

EFFET DE FIBRE DE VERRE SUR LA REPONSE STATIQUE NON DRAINEE DE SABLE DE CHLEF (ALGERIE DU NORD)

GLASS FIBER EFFECT ON THE UNDRAINED STATIC RESPONSE OF CHLEF SAND (NORTHERN ALGERIA)

Leyla BOUARICHA ¹, Ahmed DJAFAR HENNI ², Laurent LANCELOT ³,

¹ *Laboratoire de Science Matériaux et Environnement, Université Chlef, Algérie.*

² *Laboratoire de Structures, Géotechnique et Risques, Université Chlef, Algérie.*

³ *Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement (LGCgE) Université Lille1, France.*

RÉSUMÉ – Dans cette étude, une série de 24 essais triaxiaux consolidés non drainés (CU) a été effectuée sur des échantillons de sable de Chlef renforcés et non renforcés par fibres de verre, pour deux densités relatives et trois pressions de confinement. Les résultats ont montré que la présence de fibres contribuait à l'amélioration de la résistance à la liquéfaction du sable testé.

ABSTRACT – In this study, a series of 24 undrained consolidated triaxial tests (CU) were conducted on unreinforced and reinforced Chlef sand with glass fiber reconstituted at two relative densities and subjected to three confining pressures. The results showed that the presence of fibers contributed to the improvement of the resistance of tested sand to liquefaction.

1. Introduction

Le Nord de l'Algérie est fondé sur des structures géologiques instables et affecté par des mouvements sismiques engendrant des dommages majeurs à des infrastructures stratégiques. Le phénomène de liquéfaction des sables fins saturés est un aspect important du comportement du sol support de ces infrastructures. Cette communication porte sur l'étude de l'amélioration et du renforcement des sols vis à vis de la liquéfaction. Ainsi, l'ajout de fibres à une masse de est une méthode simple et assez similaire à l'ajout d'autres matériaux tels que le ciment et la chaux, en comparaison avec les autres matériaux de renforcement conventionnels (géocell, géotextile, géogrille, etc.). Le renforcement des sols a été largement étudié (par exemple Maher et Ho 1993, Santoni et al. 2001, Bouaricha et al. 2017). Le comportement à la liquéfaction des sols renforcés par fibres réparties de façons aléatoire a été exploré ces dernières années afin d'évaluer l'utilité d'un renfort fibreux comme nouvelle technique envisageable dans la réduction du potentiel de liquéfaction des sols. Certains résultats présentés dans la littérature sur le comportement à la liquéfaction statique obtenus sur des sables renforcés par des fibres, à partir d'essais triaxiaux drainés et non drainés, ont confirmé l'efficacité du renforcement par fibre sur l'amélioration de la résistance du sol à la liquéfaction (Diambra et al. 2011, Chen et al. 2014). Dans des conditions de chargement cyclique, de nombreux chercheurs ont étudié le comportement des sols renforcés par des fibres réparties de façon aléatoire (Noorzad et Fardad Amini 2014, Eskisar et al. 2015).

Le renforcement des sols par fibres de verre est particulièrement intéressant compte tenu de sa non-biodégradabilité environnementale, sa forte résistance à la traction, son moindre coût et sa disponibilité locale (Maher and Gray 1990, Mujah et al. 2013). A partir d'essais triaxiaux réalisés sur deux sables uniformes, Al-Refeai (1991) a noté que l'inclusion de fibres de verre nécessitait une pression de confinement plus élevée afin d'éviter la rupture d'adhérence quel que soit le type de sable. Il a observé une

augmentation à la fois de la contrainte principale majeure et du module sécant avec l'augmentation de la longueur de la fibre. Le renforcement par fibres de verre a également été étudié en combinaison avec l'ajout de ciment (Consoli et al. 1998). La résistance à la compression triaxiale et la résistance à la traction du sable cimenté renforcé de fibres de verre étaient plus nettes avec des teneurs en fibres plus élevées et des fibres plus longues (Maher et Ho 1993). L'angle de frottement, la cohésion, l'indice de fragilité et la capacité d'absorption d'énergie du sable cimenté ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en fibres et de la longueur de ces fibres.

Dans la région de Chlef (Algérie), compte tenu de la forte sismicité régionale et de sa périodicité (séismes de 1934, 1954 et 1980), plusieurs travaux publiés dans la littérature ont été consacrés au phénomène de liquéfaction des sables locaux, associant des essais réalisés au triaxial en condition drainée et non drainée sous chargement monotone et cyclique. Cependant, on note qu'aucune étude n'a été rapportée sur l'effet des inclusions de fibres de verre sur la réponse à la liquéfaction statique des sables saturés. L'objectif principal de cette étude est d'investiguer le comportement à la liquéfaction d'un sable de Chlef, renforcé et non renforcé par des fibres de verre. Les travaux menés à cet effet permettent d'assurer une continuité avec différents travaux menés antérieurement sur les phénomènes de liquéfaction mesurés à l'essai triaxial en condition monotone non drainée sur ce sable.

2. Programme expérimental

2.1. Matériaux

Tous les essais de la présente étude ont été réalisés sur des échantillons de sable provenant de la vallée de Chlef (Algérie). La fibre de verre a été obtenue auprès de la Société des Produits Nationaux en Plastique et Caoutchouc de Chlef (Algérie). Les caractéristiques essentielles de cette fibre de verre sont regroupées dans le tableau 1. Le sable de Chlef est un sable moyen, à grain arrondi avec une taille moyenne $D_{50} = 0,452$ mm. La courbe de distribution granulométrique et une vue au microscope électronique à balayage (MEB) sont représentées sur la figure 1. Les principales caractéristiques de ce sable sont résumées dans le tableau 2.

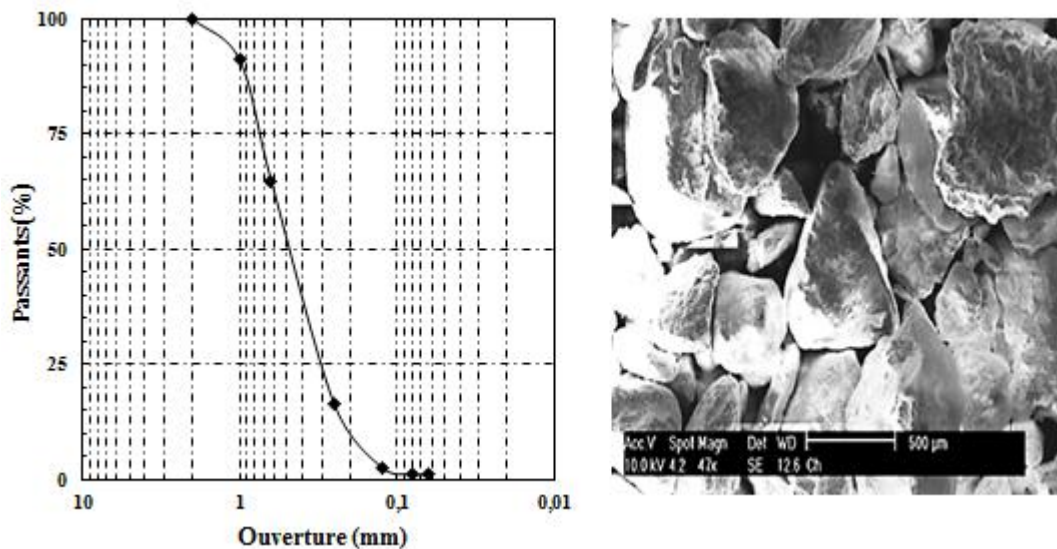


Figure 1: Courbe de distribution granulométrique et Vue au microscope électronique à balayage (MEB) de sable de Chlef.

Tableau 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres de verre.

Nom	Unité	E-verre
Couleur	/	Blanc
Largeur	(mm)	0.12
Épaisseur (D)	(mm)	0.013
Densité spécifique (G_s)	/	2.62
Poids spécifique des fibres	(g/m ²)	300
Résistance à la traction (T)	(N)	2500
le coefficient de Poisson (ν)	/	0.35
Module de cisaillement (G)	(GPa)	29.2

Tableau 2 : Caractéristiques physiques de sable utilisé.

D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	C _u (-)	C _c (-)	γ_s (kN/m ³)	e_{min} (-)	e_{max} (-)	Forme
0,452	0,181	3,029	1.26	27,17	0.58	0.98	Arrondie

2.2. Préparation des échantillons et mode opératoire

Les mélanges ont été préparés selon la technique de Ladd (1978) à différentes densités et pour un pourcentage en fibres variant entre 0% et 0,6%. Ainsi le poids de chaque mélange est calculé selon l'état de densité considéré ($D_r = 25\%$ pour l'état lâche et $D_r = 50\%$ pour l'état moyennement dense), la concentration moyenne de fibres incluses dans les mélanges étant déterminée par la relation suivante :

$$w_f = \frac{W_f}{W_s} \times 100\% \quad (1)$$

Où W_f est le poids des fibres et W_s est le poids du sable sec.

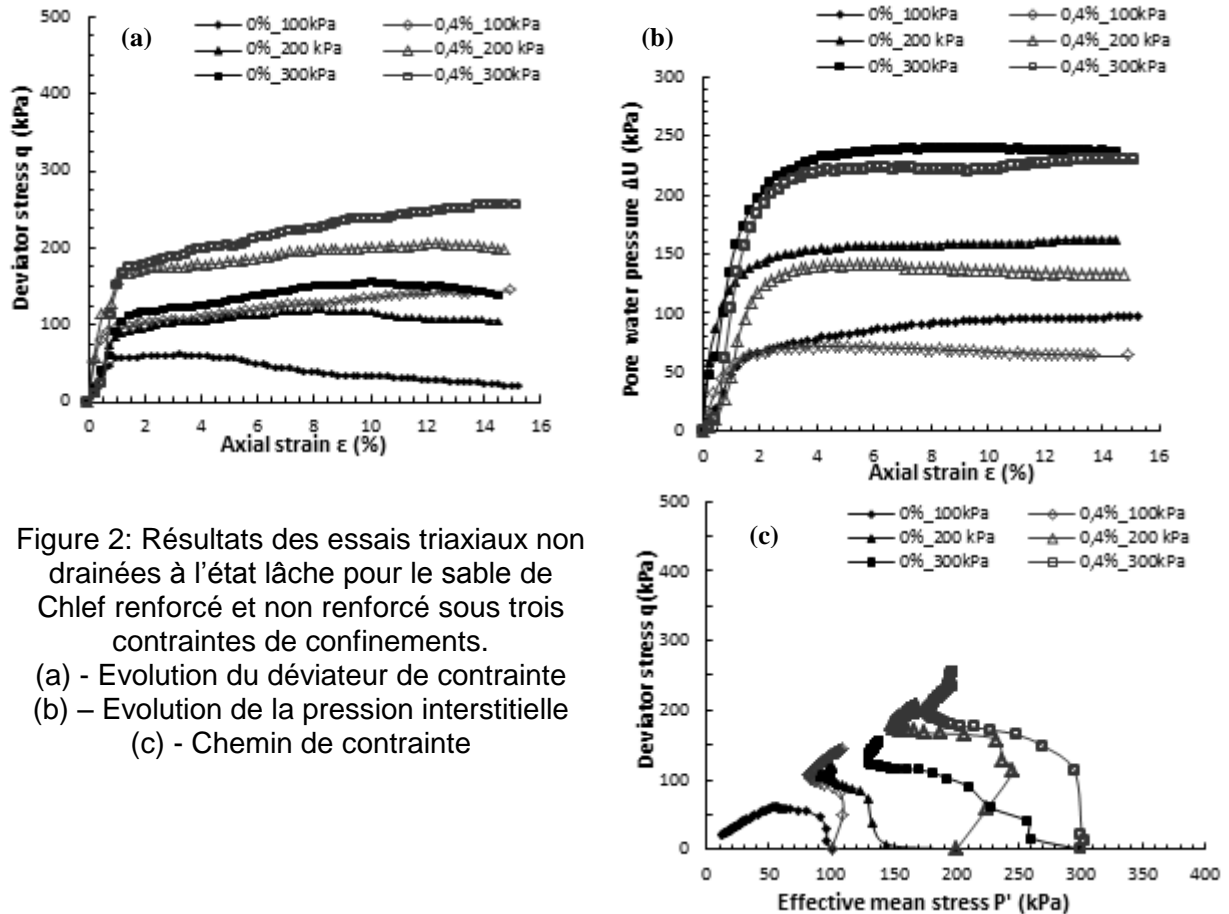
Les fibres, préparées et coupées en morceaux de 15mm, ont été mélangées manuellement au le sable de manière aléatoire jusqu'à ce que toutes les fibres soient réparties uniformément dans le sable. Pour préparer les échantillons triaxiaux on a utilisé la méthode de déposition à sec qui permet de verser les mélanges à partir d'un cône dans le moule de 50 mm de diamètre et 100mm de hauteur en respectant l'état de densité fixé. Pour s'assurer de la bonne saturation de nos échantillons, les valeurs du coefficient de Skempton B ont toutes été mesurées supérieures à 0,97. Ces échantillons ont été consolidés isotropiquement à trois niveaux de contraintes moyennes (100, 200 et 300kPa) puis soumis à une charge triaxiale de compression monotone non drainée avec une vitesse de déformation constante (500 microns/min).

3. Résultats des essais triaxial de compression monotone non drainé

3.1. Effet de la teneur en fibre et de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction

Les variations du déviateur q et de la pression interstitielle Δu , ainsi que les chemins de contraintes effectives pour le sable de Chlef, renforcé de 0,4% de fibre et non renforcé, soumis à trois pressions de confinement pour l'état lâche et moyennement dense sont présentées sur les figures 2 et 3. A l'état lâche (figure 2), on peut constater que les échantillons non renforcés présentent un relâchement de la résistance au-delà de 1%, confirmé par le comportement contractant observé dans les courbes de pression interstitielle (figure 2.b). Cependant les échantillons renforcés présentent un pic de

résistance pour une déformation axiale inférieure à 0,5%. La liquéfaction est observée pour les échantillons de sable non renforcé sous une pression de confinement de 100 kPa. La figure 2.c montre l'évolution du déviateur q en fonction de la contrainte moyenne effective p' pour le sable de Chlef renforcé et non renforcé sous trois contraintes de confinements. Les échantillons renforcés montrent des tendances dilatantes à des pressions latérales de 100, 200 et 300 kPa, tandis que les échantillons non renforcés paraissent plutôt vulnérables pour ces mêmes pressions et présentent des effondrements comme l'atteste la figure 4.a. Le sable lâche non renforcé (figure 4.a) montre un effondrement de sa structure et se liquéfie.



Pour une densité moyenne (figure 3), on constate une nette amélioration de la résistance au cisaillement du sable renforcé comparativement à ce qui est observé dans la figure 2.

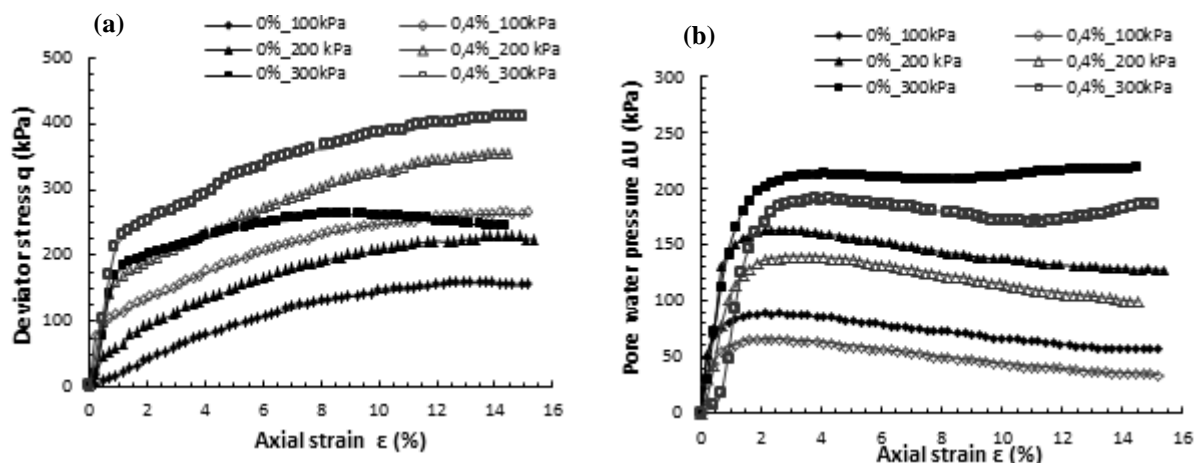
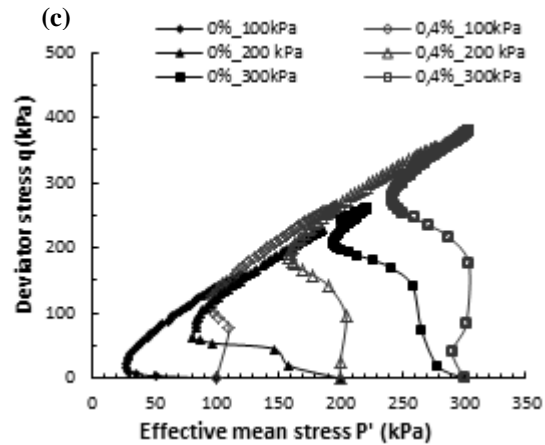


Figure 3: Résultats des essais triaxiaux non drainés à l'état moyennement dense pour le sable de Chlef renforcé et non renforcé sous trois contraintes de confinements.
 (a) - Evolution du déviateur de contrainte
 (b) – Evolution de la pression interstitielle
 (c) - Chemin de contrainte.



La différence de comportement est observée à partir d'une déformation axiale de 1% où les sols non renforcés montrent un déviateur décroissant, se stabilisant à 200 kPa lorsqu'il est soumis à une pression de confinement de 300 kPa. La valeur maximale du déviateur enregistrée pour le sable renforcé à 0,4% de fibre est 408 kPa pour une pression de confinement de 300kPa. A une pression de confinement donnée, les contraintes moyennes effectives diminuent lors du cisaillement, ce qui correspond à une pression interstitielle élevée, affaiblissant l'échantillon. Pour les sols renforcés, le cas est inverse où on constate une faible contractance suivi d'une forte dilatance (figure 3.c). Les résultats obtenus semblent en concordance avec ceux obtenus par Chen et Loehr (2008) sur des échantillons de sable d'Ottawa renforcé à 0,4% de fibre de polypropylène à l'état lâche et moyennement dense.

On constate figure 4.b que l'échantillon moyennement dense renforcé est resté plus rigide relativement à l'échantillon non renforcé. La distribution des fibres dans la masse de sol a limité et même empêché l'apparition du phénomène de liquéfaction. Des observations sont obtenues par Liu et al. (2011).

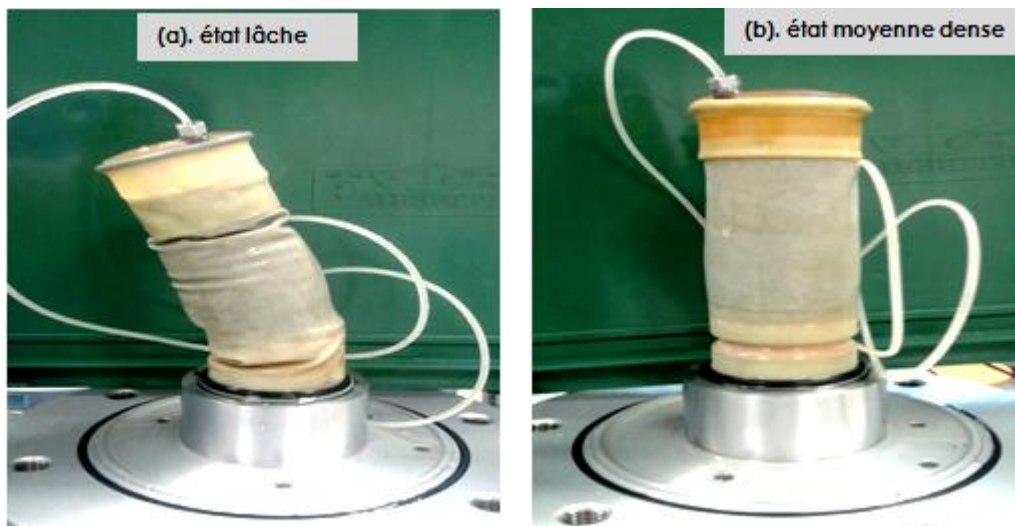


Figure 4: Deux photos d'échantillons renforcé et non renforcé après cisaillement
 (a) Non renforcé; (b) renforcé à 0.4% de fibre.

3.2. Effet de fibre sur les paramètres de résistance au cisaillement

Les variations de la cohésion et l'angle de frottement interne en fonction de la teneur en fibres sont présentées dans la figure 5 pour les deux densités relatives. Les résultats montrent une augmentation significative de ces paramètres avec l'augmentation de la teneur en fibres, à l'état lâche et moyennement dense. Ainsi, la valeur de la cohésion peut passer de 8 kPa pour un sable non renforcé à 26 kPa pour un sable renforcé avec 0,2% de fibres (figure 5.a). De même, l'angle de frottement interne ϕ montre une augmentation significative avec le taux de fibres, que ce soit à l'état lâche ou moyennement dense : par exemple, il passe de 28° pour sable non renforcé à 35° pour un sable renforcé de 0,4% de fibres à l'état moyennement dense (figure 5.b)

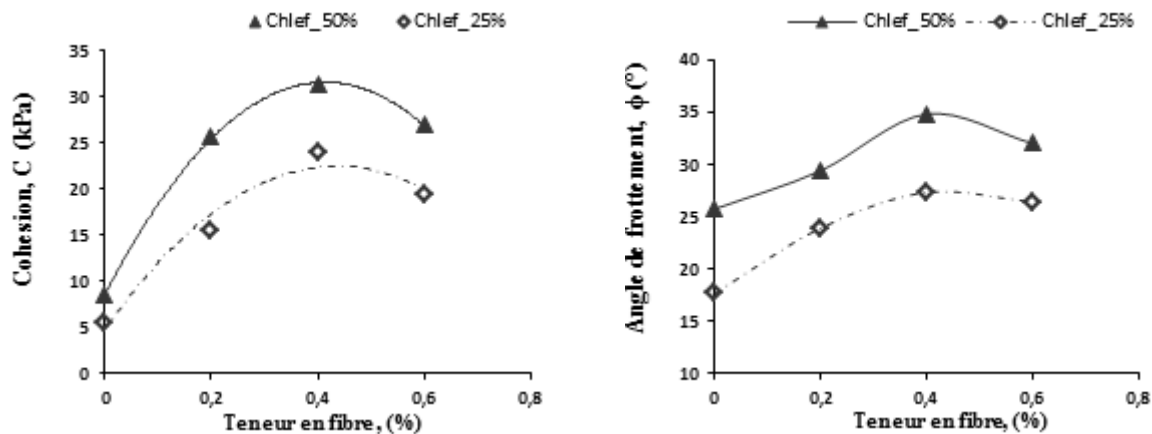


Figure 5: Effet de la teneur en fibre de verre sur la cohésion (a) et l'angle de frottement (b).

La figure 6 montre l'évolution des modules sécants calculés pour une déformation axiale de 0,15% en fonction de la teneur en fibres pour les deux densités relatives. A l'état lâche (figure 6.a), le module sécant passe de 24 MPa pour un sable non renforcé à 43 MPa pour un sable renforcé à 0,4% de fibres, taux pour lequel la rigidité est maximale. Pour l'état moyennement dense (figure 6.b), l'augmentation moyenne du module sécant pour une teneur de fibre 0,2% est de l'ordre de 50%, et jusqu'à 96% un sol renforcé avec 0,4% à 0,6% de fibres. Les mêmes observations ont été faites par Nouri et al. (2016), sur le sable de Chlef renforcé par des nappes de polymère.

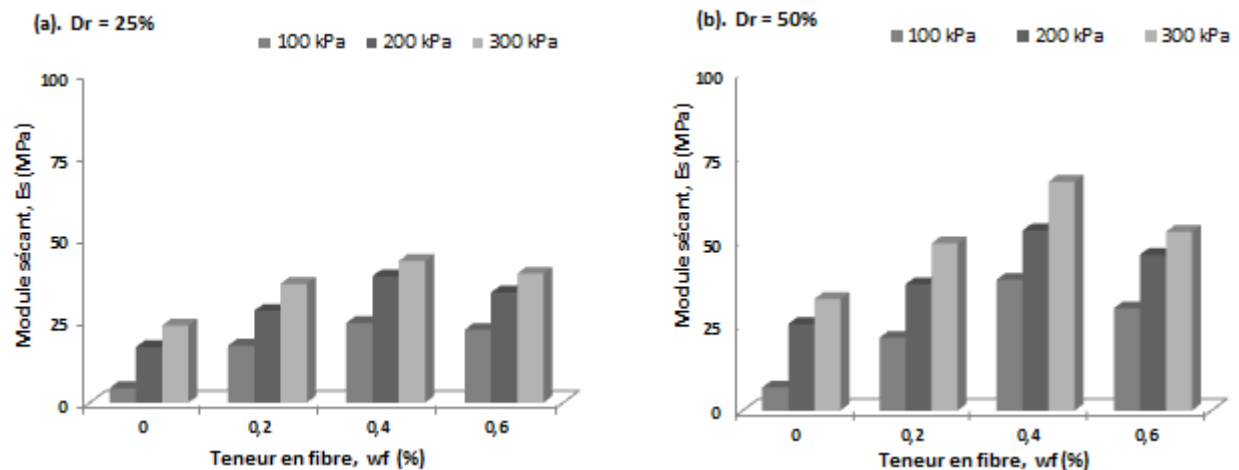


Figure 6: Effet de la teneur en fibres sur le module de déformation sécante à 0.15% de déformation axiale pour le sable de Chlef à: (a). Etat lâche et (b). Etat moyennement dense.

3.3. Rapport de résistance au cisaillement maximale

Dans le but d'évaluer l'effet du renforcement sur la résistance au cisaillement non drainée de sable étudié, on introduit dans cette section le rapport de résistance au cisaillement maximale (R_f) similaire au paramètre défini par Chen et al. (2014), donné par la relation suivante:

$$R_f = q_f^R / q_f \quad (2)$$

Où $q_f^R = (\sigma'_1 - \sigma'_3)_f^R$ est le déviateur du sol renforcé et $q_f = (\sigma'_1 - \sigma'_3)_f$ le déviateur du sol non renforcé à la rupture. Dans la figure 7 nous avons reporté la variation du rapport de résistance au cisaillement maximale en fonction de la pression de confinement. Ce rapport de résistance au cisaillement maximale du sable renforcé diminue de façon significative avec l'augmentation de la contrainte de confinement. Pour l'état lâche (figure 7.a), les sols renforcé et non renforcé marquent une décroissance du rapport de cisaillement (R_f) pour des contraintes de confinement comprises entre 100 kPa et 200 kPa, puis se stabilisent entre 200 kPa et 300 kPa. Pour l'état moyennement dense (figure 7.b), le rapport de cisaillement R_f décroît entre 100kPa et 200 kPa, enregistrant une valeur maximale R_f de 1,7 (sable renforcé de 0,4%). Au-delà de 200 kPa, on observe une augmentation assez progressive, avec une valeur maximale R_f de 1,6, (sable renforcé avec 0,4% de fibres).

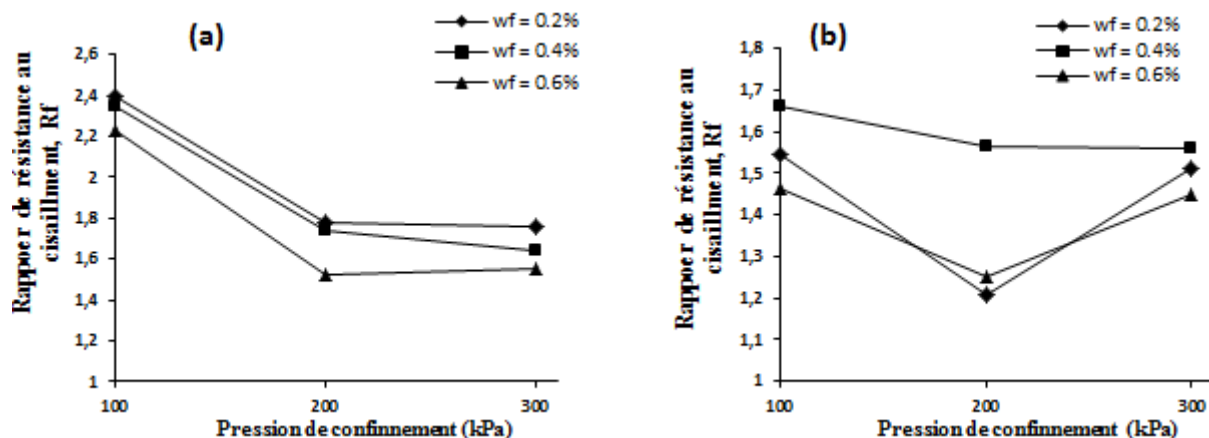


Figure 7: Rapports de résistance au cisaillement (R_f) versus contrainte normale pour différentes teneurs en fibres: (a). Etat lâche et (b). Etat moyennement dense.

4. Conclusion

Considérant l'effet de la teneur en fibres et de la densité sur le comportement à la liquéfaction statique du sable de Chlef, nous avons établi les principaux résultats suivants:

1. La présence de fibres affecte nettement le comportement non drainé du sable de Chlef. Pour les échantillons renforcés moyennement denses, la stabilité structurelle après cisaillement est maintenue, alors que l'échantillon non renforcé a montré une structure partiellement effondrée.
2. Les valeurs de la cohésion (C'), de l'angle de frottement interne (ϕ') et du module sécant augmentent avec l'augmentation du pourcentage de fibres jusqu'à un maximum pour un taux de 0,4 % de fibres.

3. Les résultats de cette étude indiquent que le renforcement par des fibres de verre est utile pour améliorer la résistance à la liquéfaction statique du sable et que la densité du sable et la teneur en fibres doivent être prises en compte dans les applications pratiques (domaines routier et autoroutier, stabilité des remblais et talus...).

5. Références bibliographiques

- Al-Refeai, T. O. (1991). Behavior of Granular Soils Reinforced with Discrete Randomly Oriented Inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, vol.10,n°4, pp.319–333.
- Bouaricha, L., Djafer Henni, A., and Lancelot, L. (2017). A laboratory investigation on shear strength behavior of sandy soil: Effect of Glass fiber and Clinker residue content. *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. 39, n°4, pp. 462-471.
- Chen, C. W., and Loehr, J. E. (2008). Undrained and drained triaxial tests of fiber-reinforced sand. *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 114-120.
- Chen, X., Zhang, J., and Li, Z. (2014). Shear behaviour of a geogrid-reinforced coarse-grained soil based on large-scale triaxial tests. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 42, n°4, pp. 312-328.
- Consoli, N. C., Prietto P. D. M., and Ulbrich, L. A. (1998). Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, n°12, pp.1211–1214.
- Diambra, A., Ibraim, E., Russell, A. R., and Wood, D. M. (2011). Modelling the undrained response of fibre reinforced sands. *Soils and foundations*, vol. 51, n°4, pp. 625-636.
- Eskisar, T., Altun, S., and Karakan, E. (2015). Assessment of liquefaction behavior of Izmir sand reinforced with randomly distributed fibers, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, New Zealand.
- Ladd, R. S., (1978). Specimen Preparation Using Undercompaction. *Geotechnical testing Journal*, 1(1), 16-23.
- Liu, J., Wang, G., Kamai, T., Zhang, F., Yang, J., and Shi, B. (2011). Static liquefaction behavior of saturated fiber-reinforced sand in undrained ring-shear tests. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 29 n°5, pp. 462-471.
- Lovisa, J., S. K. Shukla, and N. Sivakugan. 2010. "Shear Strength of Randomly Distributed Moist Fibre-Reinforced Sand." *Geosynthetics International* , vol.17 n° 2, pp. 100–106.
- Maher, M. H., and D. H. Gray. 1990. "Static Response of Sands Reinforced with Randomly Distributed Fibers." *Journal of Geotechnical Engineering*, vol.116 n° 11, pp.1661–1677.
- Maher, M. H., and Ho, Y. C. (1993). Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads.
- Maher, M. H., and Y. C. Ho. 1993. "Behaviour of Fibre-Reinforced Cemented Sand under Static and Cyclic Loads." *Geotechnical Testing Journal*, vol.16 n° 3, pp.330–338.
- Mujah, D., F. Ahmad, H. Hazarika, and A. Safari. 2013. "Evaluation of the Mechanical Properties of Recycled Glass Fibers-Derived Three Dimensional Geomaterial for Ground Improvement." *Journal of Cleaner Production*, vol.52, pp.495–503.
- Noorzad, R., and Amini, P. F. (2014). Liquefaction resistance of Babolsar sand reinforced with randomly distributed fibers under cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 66, pp. 281-292.
- Nouri, S., Nechnech, A., Lamri, B., and Lopes, M. L. (2016). Triaxial test of drained sand reinforced with plastic layers. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 9 n°1, pp. 53.
- Santoni, R. L., Tingle, J. S., and Webster, S. L. (2001). Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 127 n°3, pp. 258-268.