
Etude de la liquéfaction d'un sol argileux naturel mou

Hanène Souli¹, Siba Kheirbek-Saoud², Jean-Marie Fleureau³

¹ Université de Lyon, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, 58 rue Jean Parot, 42023 Saint Etienne (France), hanene.souli@enise.fr

² Université Tishreen, Faculté de génie Civil, Lattaquié, Syrie

³ Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire MSSMat, 8-10 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette (France), jean-marie.fleureau@centralesupelec.fr

RÉSUMÉ. Ce travail présente les résultats des essais effectués sur un matériau atypique prélevé en Guadeloupe. Le but de ce travail est d'étudier la susceptibilité de ce matériau vis-à-vis de la liquéfaction. Une caractérisation mécanique du matériau a été effectuée via des essais triaxiaux monotones. Ces essais ont permis d'estimer l'angle de frottement du matériau à 38°. L'étude de la susceptibilité à la liquéfaction via les critères basés sur les paramètres de plasticité, n'a pas permis d'avoir une appréciation exacte de la susceptibilité à la liquéfaction du matériau. En effet, certains critères le classaient comme fortement liquéfiable, d'autres le classifiait comme non liquéfiable. Les essais au laboratoire ont montré que la liquéfaction de ce matériau ne se produisait que pour de fortes valeurs de déviateur cyclique ce qui correspond à des séismes de forte amplitude.

....
....
....
....
....
....

ABSTRACT. The paper presents the results of identification, monotonous and cyclic triaxial tests on a potentially liquefiable soil from the Guadeloupe island. The material is a very soft clayey soil whose susceptibility to liquefaction is not clear when referring to index properties such as grain size distribution, plasticity, etc. The classifications found in the literature indicate that the material has rather a "clay-like" behaviour, i.e. is not very susceptible to liquefaction, but its properties are very close to the threshold values given by the authors. Cyclic triaxial tests carried out on the material under different conditions show that liquefaction is possible for a relatively important level of cyclic deviator or number of cycles.

....
....
....
....
....
....
....

MOTS-CLÉS : Argile molle, indice de plasticité, essais cycliques
KEY WORDS: Soft clayey soil, index properties, cyclic triaxial tests,

1. Introduction

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude de la liquéfaction des sols durant ces dernières années. Seed & Idriss (1982), Seed et al. (1985)...ont proposé des méthodes qui permettent d'étudier la susceptibilité à la liquéfaction des sols à partir d'essais SPT et CPT. Lade et al. (2009) se sont plutôt intéressés à l'étude de l'effet du pourcentage des fines sur la susceptibilité à la liquéfaction. L'étude bibliographique montre que l'étude de la liquéfaction des sols argileux ainsi que les silts argileux est moins explorée. Gratchey et al. (2006) ont étudié la liquéfaction de mélanges de sable et d'argile et ont montré que les matériaux qui se liquéfient sont ceux qui présentent une structure "ouverte" dans laquelle les agrégations d'argile étaient généralement rassemblées aux points de contact des particules de sable, servant de connecteurs à faible résistance. D'autre part, la microfabric des sols résistants à la liquéfaction s'est avérée être plus compact, l'argile produisant une matrice qui empêchait les grains de sable de se réarranger lors du chargement cyclique. Evidemment, la densité initiale et la compressibilité du sol jouent un rôle majeur dans le phénomène de liquéfaction et dans l'augmentation de la pression interstitielle en excès dans des conditions non drainées. Cet article présente les résultats des essais réalisés sur un matériau atypique prélevé de Guadeloupe. Son but est de confronter les résultats des essais de liquéfaction au laboratoire à ceux obtenus par les critères de liquéfaction semi-empiriques basés sur les indices de plasticité, la granulométrie et le taux de fines.

2. Matériaux et méthodes

Le matériau étudié est prélevé de Gaudeloupe. Les propriétés géotechniques du matériau sont regroupées dans le tableau 1. Les essais d'identification géotechnique montrent que le matériau est classifié comme un silt argileux de faible plasticité. La teneur en eau naturelle du matériau est proche de la limite de liquidité.

Tableau 1 Propriétés Géotechniques du matériau étudié

Limite de liquidité w_L , %	Limite de plasticité w_p , %	Indice de plasticité PI, %	Densité spécifique des grains γ_s/γ_w	Teneur en eau naturelle w_{nat} , %	Poids volumique γ_{dnat} , kN/m^3
37-42.2	24-26.7	11-18	2,72	40-53	1,05-1,17
< 80 μm %	< 2 μm %	d_{10} mm	d_{50} mm	d_{60} mm	$C_u = d_{60}/d_{10}$
66-94	8-16	0,001-0,003	0,012-0,020	0,015-0,030	10-15

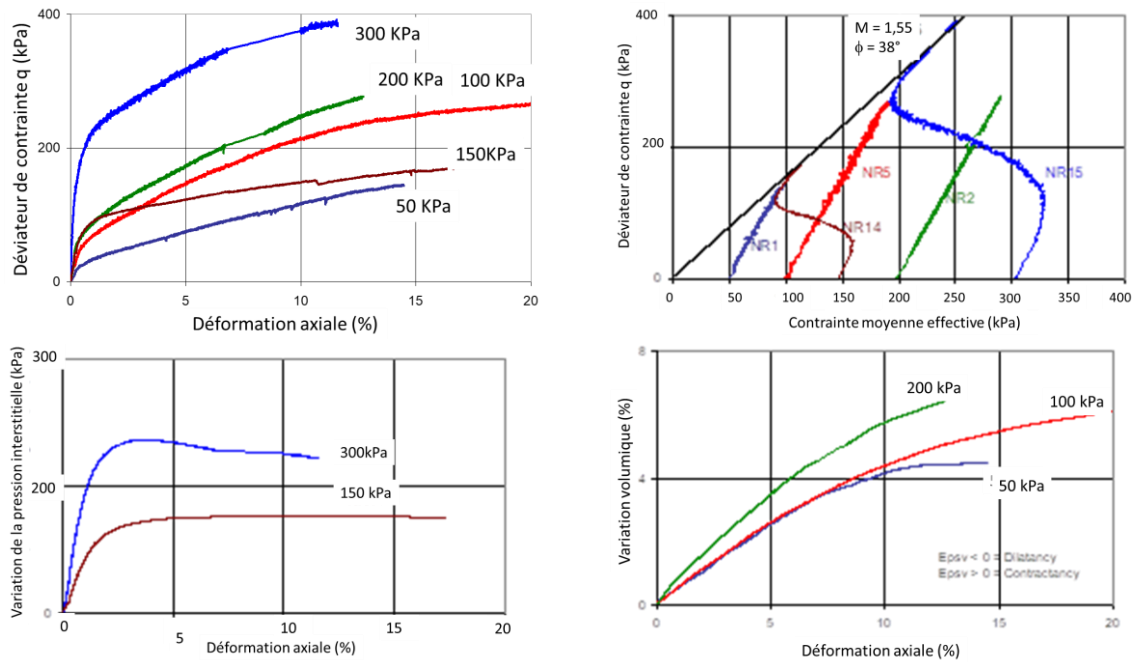
Les essais triaxiaux monotones et cycliques sont réalisés sur des matériaux intacts de 10 cm de diamètre et de 17 cm de hauteur. Une première phase de saturation est effectuée en augmentant la contrainte de confinement à 370 kPa et la pression interstitielle à 350 kPa. A la fin de cette phase le coefficient de skemption est mesuré. Le matériau est considéré comme saturé si la valeur du coefficient de skemption est supérieure à 0,98. Par la suite une consolidation isotrope du matériau est réalisée. Pour les essais monotones, la consolidation est réalisée pour des contraintes moyennes effectives de 50, 100, 150, 200 et 300 kPa. Le cisaillement est réalisé dans des conditions drainées et non drainées. En ce qui concerne les essais cycliques, les essais sont effectués pour une fréquence de 1 Hz et des valeurs de déviateurs cycliques $q/2\sigma_3$ variant entre 0,2 and 0,4. La liquéfaction est étudiée pour 100 cycles.

3. Résultats des essais

3.1. Essais monotones

Les résultats des essais triaxiaux sont présentés dans la figure 1. Pour les essais effectués dans les conditions drainées, les résultats montrent que l'essai effectué pour une contrainte effective de consolidation de 200 kPa, n'a pas totalement atteint la plasticité parfait, cet état est plus ou moins atteint pour des valeurs de contrainte effective de 50 et 100 kPa. Le critère de plasticité est déterminé essentiellement à partir des essais réalisés dans des conditions non drainées. Ces résultats montrent que le critère de plasticité passe par l'origine ce qui signifie que le matériau a une cohésion nulle. L'angle de frottement est de 38°. La ligne de l'état critique est aussi déterminée essentiellement à partir des essais non drainés, la pente de cette droite est de l'ordre de 0,09 (non présentée dans cet article).

Figure 1 Résultats des essais Monotones



3.2. Etude de la liquéfaction

3.2.1. Via les critères de classification

La susceptibilité à la liquéfaction du matériau est évaluée via différents critères qui sont renseignés dans le tableau 2. Le sol est totalement saturé, avec un rapport de teneur en eau par la limite de liquidité égale à 1. La distribution granulométrique est intermédiaire entre celle de sable et celle d'une argile puisque le pourcentage des fines est compris entre 10 et 25% avec une granulométrie étalée. Selon les critères de Wang (1979), Seed & Idriss (1982), le matériau étudié est très liquéfiable. Par contre, si on se fie au critère d'Andrew & Martin (2000) et celui de Boulanger & Idriss (2006, 2008), ce matériau n'est pas liquéfiable. Les critères de Polito (2001) et de Bray & Sancio (2006), le classifient comme moyennement susceptible à la liquéfaction. Les résultats montrent que les critères utilisés ne permettent pas de classer de façon fiable et précise la susceptibilité à la liquéfaction du matériau étudié.

Tableau 2 Comparaison des paramètres mesurés du matériau et les critères de liquéfaction du sol

Références	Critère pour l'étude de la susceptibilité du sol	Paramètres mesurés
Wang (1979)	15-20% fines < 5 µm; $w/w_L > 0,9$	15-25% < 5µm $w/w_L = 1,1$
Seed & Idriss (1982)	15-20% fines < 5 µm; $w_L < 35\%$; $w/w_L > 0,9$	15-25% < 5µm, $w_L = 37-42\%$; $w/w_L = 1,1-1,2$
Andrews & Martin (2000)	10% fines < 2 µm; $w_L < 32\%$	8-16% < 2 µm; $w_L = 37-42\%$
Polito (2001)	Très liquéfiable: $w_L < 25\%$; $PI < 7$ Moyennement liquéfiable: $25 < w_L < 35\%$; $7 < PI < 10$	$w_L = 37-42\%$; $PI = 11-18$
Seed (2003)	Très liquéfiable: $PI < 12$; $w_L < 37\%$; $w/w_L > 0,8$ Moyennement liquéfiable: $12 < PI < 20$; $37\% < w_L < 47\%$; $w > 0,85 w_L$	$w_L = 37-42\%$; $PI = 11$ $w/w_L = 1,1-1,2$
Boulanger & Idriss (2004, 2006)	Comportement proche du sable : $PI < 7$	$PI = 11-18$
Bray & Sancio (2006)	Très liquéfiable: $PI < 12$; $w/w_L > 0,85$ Moyennement liquéfiable: $12 < PI < 20$; $w/w_L > 0,8$	$PI = 11-18$; $w/w_L = 1,1-1,2$
Chang & Hong (2008)	Comportement proche du sable : fines 20-25% < 2 µm	8-16% < 2 µm

3.2.2. Via des essais cycliques

Le tableau 3 montre les conditions initiales des essais cycliques ainsi que le nombre de cycles nécessaire pour atteindre la liquéfaction pour les valeurs de déviateurs cycliques utilisés.

Tableau 3 Résultats des essais de liquéfaction du matériau

Contrainte de Consolidation (kPa)	50	50	100	100	100	200	200
Déviateur cyclique $q_c/2\sigma'_3$	0,2	0,3 0,38	0,4	0,35	0,35	(a) 0,2 (b) 0,3	0,3
Nombre de cycles	90	25		5	5	30	15

Ces résultats montrent que la liquéfaction de ce matériau est possible mais seulement si le déviateur de contrainte cyclique est élevée (à partir d'une valeur de 0,3) ou si le nombre de cycles est élevé. Ceci suggère que le matériau est modérément liquéfiable comme suggéré par le critère de Polito (2001) et Bray et Sancio (2006).

4. Conclusion

Les résultats obtenus en utilisant les différents critères de liquéfaction n'ont pas permis de classer de façon fiable la susceptibilité à la liquéfaction de ce matériau qui semble atypique et qui se trouve dans une zone sismique qui nécessite de le caractériser de façon précise vis-à-vis de ce risque. Les essais cycliques ont toute leur utilité pour caractériser la susceptibilité à la liquéfaction de ce matériau. En effet, ces essais ont montré que le matériau est modérément susceptible à la liquéfaction. Pour pouvoir obtenir la liquéfaction de ce matériau, il faut appliquer une forte valeur de déviateur cyclique. Ceci correspond à des séismes de forte magnitude.

5. Bibliographie

- [AND00] Andrews D.C.A., Martin G.R., « Criteria for liquefaction of silty soils », 12th World Conference on Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, NZ Society for EQ Engrg, 2000, Paper No 0312.
- [BOUL04] Boulanger R.W., Idriss I.M., « Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays », Report UCD/GDM-04/01, University of California Davis, 2004.
- [BOUL06] Boulanger R.W., Idriss, I.M. « Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, n° 11, 2006, p. 1413-1426.
- [BRAY 06] Bray J.D., Sancio R.B., « Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol 132, n° 9, 2006, p. 1165-1177.
- [CHANG 08] Chang W.J., Hong M.L., « Effect of Clay Content on Liquefaction Characteristics of Gap-Graded Clayey Sands », *Soils and Foundations*, vol. 48, No.1, p.101-114.
- [GRAT 86] Gratchev I.B., Sassa K., Osipov V.I., Sokolov V.N., « The liquefaction of clayey soils under cyclic loading », *Engineering Geology*, 86, 1986, p. 70-84.
- [LADE 09] Lade P.V., Yamamuro J.A., Liggio C.D., « Effects of fines content on void ratio, compressibility, and static Liquefaction of silty sand », *Geomechanics and Engineering, An International Journal*, vol. 1, n° 1, 2009, p.1-15.
- [POLITO 01] Polito C., « Plasticity based liquefaction criteria », 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri-Rolla, Rolla, Mo, 2001, Paper 1-33.
- [SEED 82] Seed H.B., Idriss I.M., « Ground motions and soil liquefaction during earthquakes », Earthquake Engineering Research Center Monograph, EERI, Berkeley, California, 1982.
- [SEED 85] Seed H.B., Tokimatsu K., Harder L.F., Chung R. « The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations », *Journal of Geotechnical Engineering*, vol 111, n° 12, 1985, p. 1425-1445.
- [SEED 03] Seed H.B. « Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework », Report EERC 2003-06, Earthquake Eng. Research Institute, Berkeley, California, 2003.
- [WANG 79] Wang, W. « Some findings in soil liquefaction », Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute Report, Beijing, China, 1979.