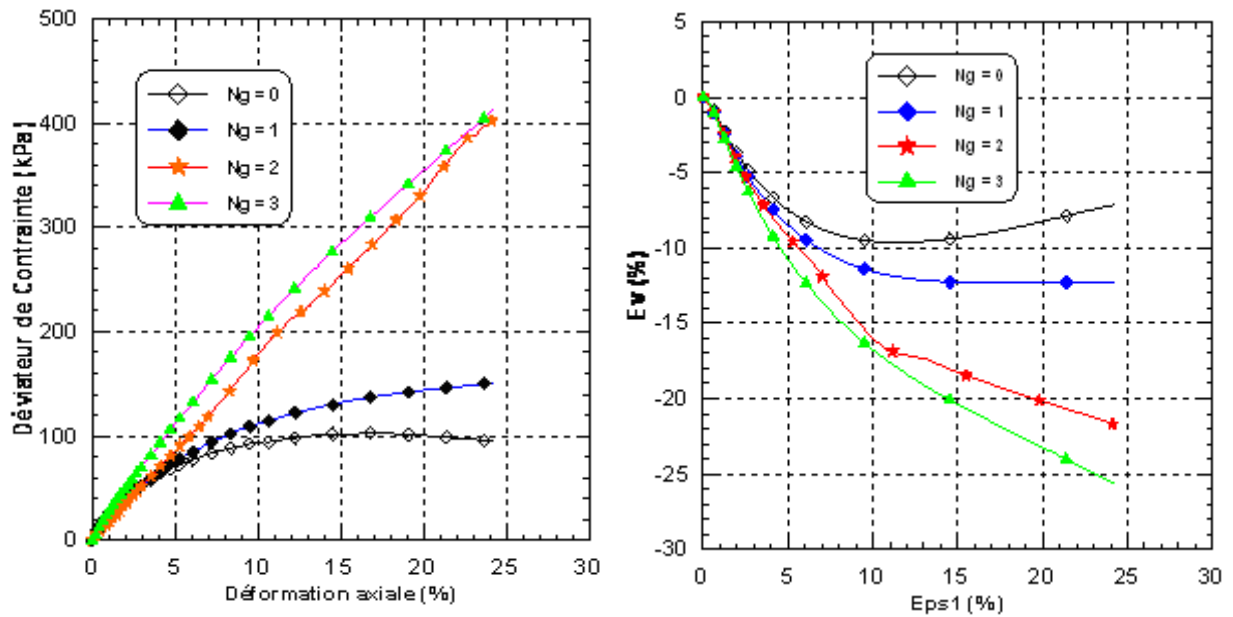
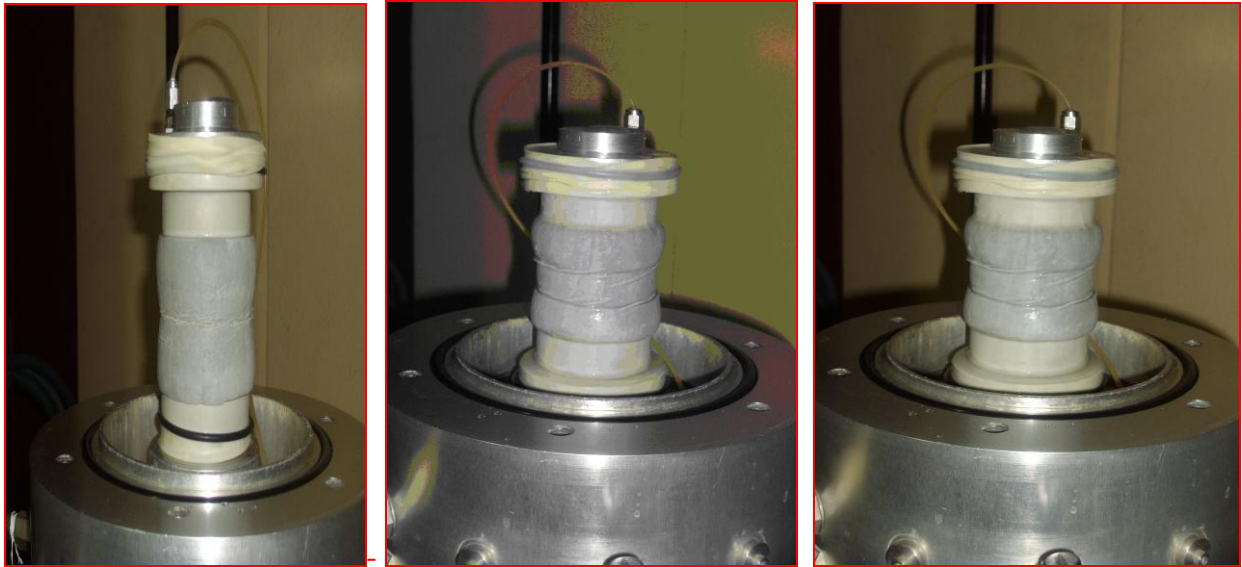


Figure 5. Renforcement de sol par des nappes des géotextiles non tissé (Essai drainé).



(a) (b) (c)

Figure 6 : l'échantillon à la fin de l'essai (Renforcement du sol par une, deux et trois nappes des géotextiles non tissé) (Essai drainé).

4.1.2. Renforcement par géotextile tissé

Une série d'essais triaxiaux monotone drainés a été réalisés sur le sol de Chlef avec un seul indice de densité relative ($I_d=0,50$) renforcé par des nappes de géotextile tissé (Ngt). Les résultats de ces essais sont illustrés dans la figure 7. Mêmes constatations et remarques sont faites pour le renforcement avec géotextile non tissé, à savoir: l'augmentation de la résistance du sol avec l'augmentation du nombre des nappes de géotextiles et aussi l'augmentation de la phase de contractance.

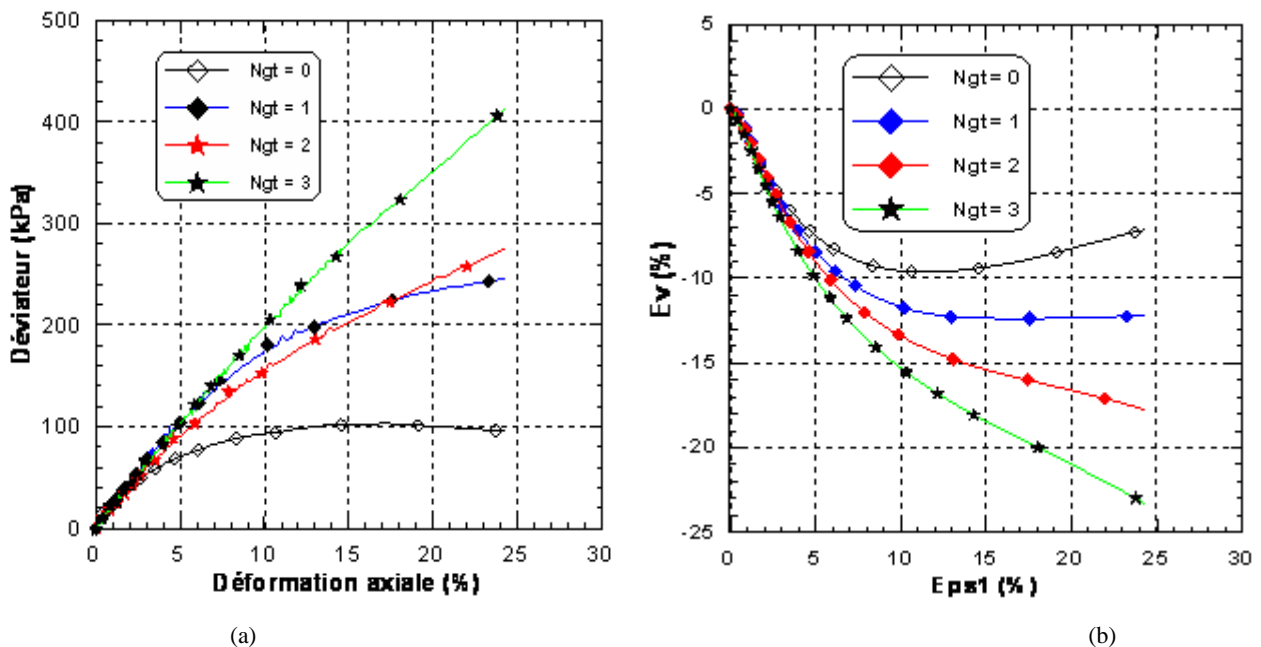


Figure 7: Renforcement de sol par les nappes des géotextiles tissé (Essai drainé)

4.2. Essais non drainés

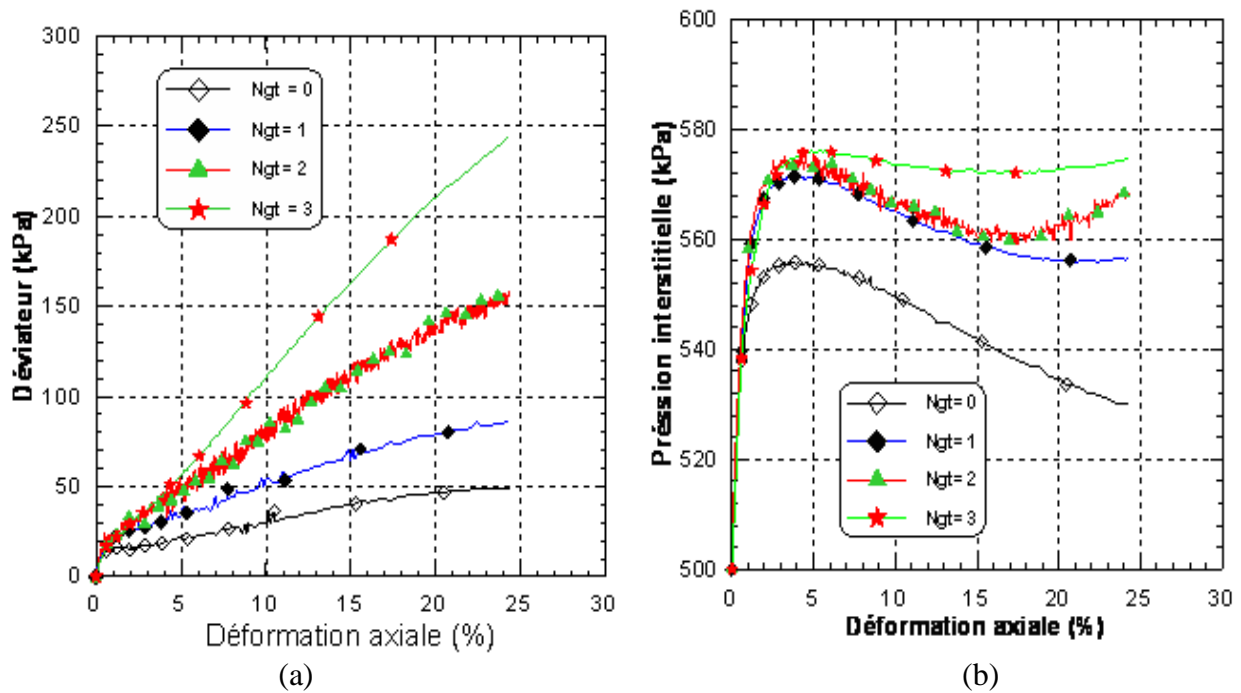
4.2.1. Renforcement par géotextiles tissés et non tissés

Une série d'essais triaxiaux monotone non drainés a été réalisés sur le sol de Chlef avec un seul indice de densité relative ($I_d=0,50$) renforcé par nappes de géotextile non tissé (figure 8)

La figure 8a montre l'évolution du déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale. On constate que le déviateur de contrainte s'améliore, tant qu'il y a un nombre élevé des nappes de géotextile (N_g), ainsi on remarque l'absence d'apparition de pic de déviateur. La valeur maximale du déviateur (q_{max}) passe 50 à 240 kPa quand l nombre de nappe de géotextile N_g sont 0 à 3 respectivement (figure 8a).

La figure 8b illustre l'évolution de la pression interstitielle en fonction de la déformation axiale. Le sol avec trois nappes de géotextiles génère une plus grande pression interstitielle en comparaison avec deux et trois nappes de géotextiles. Cette génération importante de la pression interstitielle est due à la bonne adhérence entre la surface de la nappe de géotextile et le sol qui n'engendre pas la forme de tonneau au cours du cisaillement (pas d'augmentation de volume).

La figure 8c montre le chemin de contrainte. On remarque que la droite de rupture n'est pas unique, cette ligne est très influencée par la présence des nappes de géotextile



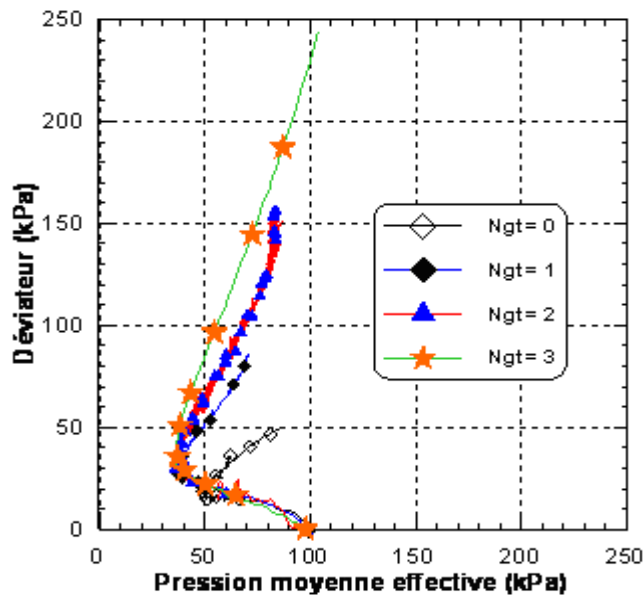


Figure 8: Renforcement de sol par des nappes des géotextiles non tissés (Essai non drainé).

Une série d'essais triaxiaux monotone non drainés a été réalisée sur le sol de Chlef avec un seul indice de densité relative ($I_d=0,50$) renforcé par nappes de géotextile tissé. Les résultats de cette série sont illustrés dans la figure 9. Mêmes remarques et constatations ont été faites quand au renforcement précédent.

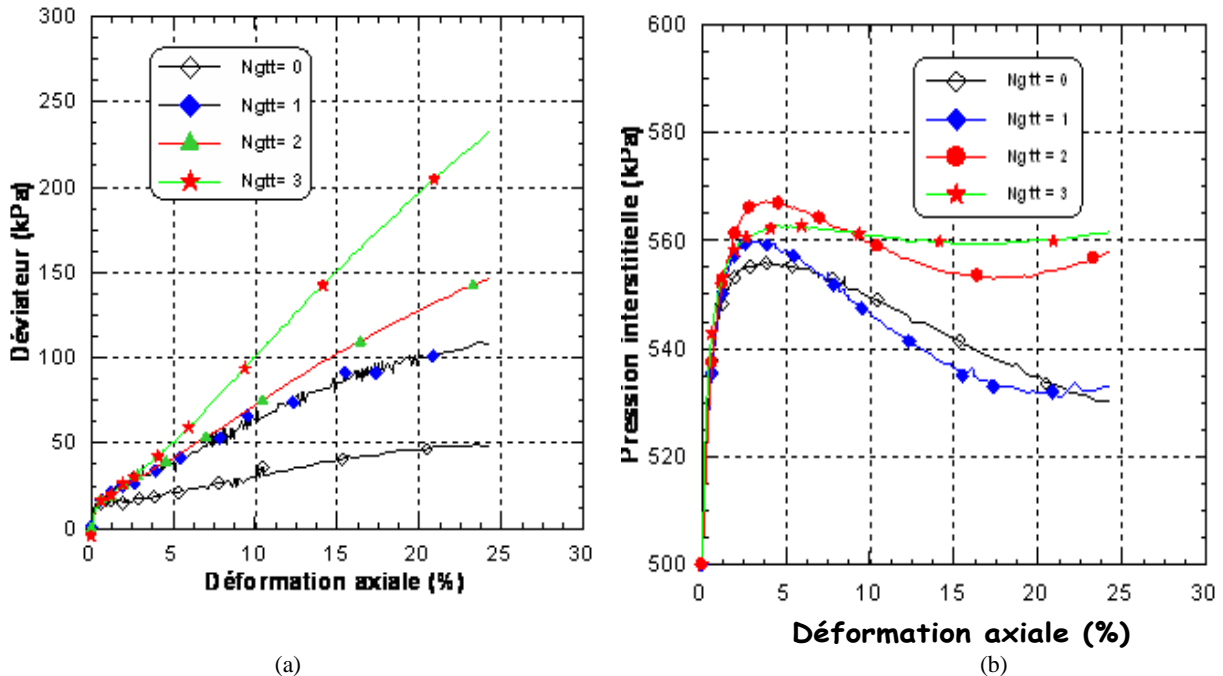


Figure 9: Renforcement de sol par les nappes des géotextiles tissés.

4.8.2. Module sécant de déformation

Les figures 10 et 11 montrent l'évolution du module sécant E (q/ϵ) en fonction de la déformation axiale pour les sols renforcés avec N_g et N_{gt} . On remarque que :

- Ce module varie inversement proportionnelle en fonction de la déformation axiale.

-Le module augmente avec l'augmentation du nombre de nappes de géotextiles, cette augmentation due à la bonne adhérence entre la surface de la nappe de géotextile et le sol.

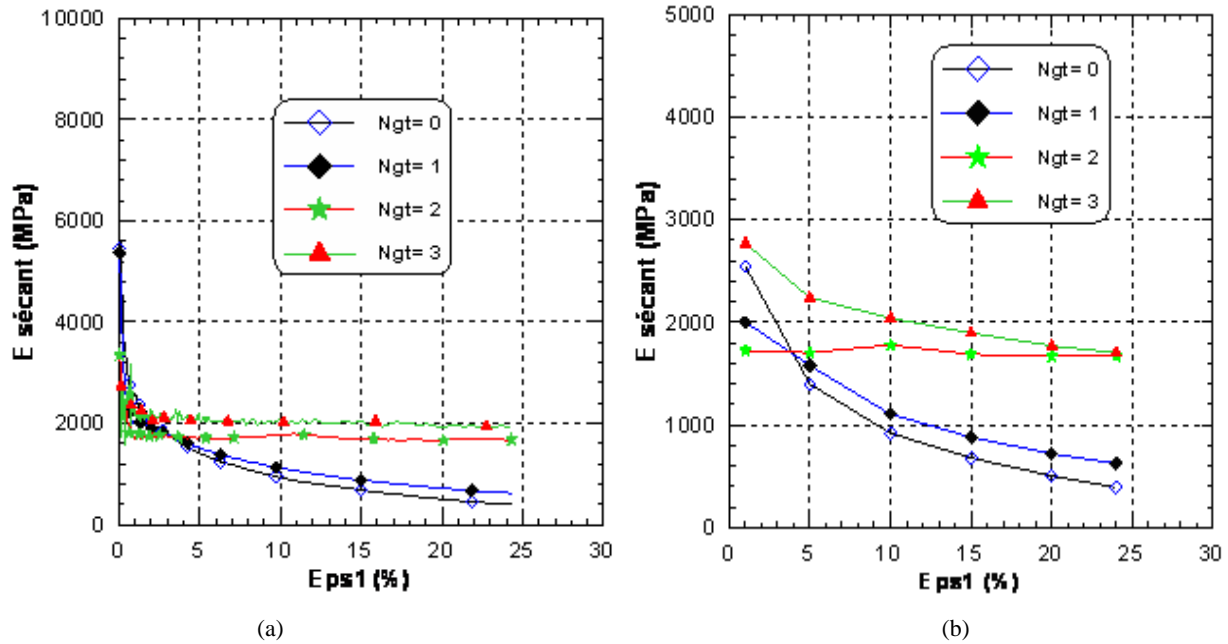


Figure 10. Influence du renforcement par des géotextiles non tissés sur le module de déformation.

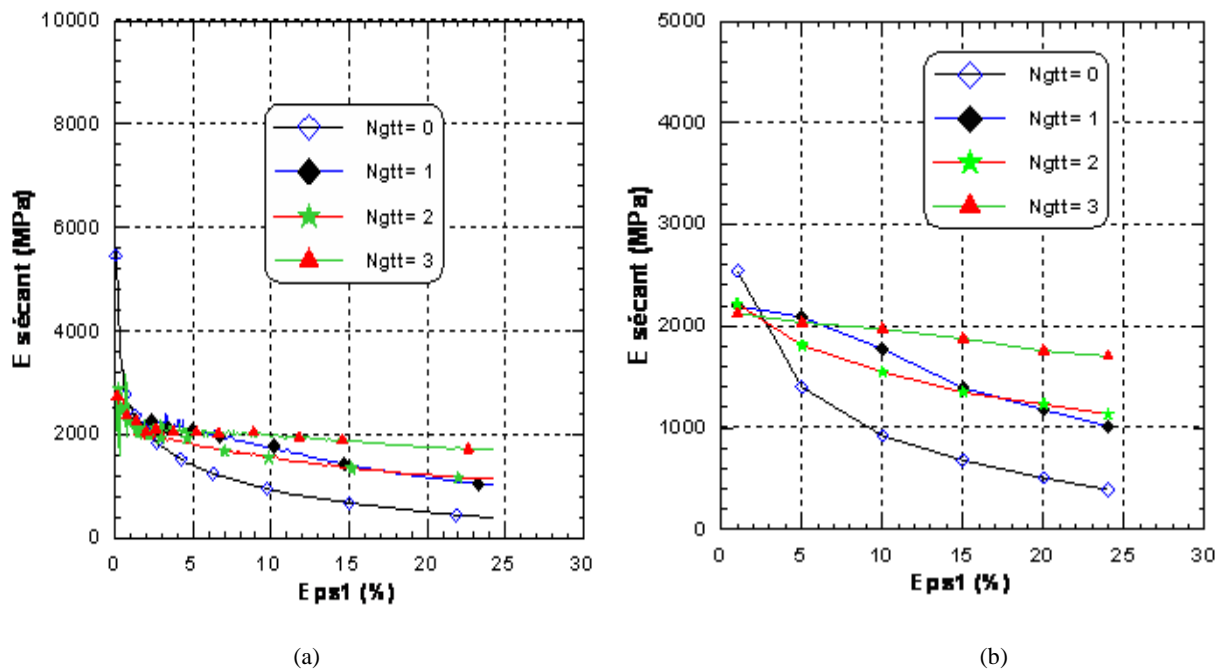


Figure 11: Influence du renforcement par des géotextiles tissés sur le module sécant.

5. Conclusion

Les essais monotones ont montré que l'augmentation du nombre d'inclusions de renforcement affecte d'une manière considérable la résistance du sol. Cette augmentation est très significative pour le sol renforcé par du géotextile. Dans l'ensemble cette augmentation se traduit d'abord par une amplification de la phase de contractance jusqu'à la fin du cisaillement et par conséquent une augmentation de la pression interstitielle. Ce phénomène résulte du rôle de la bonne adhérence entre le sol et le géotextile. Le module sécant augmente avec l'augmentation du nombre d'inclusions puis se stabilise.

6. Référence Bibliographique

- Al-Omari R., Al-Dobaissi H., Nazhat N., Al-Wadood B.A, *Shear strength of geomesh reinforced clay*, Geotextiles and Geomembranes 8 (4), 325–336, 1989
- Athanasopoulos G.A., *Results of direct test on geotextile reinforced cohesive soil*, Geotextiles and Geomembranes 14, 619–644, 1996.
- Boominathan A., Hari S., *Liquefaction strength of fly ash reinforced with randomly distributed fibers*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.22, 1027-1033, 2002
- Fabian K.J., Fourie A.B., *Performance of geotextile reinforced clay samples in undrained triaxial test*, Geotextiles and Geomembranes 4 (1), 53–63, 1986
- Fourie A.B., Fabian K.J., *Laboratory determination of clay geotextile interaction*, Geotextiles and Geomembranes 6 (4), 275–294, 1987.
- Houston S.L., Perez-Garcia N., Houston W.N., *Shear strength and shearinduced volume change behavior of unsaturated soils from a triaxial test program*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 134 (11), 1619–1632, 2008.
- Indraratna B., Satkunaseelan K.S., Rasul M.G., *Laboratory properties of a soft marine clay reinforced with woven and non woven geotextiles*, Geotechnical Testing Journal, ASTM 14 (3), 288–295, 1991.
- Ingold T.S., *Reinforced clay subject to undrained triaxial loading*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 109 (5), 738–744, 1983.
- Ingold T.S., Miller K.S., *The performance of impermeable and permeable reinforcement in clay subject to undrained loading*, Quarterly Journal of Engineering Geology 15, 201–208, 1982.
- Ingold T.S., Miller K.S., *Drained axi-symmetirc loading of reinforced clay*, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE 109 (7), 883–898, 1983.
- Kim Y.T., Kim H.J., Lee G.H., *Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net*, Geotextiles and Geomembranes 26 (6), 512–518, 2008.
- Kolias S., Kasselouri-Rigopoulou V., Karahalios A., *Stabilization of clayey Soils with high calcium fly ash and cement*, Cement and Concrete Composites 27 (2), 301–313, 2005.
- Krishnaswamy N.R., Srinivasula Reddy, *Behavior of reinforced earth under triaxial compression*, In: Proceeding of the First Indian Geotextiles Conference on Reinforced Soil and Geotextiles, 1988.
- Lekha K.R., Kavitha V., *Coir geotextile reinforced clay dykes for drainage of low-lying areas*, Geotextiles and Geomembranes 24 (1), 38–51, 2006.
- Li G., Lun Z., *Experimental study on fiber-reinforced cohesive soil*, Journal of Hydraulic Engineering 6, 31–36, 1995.
- Ling H.I., Tatsuoka F., *Laboratory evaluation of a non woven geotextile for reinforcing on-site soi.*, Proceedings of Geosynthetics 93 (2), 533–546, 1993.
- Lade P.V., Duncan J.M., *Cubical triaxial tests on cohesionless soil*, Journal Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 99 (SM10), 3–812, 1973.
- Miura N., Sakai A., Taesiri Y., Yamanouchi T., Yasuhara K., *Polymer grid reinforced pavement on soft clay grounds*, Geotextiles and Geomembranes 9 (2), 99–123, 1990.
- Noorzad R., Mirmoradi S.H., *Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay*, Geotextiles and Geomembranes 28, 386–392, 2010.
- Prashant A., Penumadu D., *Effect of microfabric on mechanical behavior of kaolin clay using cubical true triaxial testing*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 133 (4), 433–444, 2007.
- Sachan A., Penumadu D., *Effect of microfabric on shear behavior of kaolin clay*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 133 (3), 306–318, 2007.

- Srivastava R.K., Jalota A.V., Pankaj Kumar, *Strength and deformation behaviour of geotextile reinforced alluvial silt*, In: Proceeding of the First Indian Geotextiles Conference on Reinforced Soil and Geotextiles, 1988.
- Subaida E.A., Chandrakaran S., Sankar N., *Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextiles*, Geotextiles and Geomembranes 27, 204–210, 2009.
- Tang C., Shi T., Gao W., Chen F., Cai Y., *Strength and mechanical behavior of polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil*, Geotextiles and Geomembranes 25 (3), 194–202, 2007.
- Unnikrishnan N., Rajagopal K., Krishnaswamy N.R., *Behavior of reinforced clay under monotonic and cyclic loading*, Geotextiles and Geomembranes 20, 117–133, 2002.
- Vercueil D., Billet P., *Study of the liquefaction resistance of saturated sand reinforced with geosynthetics*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.16, 417-425, 1997
- Wang G.-H., Sassa K., Fukuoka H., Tada T., *Experimental study on the shearing behavior of saturated silty soils based on ring-shear tests*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 133 (3), 319–333, 2007