

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DE FINES NON-PLASTIQUES SUR LA SUSCEPTIBILITE A LA LIQUEFACTION

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF NON-PLASTIC FINES ON LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY

Gobbi S.¹, Reiffsteck P.¹, Lenti L.^{1,2}, Santisi d'Avila M.P.³, Semblat J.F.⁴

¹ Université Gustave Eiffel, IFSTTAR (GERS/SRO), Marne la Vallée, France

² Cerema, Equipe-Projet MOUVGS, Sophia Antipolis, France

³ Polytech'Lab, EA UNS 7498, Université Côte d'Azur, Sophia Antipolis, France

⁴ IMSIA (UMR9219), CNRS, EDF, CEA, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris, France

RÉSUMÉ – Il est largement reconnu que la présence de fines influence significativement la résistance à la liquéfaction des mélanges sable-fines. Afin de clarifier l'effet des fines non-plastiques sur la réponse des mélanges, une série d'essais triaxiaux monotones et cycliques ont été effectués pour des échantillons de densité lâche, moyenne et dense. Les résultats révèlent que la résistance à la liquéfaction est fortement influencée par la teneur en fines et la densité relative.

ABSTRACT – It is widely recognized that the presence of fines significantly influences the liquefaction resistance of sand-fines mixtures. To clarify the effect of non-plastic fines on the behavior of sand-fines mixtures, a series of monotonic and cyclic undrained triaxial tests were performed for loose, medium dense and dense specimens. The results reveal that the liquefaction resistance depends both on the amount of fines and on the relative density.

1. Introduction

Il est actuellement communément admis que l'ajout de fines non-plastiques peut affecter la structure interne du sable propre. À cet égard, l'influence de la teneur en fines (FC) sur la résistance à la liquéfaction des mélanges a fait l'objet de recherches expérimentales au cours de ces dernières décennies (Kuerbis et al., 1988; Pitman et al., 1994; Zlatovic et Ishihara, 1995; Yamamuro et Lade, 1997; Thevanayagam et al., 2002; Ni et al., 2004; Murthy et al., 2007), mais le rôle de la teneur en fines n'est toujours pas clair. En effet, la comparaison de leurs résultats est controversée, voire contradictoire et confirme la nécessité de clarifier le rôle de la teneur en fines afin de surmonter la divergence des résultats.

Les différents résultats des essais en laboratoire ont montré que l'augmentation de la teneur en fines non-plastiques peut conduire soit à une augmentation de la résistance à la liquéfaction des sables (Chang et al., 1982; Dezfoulian, 1982; Amini et Qi, 2000), soit une diminution de cette dernière (Carraro et al., 2003; Stamatopoulos, 2010; Belkhatir et al., 2010), soit une diminution de la résistance à la liquéfaction jusqu'à une certaine valeur limite (c'est-à-dire la teneur limite en fines) suivie d'une augmentation de cette dernière (Koester, 1994; Thevanayagam, 1998; Polito, 1999; Xenaki et Athanasopoulos, 2003; Papadopoulou and Tika, 2008; Yang et al., 2006c).

L'objectif principal de cette étude expérimentale est de clarifier et d'estimer l'influence des fines non-plastiques dans le sable sur le déclenchement et le développement du phénomène de liquéfaction. Des séries d'essais triaxiaux monotones et cycliques ont été

menées sur des échantillons reconstitués en laboratoire en faisant varier la proportion de farine de silice C500 et de sable HN31 Hostun RF constituées par des grains sub-angulaires.

Cette étude considère trois indices de densité différents (lâche, moyenne et dense), trois pressions de confinement initiale de 50, 100 et 200 kPa et un signal sinusoïdal de fréquence égale à 0,5 Hz et cycles symétriques alternés. L'analyse de ces résultats permettra de déterminer le potentiel de liquéfaction des zones sismiques et d'estimer la variabilité des paramètres de liquéfaction des sables en fonction du contenu des fines.

L'ensemble des échantillons a été préparé au même indice de densité globale du mélange. Cela signifie que lorsque la teneur en fines est augmentée, la quantité de sable est réduite. Ce choix a été envisagé pour faciliter la comparaison avec les sols sableux naturels qui sont identifiés dans la pratique au moyen de la densité relative de l'ensemble du mélange de sols et du pourcentage de fines.

2. Procédure expérimentale

2.1. Matériaux utilisés

Les essais triaxiaux, monotones et cycliques, ont été réalisés sur des éprouvettes de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur de sol reconstitués en laboratoire en mélangeant différentes quantités de farine de silice C500 et de sable HN31 Hostun RF (dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 1). Le sable d'Hostun est un sable de couleur gris-blanc à beige-rosé, siliceux ($SiO_2 > 99\%$), à grains sub-angulaires à angulaires. La fine non plastique est la silice C500, c'est une farine de silice fine ($SiO_2 > 99\%$), elle est de couleur blanche et se caractérise par une forme de grain sub-angulaire.

Les courbes granulométriques du sable propre, de la farine de silice et des mélanges sont présentés dans la Figure 1. Les pourcentages de fines considérés en masse totale sont : 0, 5, 10 et 20%.

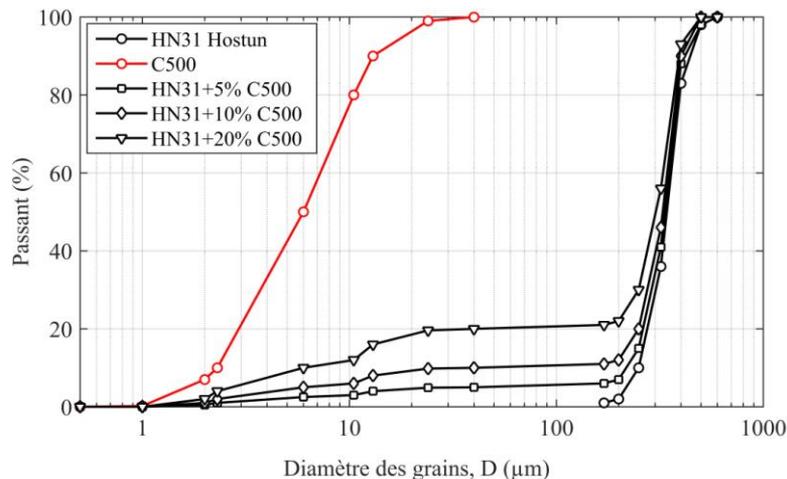


Figure 1. Courbes granulométriques.

Tableau 1. Caractéristiques principales du sable d'Hostun RF

Sable	D_{50} (mm)	C_u	e_{min}	e_{max}	ρ_s (kg/m^3)
HN31 Hostun	0.32	1.57	0.66	1.00	2650

2.2. Reconstitution des échantillons

L'ensemble des échantillons a été reconstitué en laboratoire par damage humide. Le damage humide consiste à mélanger de manière homogène le sable sec et le pourcentage de fines également sec en ajoutant une petite quantité d'eau désaérée ($w=5\%$), afin de pouvoir obtenir des structures très lâches grâce à la cohésion capillaire. Le mélange est après compacté délicatement dans le moule en 5 couches de 2cm d'épaisseur en utilisant la méthode de sous-compactage, introduite par Ladd (1978).

Les éprouvettes ont été fabriquées au même indice de densité global, I_D , constant calculé sur la base des valeurs des indices des vides maximum et minimum (e_{max} , e_{min}) déterminés à partir de la norme française NF P94-059 et japonaise JGS 0161-2009 (Fig.2).

La Figure 2 présente l'évolution des indices des vides maximal et minimal avec l'augmentation de la teneur en fines. En particulier, pour des teneurs en fines FC inférieures à 20%, les deux normes donnent des valeurs fiables mais pour des valeurs de FC majeurs, la norme japonaise semble plus adéquate. La Fig. 2 indique également les indices des vides représentant les états lâche, moyen et dense ($I_D = 30, 50$ et 80%) pour les échantillon préparés. Il est à noter que, bien que l'indice de densité reste constant, l'indice des vides e change à mesure que la teneur en fines augmente.

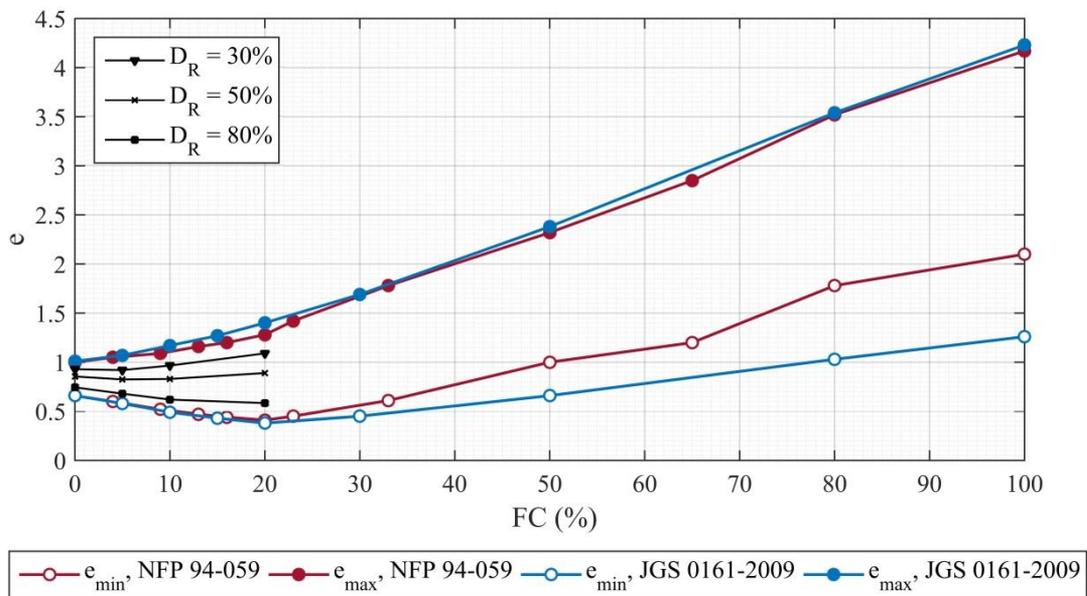


Figure 2. Indice des vides maximal et indice des vides minimal des mélanges déterminés à partir de la norme française NF P94-059 et japonaise JGS 0161-2009.

2.3. Procédure d'essai

Pour la réalisation des essais triaxiaux monotones, la cellule triaxiale classique de type Bishop et Wesley à chargement hydraulique a été utilisé. Alors que pour les essais triaxiaux cycliques, une cellule triaxiale dynamique à chargement électromécanique a été employée. Les deux cellules permettent la réalisation d'essais monotones et cycliques à déplacement ou à force contrôlé.

La saturation a été obtenue par percolation à travers l'échantillon, du bas vers le haut, du gaz carbonique (CO_2) d'abord, puis de l'eau désaérée. Après, une contre-pression de 400 kPa s'est avérée suffisante pour assurer la saturation complète. Le coefficient de

Skempton B été trouvée supérieure ou égale à 0,98 dans la plupart des tests effectués. Ensuite, les échantillons ont été consolidés sous une contrainte isotrope effective, allant de 50 à 200 kPa.

Pour cette étude, les essais monotones ont été réalisés à déplacement contrôlé avec une vitesse de déformation axiale égale à 1% par minute. Tandis que les essais cycliques ont été réalisés à force contrôlée avec une fréquence de chargement égale à 0.5 Hz.

3. Résultats obtenus

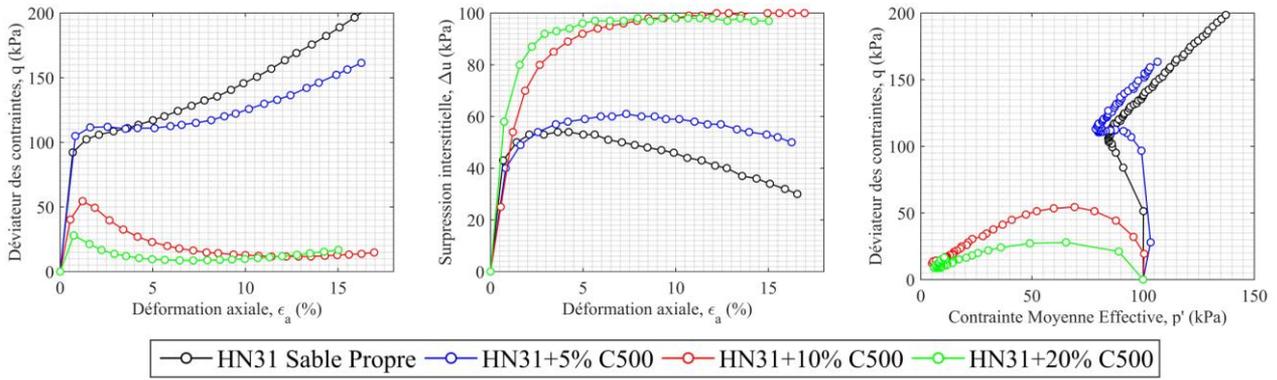
Afin de clarifier le rôle des fines non-plastiques sur le comportement des mélanges, des essais triaxiaux statiques et cycliques ont été réalisés sur des mélanges de sable-fin consolidés à différentes pressions de confinement. Trois indices de densité ont été considérés $I_D = 30, 50, 80\%$, de manière d'étudier l'influence de la teneur en fines sur des sols lâches, moyennes et denses. La teneur en fines, FC , a été variée entre 0-20% afin de considérer des sols dont le sable est dominant.

3.1. Comportement du mélange sable-fines sous cisaillement monotone

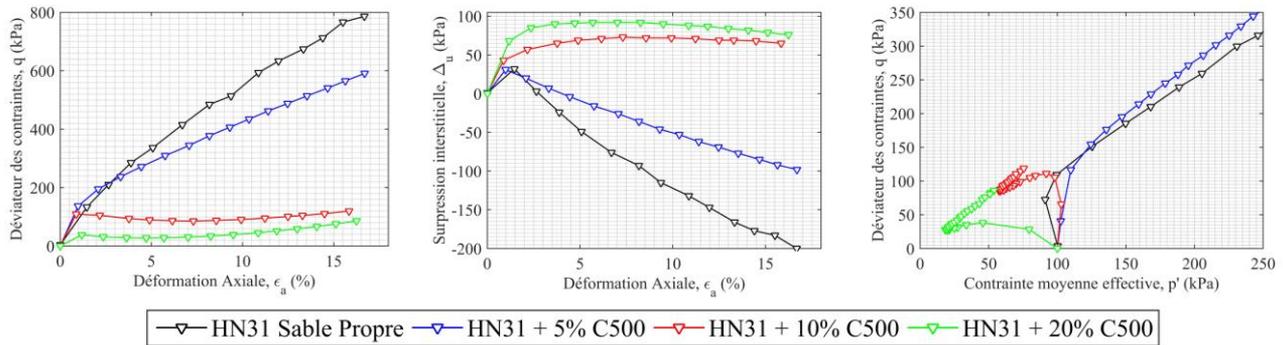
Figs 3, 4 et 5 montrent les courbes du déviateur des contraintes, de la suppression interstitielle et des chemins des contraintes moyennes effectives en fonction de la teneur en fines pour les trois différents indices de densité. On constate que pour tous les trois indices de densité, la réponse du mélange à 5% des fines se rapproche de celle du sable propre. Ils présentent presque la même valeur du pique de résistance, avec une résistance résiduelle majeur pour le cas de sable propre. Par contre, pour les mélanges à 10 et 20% des fines, la réponse change en fonction de l'indice de densité considéré. En fait, si la structure du mélange est lâche ($I_D = 30\%$, Fig.3) ou moyennement dense ($I_D = 50\%$, Fig. 4), la résistance diminue significativement avec l'augmentation du contenu en fines. Si la structure est dense ($I_D = 80\%$, Fig.5), la réponse du mélange à 10% des fines reste encore similaire à celle du sable propre et seulement avec le 20% des fines la résistance chute brusquement jusqu'à l'effondrement.

La Fig. 6 présente une synthèse des valeurs de la résistance au cisaillement à l'état critique pour les différents essais réalisés. En particulier, la Fig.6 montre l'évolution de la résistance au cisaillement à l'état critique en fonction du pourcentage de fines pour les trois différents indices de densité (état lâche, moyenne dense et dense) soumis aux trois contraintes de consolidation isotrope (50, 100 et 200 kPa). On remarque que dans le cas lâche et moyennement dense ($I_D = 30\%$ et $I_D = 50\%$), la résistance à l'état critique diminue significativement pour le mélange avec l'augmentation du pourcentage de fines FC . Tandis que pour le cas de sable dense, la résistance à l'état critique diminue du 10% jusqu'au pourcentage de fines d'environ 5% pour ensuite diminuer brusquement au-delà de cette pourcentage. On constate également que l'évolution du déviateur des contraintes à l'état critique présente la même allure en fonction de la contrainte de consolidation isotrope au même indice de densité.

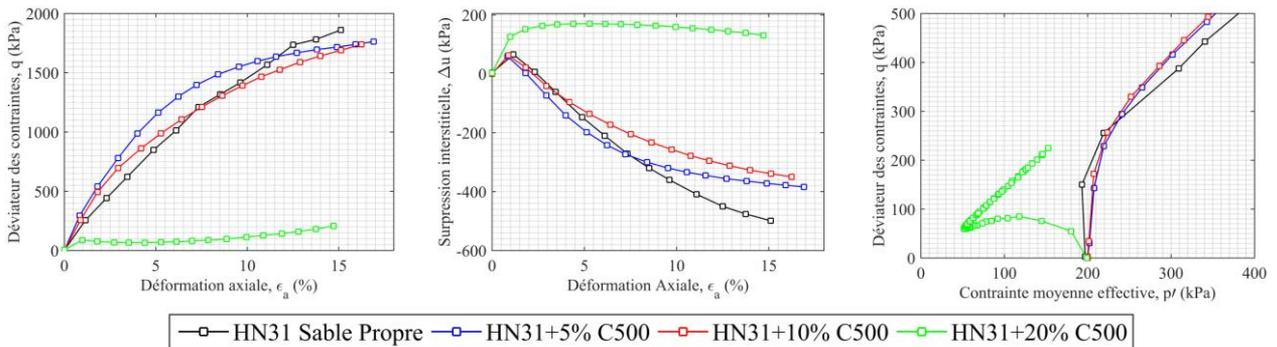
Ce résultat confirme que la contribution des fines à la résistance mécanique du mélange ne dépend pas seulement du pourcentage des fines mais aussi de la structure du mélange. En fait plus la structure du mélange est lâche, plus la possibilité que les particules de fines soient totalement confinées dans les vides formés par les grains du sable est élevée. Au contraire, dans le cas de structures plus denses, les interactions entre les particules de fines et les grains de sable sont différents et il est plus probable que les particules fines soient actives et contribuent au comportement mécanique du mélange.



a) b) c)
 Figure 3. Influence de la teneur en fines sur le comportement non drainé des mélange moyennement lâches ($I_D = 30\%$) pour une contrainte de consolidation de 100 kPa. (a) courbe $q - \epsilon_a$; (b) courbe $\Delta u - \epsilon_a$; (c) courbe $q - p'$.



a) b) c)
 Figure 4. Influence de la teneur en fines sur le comportement non drainé des mélange moyennement denses ($I_D = 50\%$) pour une contrainte de consolidation de 100 kPa. (a) courbe $q - \epsilon_a$; (b) courbe $\Delta u - \epsilon_a$; (c) courbe $q - p'$.



a) b) c)
 Figure 5. Influence de la teneur en fines sur le comportement non drainé des mélange denses ($I_D = 80\%$) pour une contrainte de consolidation de 100 kPa. (a) courbe $q - \epsilon_a$; (b) courbe $\Delta u - \epsilon_a$; (c) courbe $q - p'$.

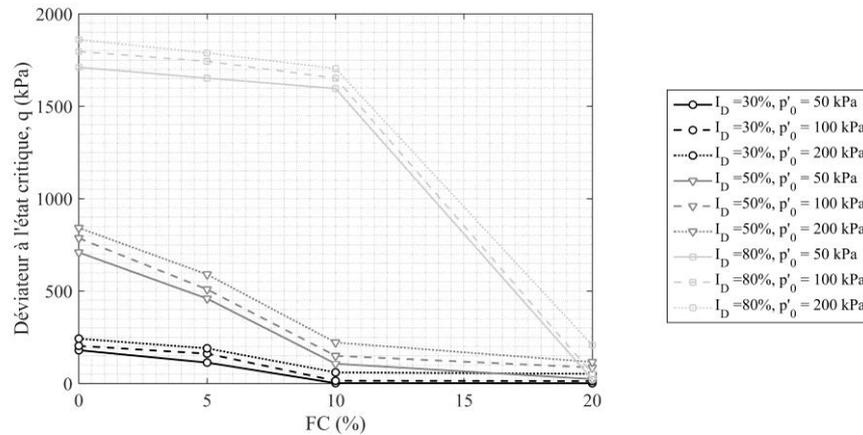


Figure 6. Influence de la teneur en fines sur la résistance sur la résistance au cisaillement à l'état critique pour le trois indice de densité ($I_D = 30\%$, 50% et 80%) et pour les trois contraintes de consolidation isotrope ($p'_0 = 50, 100$ et 200 kPa).

3.2. Comportement du mélange sable-fines sous cisaillement cyclique

Afin d'étudier l'influence des fines non-plastiques sur la résistance à la liquéfaction des sables, deux série de tests triaxiaux cycliques a été réalisée pour différentes valeurs de teneur en fines ($FC = 0\%$, 5% , 10% et 20%). Tous les échantillons de la première série ont été préparés dans les mêmes conditions initiales $I_D = 30\%$, soumis à la même contrainte de consolidation initiale $p'_0 = 100kPa$ et à un rapport de contrainte cyclique égal à 0.1, ce qui équivaut à une charge alternée d'amplitude $\Delta_{cycl} = 20kPa$. Tous les échantillons de la deuxième série ont été préparés dans les mêmes conditions initiales $I_D = 80\%$, soumis à la même contrainte de consolidation initiale $p'_0 = 100kPa$ et à un rapport de contrainte cyclique égal à 0.2, ce qui équivaut à une charge alternée d'amplitude $\Delta_{cycl} = 40kPa$.

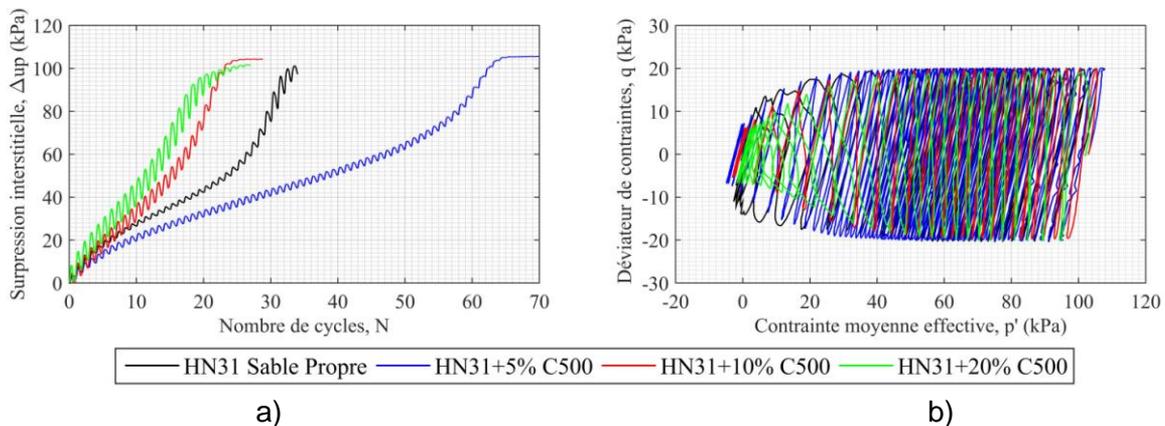


Figure 7. Influence de la teneur en fines sur le comportement cyclique des mélanges sable-fines ($I_D = 30\%$, $p'_0 = 100kPa$, $\Delta_{cycl} = 20kPa$).

Fig. 7 montre les résultats de la première série (état lâche $I_D = 30\%$) et la Fig. 8 ces de la deuxième série (état dense $I_D = 80\%$). On remarque que les mélanges présentent le même comportement et on constate que les résultats des essais triaxiaux cycliques sont cohérents avec les résultats des essais monotones. En fait, concernant les essais au

même indice de densité $I_D = 30\%$ (Fig. 7a), on peut noter que le taux de génération de pression interstitielle diminue jusqu'à un pourcentage de fine de 5% et après il augmente avec l'augmentation de la teneur en fines. Au contraire, dans le cas des mélanges denses ($I_D = 80\%$, Fig. 8a), le taux de génération de pression interstitielle diminue jusqu'à un pourcentage de 10% et après il augmente significativement avec 20% de fines.

Ces résultats confirment que comme dans les essais triaxiaux monotones, le même pourcentage des fines peut avoir une différente influence en fonction de l'état de la structure du mélange (lâche ou dense).

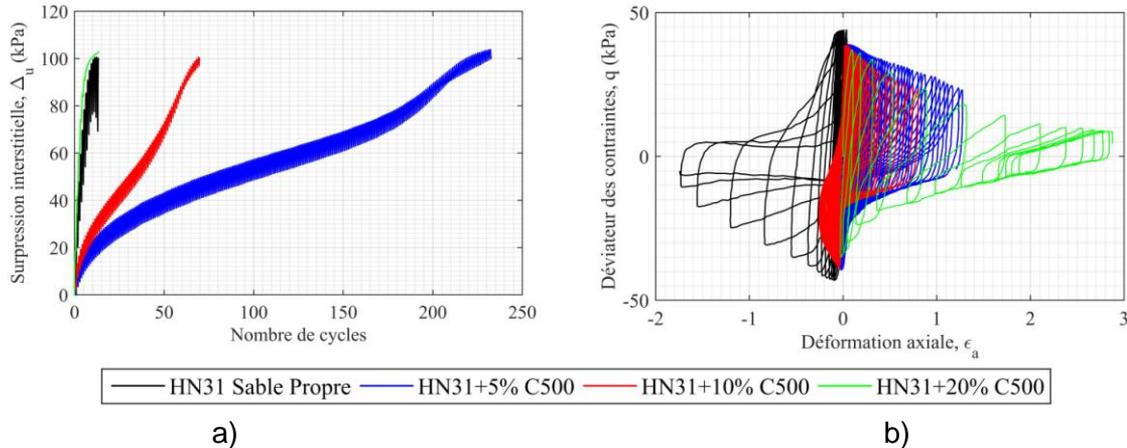


Figure 7. Influence de la teneur en fines sur le comportement cyclique des mélanges sable-fines ($I_D = 80\%$, $p'_0 = 100kPa$, $\Delta_{cycl} = 40kPa$).

4. Conclusions

Une étude expérimentale pour comprendre l'influence des fines non-plastiques sur la réponse des mélanges sable-fines a été réalisée à travers des essais triaxiaux non drainés monotones et cycliques reconstitués au même indice de densité global.

Les essais monotones sur mélanges lâches et moyennement denses montrent que lorsque le pourcentage des fines est inférieur à 5%, le comportement est similaire à celui du sable propre en termes de résistance du pic. Dépassé cette valeur, la résistance du mélange diminue significativement. Pour les mélanges denses, la réponse du mélange reste similaire à celle du sable propre jusqu'à un pourcentage de fines de 10% et au-delà de cette valeur la résistance diminue.

Les essais cycliques montrent la même allure que les essais monotones. Dans le cas de structure lâche ou moyennement dense, le taux de génération de pression interstitielle par rapport aux cycles diminue initialement jusqu'à environ 5% de teneur en fines. Après, les essais à 10% et 20% de pourcentage de fines ont une augmentation drastique du taux de pression interstitielle. L'analyse de comportement cyclique pour les mélanges denses confirme que un pourcentage jusqu'à 10% est favorable pour l'amélioration de la résistance à la liquéfaction.

L'ensemble des résultats des essais montrent que le comportement des mélanges ne dépend pas seulement du pourcentage des fines mais aussi de la structure du mélange (lâche, moyennement dense et dense).

5. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le projet ANR ISOLATE (Characterizing and Improving SOils Against liquEfaction).

6. Références bibliographiques

- Amini F., Qi G. (2000). Liquefaction testing of stratified silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(3), pp.208-217.
- Belkhatir M., Arab A., Della N., Missoum H., Schanz T. (2010). Influence of inter-granular void ratio on monotonic and cyclic undrained shear response of sandy soils. *Comptes Rendus Mécanique*, 338(5), pp.290-303.
- Carraro J., Bandini P., Salgado R. (2003). Liquefaction resistance of clean and non-plastic silty sands based on cone penetration resistance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(11), pp. 965-976.
- Chang N.Y., Yeh S.T., Kaufman L. P. (1982). Liquefaction potential of clean and silty sands. *Proceedings of the 3rd International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, WA, Vol. 2*, pp. 1017–1032.
- Dezfulian H., (1982). Effects of silt content on dynamic properties of sandy soils. *Proceedings of the 8th World Conf. on Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., pp. 63–70.
- Koester J. (1994). Influence of fines type and content on cyclic strength. In *Geotechnical Special Publication*, vol. 44, pp. 17-33, Atlanta, GA, USA. ASCE, New York, NY, United States.
- Kuerbis R., Negussey D., Vaid Y. (1988). Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand. In *Geotechnical Special Publication*, vol. 21, pp. 330-345, Fort Collins, CO, USA. Publ by ASCE, New York, NY, United States.
- Murthy T., Loukidis D., Carraro J., Prezzi M. Salgado R. (2007). Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Geotechnique*, 57(3), pp.273-288
- Ni Q., Tan T., Dasari G. Hight D. (2004). Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils. *Geotechnique*, 54(9), pp. 561-569.
- Papadopoulou A.,Tika T. (2008). The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands. *Soils and Foundations*, 48(5), pp. 713-725.
- Pitman T., Robertson P., Sego D. (1994). Influence of fines on the collapse of loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(5):728-739.
- Polito C. (1999). The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils. Phd, Virginia Polytechnic Institute.
- Stamatopoulos C. (2010). An experimental study of the liquefaction strength of silty sands in terms of the state parameter. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(8), pp. 662-678.
- Thevanayagam S. (1998). Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(6), pp.479-491.
- Thevanayagam S., Shenthan T., Mohan S. Liang J. (2002). Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(10), pp. 849-859.
- Xenaki V., Athanasopoulos G. (2003). Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: An experimental investigation of the effect of fines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(3), pp. 183-194.
- Yamamuro J.A., Lade P.V. (1997). Static liquefaction of very loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), pp. 905-917.
- Yang S., Sandven R., Grande L. (2006c). Steady-state lines of sand-silt mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(11), 1213-1219.
- Zlatovic S., Ishihara K. (1995). On the influence of non-plastic fines on residual strength. In *1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp. 239-244.