

ETUDE EN LABORATOIRE DE LA REDUCTION DU RISQUE DE LIQUEFACTION DE LA VILLE DE CHLEF

ARAB Ahmed¹, BELKHATIR Mostéfa¹, SHAHROUR Isam², BRAHIM Aek¹

¹ Maître de Conférences, Laboratoire des Sciences de Matériaux et Environnement, Université de Chlef

² Professeur Laboratoire de Génie Civil et GéoEnvironnement Lille1, France

RESUME : Cet article décrit le phénomène de liquéfaction, le processus et les méthodes d'évaluation de ce risque. Les techniques utilisés pour l'amélioration de la résistance à la liquéfaction sont comparés, notamment en agissant sur les paramètres indice des vides et drainage. En plus une étude en laboratoire de la micro-zonation de la ville de Chlef comportant des essais en laboratoire sur des chemins drainés et non drainés ont été réalisés à l'appareil triaxial sur le sol de Chlef. Les résultats montrent que la résistance à la liquéfaction est très influencée par la présence des fines, la résistance à la liquéfaction diminue avec l'augmentation de la fraction des fines. L'étude du renforcement du sol de Chlef par augmentation de la densité relative, inclusions de nappes de géotextiles, colonnes ballastés et micro-pieux de sable compacté montre une amélioration et stabilisation très significative de la résistance à la liquéfaction par rapport au sol vierge.

MOTS-CLEFS : Liquéfaction, sable, drainage, indice des vides, géotextiles, colonnes ballastés.

1. Introduction

Des sols constitués d'un mélange sable-argile ou sable-limon sont fréquemment rencontrés. Les projets d'aménagement et de construction sur ce type de sols nécessitent une bonne connaissance de leur comportement mécanique. Actuellement la prévention des risques naturels ou industriels fait partie intégrante des préoccupations des pouvoirs publics en matière d'aménagement du territoire. La prise en compte de l'aléa sismique témoigne de cette préoccupation. Le risque de liquéfaction prend une part grandissante dans les projets d'aménagement du territoire et de construction. Il semblerait que Hazen ait été le premier à utiliser le terme de liquéfaction pour décrire et expliquer le mode de rupture du barrage Calaveras en 1918 en Californie, où 700 000 m³ de sol constituant le pied amont du barrage ont été emportés sur une distance de 100 m sans aucune cause apparente. Hazen a expliqué ce phénomène par une concentration de pressions induite par un mouvement ou une déformation dans le matériau. Lorsque ceci se produit rapidement, l'eau contenue entre les pores est mise sous pression. L'augmentation continue de cette pression interstitielle conduit à une diminution des forces intergranulaires dans le sol, et le matériau perd toute sa résistance lorsque la pression interstitielle devient égale à la contrainte effective initiale. Plusieurs cas de glissements de terrains, de ruptures de barrages, de digues, de structures en terre, parmi d'autres, ont été attribués à la liquéfaction. Tous ces phénomènes, concernant le comportement non drainé des sols, présentaient en commun un développement de la pression interstitielle sous l'action d'un chargement statique ou cyclique, dans des milieux non cohérents saturés. Le phénomène de liquéfaction a fait de nombreux dégâts à travers le monde où on observe des basculements et enfoncements de bâtiments (fig.1.) cas du séisme de Niigata (1964), glissements de terrain (fig.2. Chlef 1980), destruction de pont suite à l'enfoncement des culés lors du séisme de Kobé (1995).

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la liquéfaction des mélanges sable – sols fins. Les résultats montrent qu'en fonction de la plasticité et du type des sols étudiés, l'augmentation de la fraction des fines peut conduire à une augmentation de la résistance à la liquéfaction de ces sols (Amini et Qi 2000), où une diminution de cette résistance (Shen et al. 1997 ; Troncoso at Verdugo 1985 ; Finn et al. 1994 ; Vaid 1994 ; Zlatovic at Ishihara 1997). D'autres études ont montré que la résistance à la liquéfaction diminue avec l'augmentation de la teneur en fine jusqu'à atteindre une résistance minimale puis, le ré-augmente avec la teneur en fines (Law et Ling 1992 ; Koester 1994, Bouferra et Shahrour 2004).



Figure 1. Enfoncement, basculement et renversement des bâtiments lors du séisme de Niigata Japon (1964)



Figure 2. Sliding of the Chlef River banks (El Asnam, 1980)

Parmi les méthodes d'amélioration de la résistance des sites à haut risque de liquéfaction on note ; l'amélioration par compactage dynamique, drainage (fig.3), inclusions de pieux de sable compacté (SCP) (fig.4) et par colonnes ballastées (fig.5) etc....

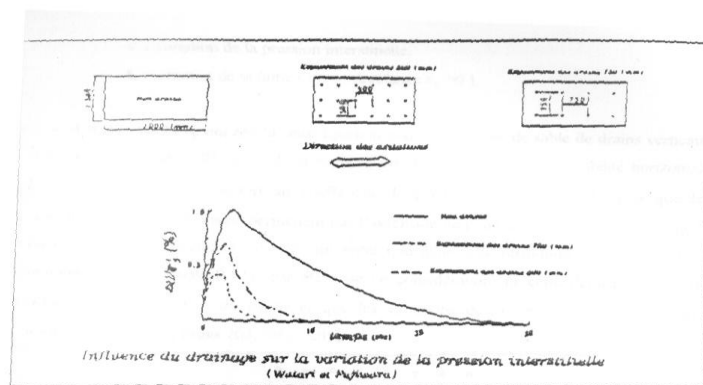


Figure 3. Influence du drainage sur la variation de la pression interstitielle (Watari et Fujiwara, 1977)

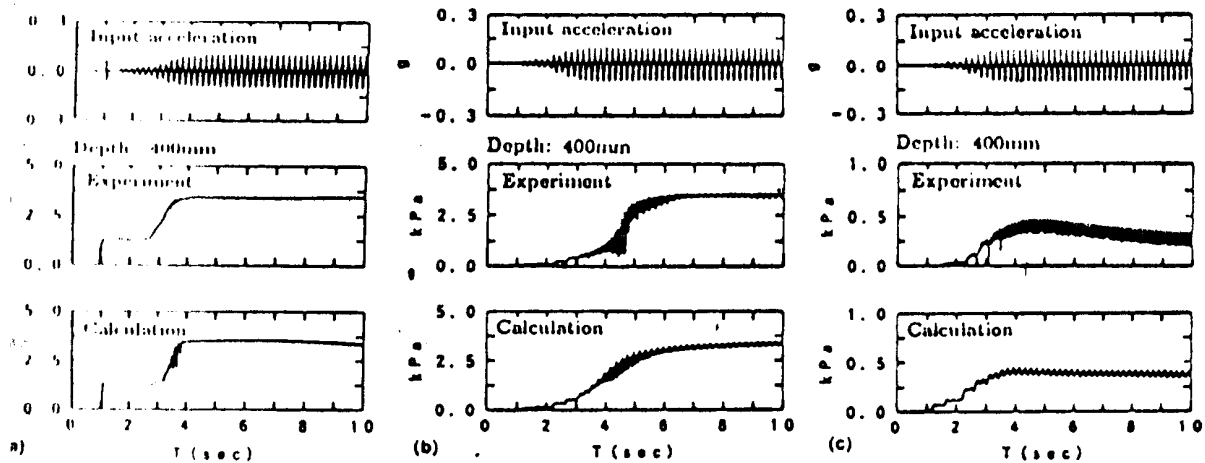


Figure 4. Evolution de la pression interstitielle et de l'accélération en fonction du temps
(Akiyoshi et al. 1993)

Dans cet article, on présente une étude en laboratoire du comportement d'un mélange sable-limon sur des chemins non drainés pour une teneur en fines variante entre 0 et 50%; et le comportement monotone et cyclique du sol renforcé par inclusions de géotextiles et colonnes ballastées. Ces essais permettent de mieux comprendre l'influence de la fraction des fines peu plastiques sur le comportement mécanique de ce mélange et l'influence de la présence d'inclusions sur l'amélioration de la résistance du sol. L'article est composé de deux parties. Dans la première on présente les matériaux utilisés, la seconde donne une analyse des résultats expérimentaux des essais réalisés.

2. Matériaux étudiés

Les essais ont été réalisés sur un mélange du sable de Chlef (Algérie) et du limon de l'Oued de Chlef. Les courbes granulométriques de ces sols sont données dans la figure 1. Le sable de Chlef est un sable moyen, avec un diamètre moyen $D_{50} = 0,61\text{mm}$. Le limon est peu plastique avec un indice de plasticité de 6%. L'étude a été réalisée pour une fraction des fines (F_c) allant jusqu'à 50%. Le tableau 1 et la figure 2 donnent les variations des indices des vides maximal et minimal avec la fraction des fines. On note que ces deux indices diminuent avec l'augmentation de la fraction des fines jusqu'à $F_c = 35\%$ ensuite, ils ré-augmentent avec la fraction des fines. Les essais ont été réalisés à une densité relative $I_d = 50\%$.

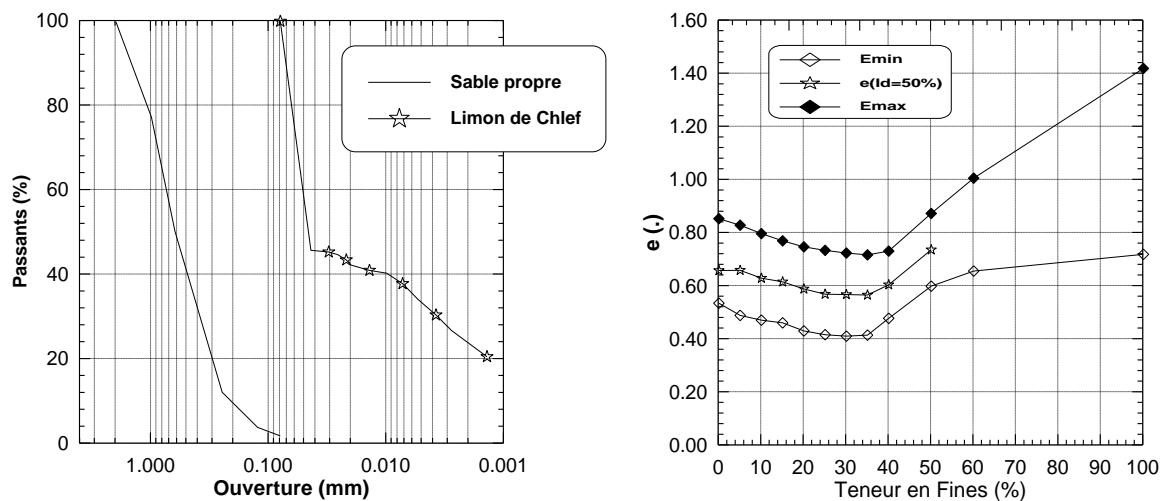


Figure 5 : a - Courbe granulométrique des matériaux utilisés

b - Variation des indices de vide maximal et minimal avec la fraction des fines

Tableau 1. Caractéristiques du mélange sable-argile

Fraction des fines (%)	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	100
e_{\max}	0.854	0.829	0.798	0.770	0.748	0.735	0.718	0.732	0.874	1.007	1.40
e_{\min}	0.535	0.49	0.472	0.462	0.431	0.417	0.412	0.479	0.600	0.657	0.72

3. Résultats des essais réalisés

3.1. Essais de compression drainée

La figure 6 montre les résultats des essais de compression drainée réalisés pour des fractions des fines comprises entre zéro (sable propre) et 50%. On note que la fraction des fines affecte d'une manière sensible les variations du déviateur et de la déformation volumique. L'augmentation de la fraction des fines entre 0 et 50% induit une diminution de la raideur initiale du sol et de la résistance du sol (déviateur maximal). En ce qui concerne la déformation volumique, on note que le sable propre et les échantillons à faible fraction des fines ($F_c < 20\%$) présentent une phase de contractance suivie d'une phase de dilatance. Pour le sable propre et l'échantillon à 5% de fines, la phase de dilatance apparaît à partir de 8% de déformation axiale, tandis que pour les échantillons ayant une teneur en fines de 10% à 30% la dilatance est retardée et apparaît à partir d'une déformation axiale de 13%. Pour les échantillons avec une teneur en fines de 40 et 50%, on observe uniquement une phase de contractance.

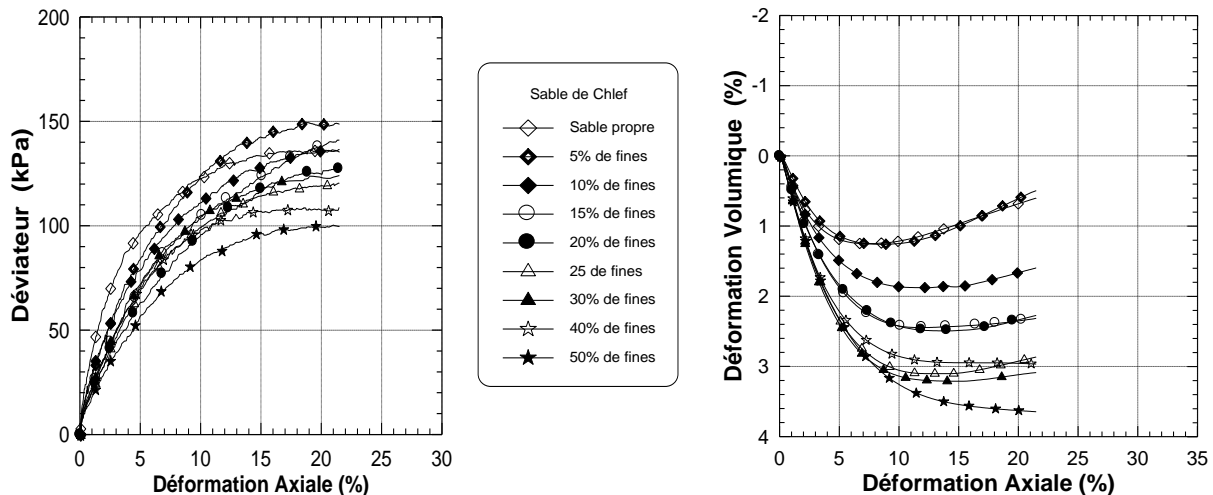


Figure 6 : Influence de la teneur en fines sur la réponse drainée du mélange sable-limon

3.2. Essai de compression non drainée

La figure 7 montre les résultats des essais non drainés réalisés pour différentes valeurs de la fraction des fines (entre 0 et 50%) à une pression de confinement initial de 100kPa. On note que l'augmentation de la fraction des fines conduit à une augmentation de la pression d'eau. Cette augmentation résulte du rôle des fines dans l'augmentation de la contractance du mélange observé sur lors des essais drainés. L'augmentation de la pression interstitielle conduit à une réduction de la contrainte effective de confinement et par conséquent à une réduction de la résistance du mélange au déviateur comme l'illustre la figure 6a. Le chemin de contrainte dans le plan (p' , q) montre bien le rôle de l'augmentation des fines dans la réduction de la pression moyenne effective et du déviateur maximal.

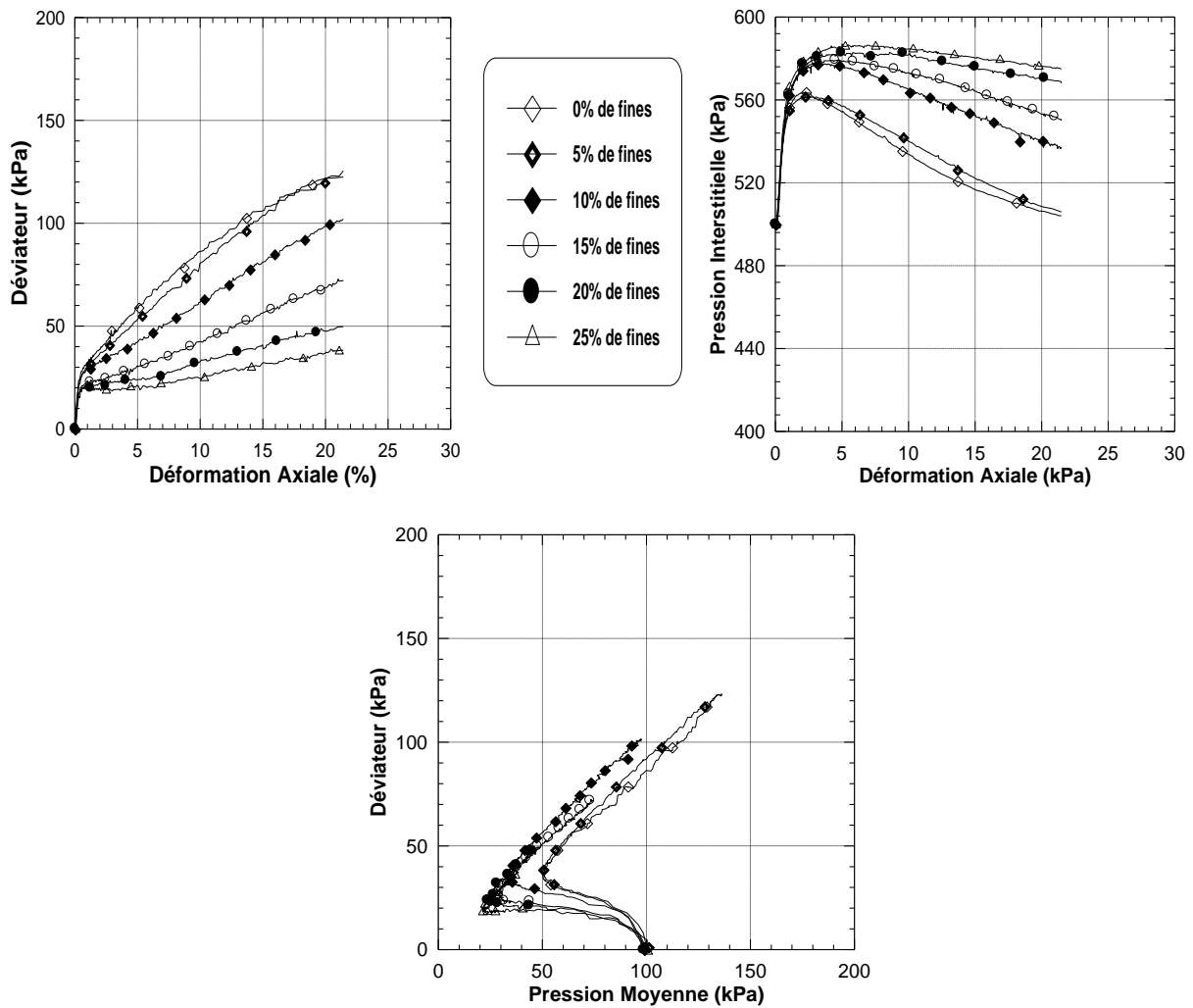


Figure 7 : Influence de la teneur des fines sur le comportement non drainé d'un mélange sable-limon (confinement initial = 100 kPa)

3.3. Essais cycliques

3.3.1. Effet des fines sur le potentiel de liquéfaction

Les figures 8a et 8b montrent la variation du potentiel de liquéfaction et la résistance à la liquéfaction cyclique en fonction du nombre de cycles (RLC) pour des échantillons avec un indice de densité $I_d=0,65$. La résistance à la liquéfaction est définie par le rapport de contrainte cyclique donnant la liquéfaction pour 15 cycles. On remarque que le potentiel de liquéfaction du mélange de sable de Chlef – Limon LC diminue avec l'augmentation de la teneur en fines jusqu'à la teneur en fines $F_c = 40\%$. Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés lors des essais monotones qui ont montré que l'augmentation de la fraction des fines amplifie la phase de contractance. L'amplification de la phase de contractance a pour conséquence la diminution du potentiel de liquéfaction lorsque la teneur en fines F_c augmente.

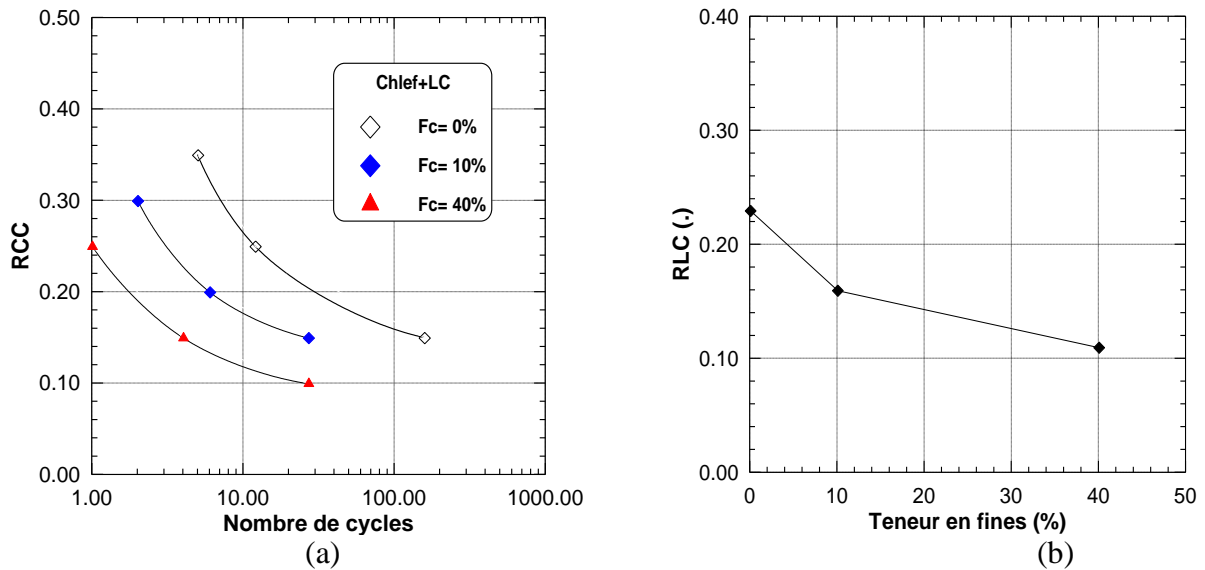


Figure 8 : Influence des fines sur le potentiel de liquéfaction du mélange sable de Chlef-limon LC

3.4. Influence de la densité relative

Des essais cycliques non drainés ont été réalisés sur du sable de Chlef pour trois densités relatives $I_d = 0,15, 0,50$ et $0,65$. Pour chaque densité, nous avons fait varier l'amplitude du chargement afin de construire la courbe du potentiel de liquéfaction. Les essais ont été réalisés pour les amplitudes $q_m = 70, 50$ et 30 kPa. On constate que la liquéfaction s'obtient rapidement pour les fortes amplitudes : après deux cycles pour les chargement à $q_m = 70$ kPa et 50 kPa, alors qu'il faut 22 cycles pour la liquéfaction sous le chargement $q_m = 30$ kPa pour les essais réalisés avec une densité relative $I_d = 0,15$; tandis que pour les mêmes amplitudes de chargement la liquéfaction n'est obtenue qu'après 4, 5 et 80 cycles pour les essais avec une densité relative $I_d = 0,50$. Pour les essais réalisés avec une densité relative $I_d = 0,65$ et pour les mêmes amplitudes de chargement, la liquéfaction n'est obtenue qu'après 5, 12 et 140 cycles.

Les résultats de l'ensemble de ces essais sont résumés sur la figure 9. La figure 9a illustre l'influence de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef. Elle montre clairement que l'augmentation de la densité relative conduit à une augmentation de la résistance à la liquéfaction de ce sable. La figure 9b montre l'influence de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction définie par l'amplitude du chargement induisant la liquéfaction après 15 cycles pour différents types de sable (sable de Chlef, sable d'Hostun RF et le sable de Toyoura d'après Tatsuoka et al., 1986b). Cette figure montre bien que la résistance à la liquéfaction augmente avec l'augmentation de la densité relative et avec la diminution de l'amplitude du chargement. La différence entre la résistance du sable à une densité relative $I_d = 0,50$ et celle pour $I_d = 0,65$ est très importante pour le sable de Chlef.

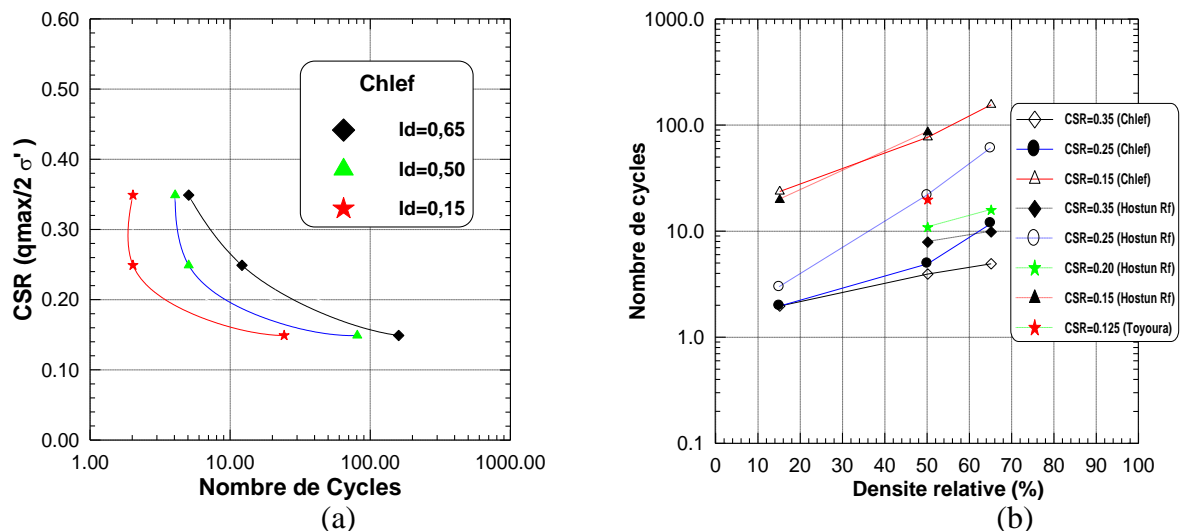


Figure 9 : Effet de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef

3.5. Renforcement par géotextile

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 (fig.10). La figure 10a montre l'évolution du déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale. On constate que le déviateur de contrainte augmente avec l'augmentation du nombre des nappes de géotextile (N_g), aussi on remarque l'absence d'apparition de pic de déviateur. La valeur maximale du déviateur (q_{max}) passe 50 à 240 kPa quand 1 nombre de nappe de géotextile N_g passe de 0 à 3 respectivement (fig.10a). La figure 10b illustre l'évolution de la pression interstitielle en fonction de la déformation axiale. Le sol avec $N_g=3$ génère une plus grande pression interstitielle en comparaison avec $N_g=2$, 1 et 0. Cette génération importante de la pression interstitielle est due à l'augmentation de la contractance lorsque le nombre de géotextiles augmente. La présence de nappes de géotextiles empêche le développement des déformations radiales et par conséquent la dilatance.

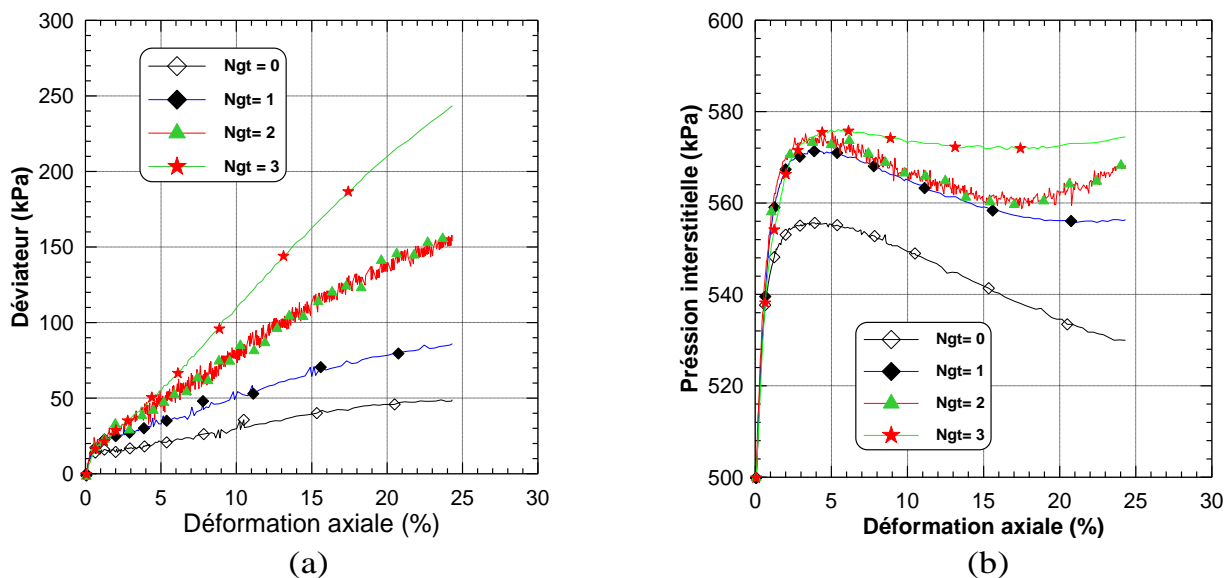


Figure 10: Renforcement de sol par des nappes des géotextiles.

3.6. Renforcement par colonnes ballastées

La figure 4.11 illustre la réponse non drainée d'une série d'essais triaxiaux monotone non drainés qui a été réalisés sur le sol de Chlef avec un seul indice de densité relative $I_d=0,50$ renforcé par des colonnes ballastées. On note que la résistance du sol augmente d'une manière très significative avec l'augmentation du nombre de CBG, et que cette augmentation est inférieure à celle du sol renforcé par le géotextile. L'augmentation du nombre de CBG de 1 à 2 augmente considérablement la résistance, au-delà de 2 cette augmentation a tendance à diminuer d'ampleur. Par contre, l'augmentation du nombre de colonnes ballastées fait réduire la pression interstitielle et par conséquent l'augmentation de la rigidité du sol (fig.4.11b).

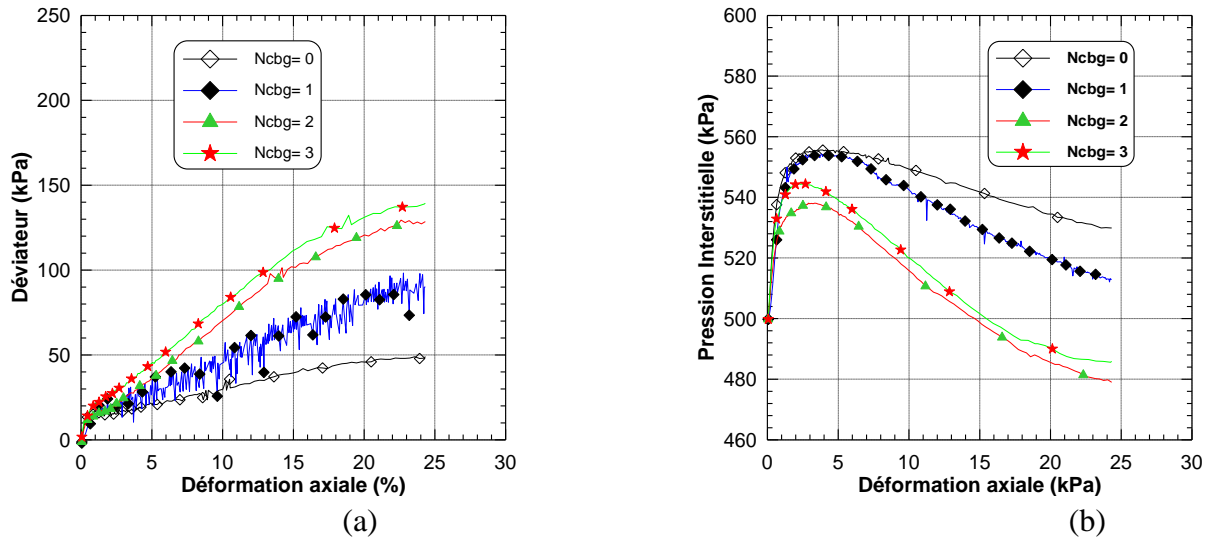


Figure 11. Renforcement de sol par les colonnes ballastées avec géotextiles.

4. Conclusion

Cet article a comporté en premier lieu une présentation de la liquéfaction et des différentes méthodes de stabilisations des sites à haut risque de liquéfaction; ensuite on donne une présentation des résultats d'une étude en laboratoire de l'influence des fines peu plastiques sur le comportement d'un sable limoneux et du renforcement du sol de Chlef par augmentation de la densité relative, par inclusions de nappes de géotextiles et de colonnes ballastées. L'étude a comporté des essais triaxiaux monotones et cycliques non drainés qui ont été réalisés à une densité relative $I_d = 50\%$ pour des fractions de fines variant entre 0 (sables propre) et 50%.

Les essais montrent que l'augmentation de la teneur en fines induit une réduction de la résistance non drainée. Ceci se traduit par un effet important sur le comportement volumique qui se manifeste par une amplification de la phase de contractance lorsque la fraction des fines augmente. Cet effet est également important pour le comportement des sables-limoneux sur des chemins non drainés à cause du fort couplage entre le comportement déviatorique et volumique pour ce type de chemins.

Les résultats des essais sur le sol renforcé montre une nette amélioration de la résistance non drainée avec l'augmentation du nombre d'inclusions de géotextiles et de colonnes ballastées. Les essais cycliques montrent clairement que l'augmentation de la densité relative conduit à une augmentation de la résistance à la liquéfaction de ce sol.

5. Bibliographie

- Bouferra R., Shahrour I., 2004. Influence of fines on the resistance to liquefaction of a clayey sand. *Ground Improvement* 8, No 1, 1-5.
- Finn, W.L., Ledbetter, R.H. And Wu, G., 1994. Liquefaction on silty soils : Design and analysis. *Ground failures under seismic condition, Geotechnical special publication N° 44, ASCE*, pp. 51-76.
- Kenny, T.C. 1997. Residual strength of mineral mixtures. *Proc.9th Int.Conf. Soil Mech., Tokyo, Vol. 1*, 155-160.
- Koester, J.P. 1994. The influence of fine type and content on cyclic strength. *Ground failures under seismic condition, Geotechnical special publication N° 44, ASCE*, pp. 17-33.
- Law, K.T and Ling, Y.H 1992. Liquefaction of granular soils with non-cohesive and cohesive fines. *Proceedings of the tenth world conference on earthquake engineering, Rotterdam*, pp.1491-1496.

- Mitchell, J. K. 1993. *Fundamental of soil behaviour*. 2nd ed. John Wiley Interscience: New York.
- Shen, C.K., Vrymoed, J.L., and Uyeno, C.K., 1997. The effects of fines on liquefaction of sands. *proceedings of the 9th International Conference on Soil Mech. and Foundation Eng., Tokyo, Vol. 2*, pp.381-385.
- Thevanayagam, S. 1998. Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands. *J. Geotech. Geoenviron. Enf Div., ASCE* , 124, N° 6, 479-491.
- Troncosco, J.H., and Verdugo, R., 1985. Silt content and dynamic behaviour of tailing sands. *Proceeding 12th international conference on soil mech. and foun. Eng, San Francisco, USA*, pp. 1311-1314.
- Vaid, V.P., 1994. Liquefaction of silty soils. *Ground Failure Under Seismic Condition, Geotechnical, special publication N°44.ASCE*, pp.1-16.
- Zlatovic S., Ishihara K., 1997. Normalized behaviour of very loose non-plastic soils : effects of fabric. *Soils and foundations, Vol.37, N° 4*, pp.47-56.