

INFLUENCE DES FINES PLASTIQUES SUR LA LIQUÉFACTION STATIQUE DU SABLE

INFLUENCE OF PLASTIC FINES ON THE STATIC LIQUEFACTION OF SAND

Quang Huy DANG¹, Philippe REIFFSTECK¹,

¹ IFSTTAR-UPE, 14-20 boulevard Newton, 77447, Marne-la-Vallée, France

RÉSUMÉ - Cette article présente le comportement du sable de Fontainebleau sous chargement monotone non drainé. Le phénomène de liquéfaction statique est observé sous l'influence de différents paramètres : la densité relative, la pression de confinement initial, le rapport de surconsolidation et le teneur en fines. Sur la base de ces résultats, on discute la susceptibilité du sol à se liquéfier en la comparant au critère chinois.

ABSTRACT - This article presents the behavior of Fontainebleau sand under undrained monotonic loading. The phenomenon of static liquefaction is observed in the influence of various parameters: the relative density, the initial confining pressure, the over consolidation ratio and the fines content. On the basis of these results, the susceptibility to liquefying soil is discussed in comparison with the Chinese criteria.

1. Introduction

La liquéfaction est un phénomène où le sol voit son comportement passer d'un état solide à un état liquide, sous l'action d'une perturbation (Terzaghi, 1948). Reconnue pour la première fois en 1920 par Hazen (Hazen, 1920), elle a provoqué plusieurs ruptures de massifs sableux naturels mais également de structures artificielles. En particulier, après la destruction de toute sorte d'infrastructures modernes durant le séisme de Niigata en 1964, le problème de la liquéfaction a reçu beaucoup d'attention de la communauté géotechnique et de nombreuses recherches ont été entreprises pour clarifier le comportement basique et divers aspects des problèmes associés (Ishihara, 1993). Toutefois, jusqu'à présent, la plupart des recherches sont réalisées sur des sables purs et des mélanges de sable avec des fines non plastiques ou faiblement plastiques. Les résultats des études obtenues sur la liquéfaction des sables argileux sont limités et controversés, malgré l'enjeu majeur que revêt leur connaissance pour la pratique.

Les méthodes d'évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction du sol ont été largement étudiées. Sur la base de données collectées sur des sites où les sols ont liquéfié et sont resté stable, Wang (Wang, 1979) a établi un critère pour déterminer la susceptibilité d'un sol à liquéfier ou non grâce au pourcentage de fine et au ratio de teneur en eau sur la limite de liquidité. Ce critère a été complété quelques années plus tard par Seed et Idriss (Seed, 1982) et a, depuis, été appelé « critère chinois ». Bien qu'il soit largement utilisé (Youd, 2001), plusieurs chercheurs doutent de sa fiabilité (Bray, 2006), (Boulanger, 2006).

Dans cet article, on présente les premiers résultats sur les comportements du sable de Fontainebleau et des mélanges de ce sable avec une illite, l'argile verte du Velay (Arvel), sous chargement monotone. La comparaison des résultats permet de tirer les premières conclusions sur l'influence des fines plastiques sur la liquéfaction du sol. D'autre part, l'application du critère chinois sur les résultats est réalisée également pour vérifier sa fiabilité.

2. Caractérisation des matériaux

Le sable de Fontainebleau utilisé dans le cadre de cette étude est un sable siliceux fin, uniforme et aux grains arrondis. La taille moyenne des grains (d_{50}) et son coefficient d'uniformité (C_u) sont 0,21mm et 1,52 respectivement.

Les fines plastiques utilisées sont constituées par l'illite Arvel. C'est une argile très fine et plastique, avec un passant à 5 µm de 60% et un d_{max} de 44 µm. Ses limites de liquidité (LL) et indice de plasticité (IP) sont 51 et 21,3 % respectivement. La masse volumique des particules solides du sable de Fontainebleau ainsi que celle de l'illite Arvel sont prises égales à 2,65 g/cm³. Dans le cadre de nos études, le sable a été mélangé avec différents pourcentages d'illite pour obtenir les matériaux nécessaires à notre étude. Ces granulométries sont présentées dans la figure 1.

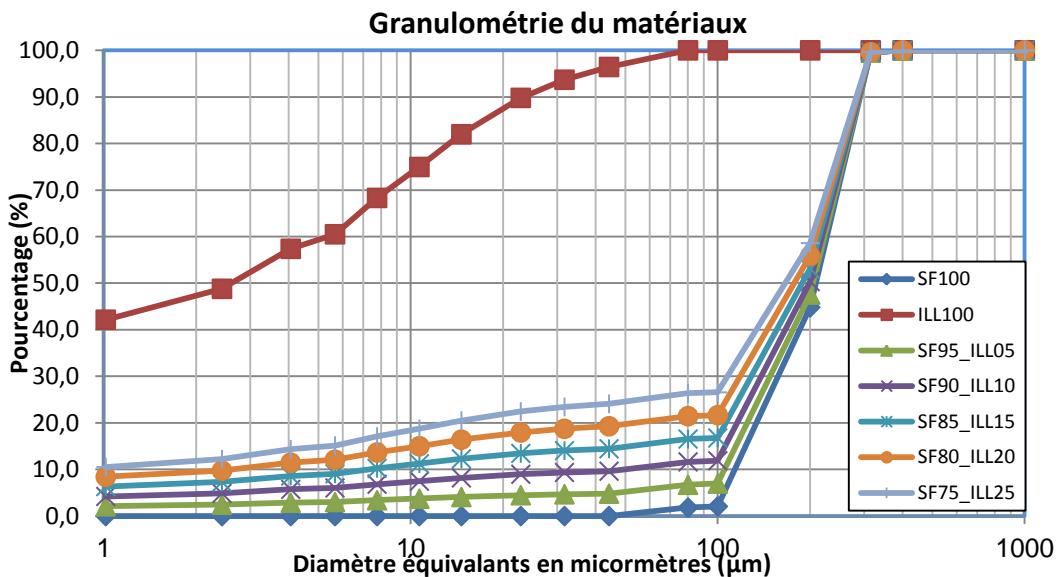


Figure 1 : Granulométrie des matériaux.

Pour déterminer les limites de consistance de chaque mélange, nous avons utilisé la norme français NF P94-051, toutefois il est difficile, même impossible d'obtenir un rouleau avec les sols trop sableux, ce qui est le cas avec la majorité de nos mélanges. En conséquence, on a tenté d'appliquer diverses méthodes alternatives pour évaluer l'indice de plasticité à partir de la limite de liquidité (Wood, 1978), (R. Belviso., 1985), (Kodikara, 1986). Le Tableau 1 présente les résultats d'après la méthode de Kodikara. Ces résultats ne peuvent pas être considérés comme totalement fiables et un besoin de recherche approfondie persiste, mais cela s'est avéré la seule méthode nous donnant des résultats présentant une cohérence acceptable.

%SF	%ILL	LL	LP	IP
100	0	29,8		
97,5	2,5	25,6	23,3	2,3
95,00	5	22,4	20,5	1,9
92,50	7,5	21,1	19,8	1,3
90,00	10	19,2	17,1	2,1
85,00	15	19,1	13,3	5,8
80,00	20	17,2	8,1	9,1
75,00	25	19,3	8,2	11,1
0,00	100	51	21,3	29,7

Tableau 1-Les limites d'Atterberg des matériaux

L'indice de vide maximum et minimum de chaque mélange sont déterminés également grâce à la norme NF P 94-059. Il faut noter qu'il n'existe pas de norme déterminant e_{\max} , e_{\min} pour les sols contenant plus de 12% de fines donc par défaut nous avons utilisé la norme NF P 94-059 pour tous les mélanges. Les résultats sont présentés dans la figure 2. Sur la courbe e_{\min} , on trouve que la valeur du seuil de teneur en fines est d'environ 15%.

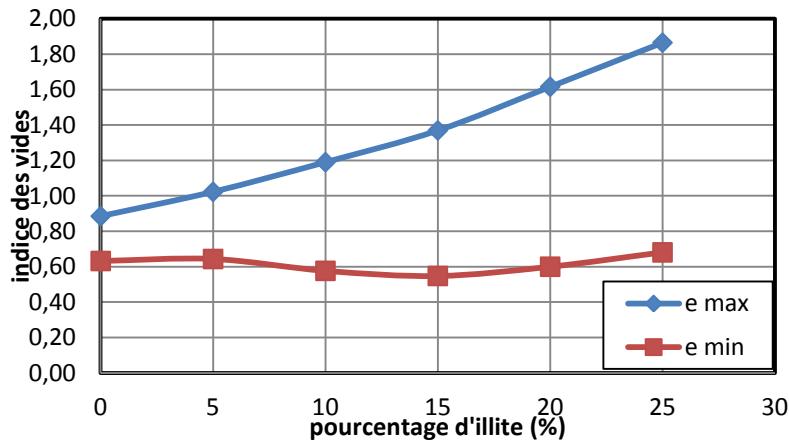


Figure 2 : Indice des vides maximum et minimum des matériaux

3. Programme d'essai

Tout d'abord, nous avons effectué quelques séries d'essais sur le sable de Fontainebleau pur pour évaluer le comportement des sables à la liquéfaction. Chaque série permettra de mettre en évidence l'influence des différents paramètres tels que l'indice de vide, la pression de confinement et le rapport de surconsolidation (OCR). Les essais d'une même série sont effectués dans les mêmes conditions, seul le paramètre étudié varie. Afin de vérifier la répétabilité, quelques essais sont refaits et les différences observées entre les résultats ont été jugées acceptables.

Pour étudier l'influence du pourcentage de fine sur la liquéfaction du sol, l'illite Arvel a été mélangé avec du sable avec les proportions 5, 10, 15, 20 et 25 pourcent en poids. La première série comprend cinq essais correspondant aux états les plus lâches de chaque mélange. Les autres séries ont été réalisées comme pour la série précédente sur le sable de Fontainebleau pour mettre en évidence l'influence des divers paramètres sur la liquéfaction des mélanges.

4. Procédure expérimentale

Tous les essais sont effectués grâce à un dispositif triaxial de type Bishop et Wesley avec des contrôleurs pression-volume de marque GDS. Les éprouvettes sont reconstituées dans un moule métallique en deux parties. Il faut noter que les éprouvettes lâches se déforment facilement, donc le transfert du chargement par un accostage cône-rotule donne un début d'essai présentant un artefact. Ce constat est concordant aux résultats de (Benahmed N., 2001). Une voie d'amélioration pour les futurs essais sera l'utilisation d'une connexion avec une tête de piston à embase plane.

Les éprouvettes cylindriques de 50mm diamètre et 100mm de hauteur sont préparées par la méthode de damage humide. Cette technique d'humidification permet de créer des éprouvettes à différentes densités relatives, de denses à très lâches, qui sont susceptibles de se liquéfier (Benahmed N., 2001), (Ishihara, 1993).

La procédure démarre par la mise en place sur l'embase inférieure de la cellule d'une pierre poreuse et d'un papier filtre qui permettront le drainage de l'eau. Ensuite, une membrane est attachée par deux colliers de serrage à l'embase avant de positionner le moule cylindrique à l'extérieur. On applique alors un vide entre la paroi du moule et la

membrane grâce à une pompe à vide pour avoir la forme de moule avant de placer les sables ou les mélanges qui ont été malaxé au préalable avec de l'eau distillée de 5 à 10% en poids. Le mélange est divisé en 5 parties, chaque partie correspond à une couche d'épaisseur 2 cm. On utilise un dameur cylindrique de 3,5 cm de diamètre pour le compactage. Une fois le moule rempli par le sol, on pose la deuxième pierre poreuse avec le papier filtre, puis l'embase supérieure sur laquelle la membrane sera fixée. La dimension de l'éprouvette sera vérifiée après démontage du moule, puis on met en place le cylindre et on remplit la cellule.

Après le montage de l'éprouvette, l'essai est effectué en trois étapes : saturation, consolidation et cisaillement. La phase de saturation commence par une circulation à travers l'éprouvette de dioxyde de Carbone (CO_2) sous une faible pression de 20kPa, puis de l'eau distillée. Enfin, une contrepression de 400 kPa est appliquée à l'intérieur de l'éprouvette pour assurer que le sol est bien saturé. En effet, la valeur du coefficient de Skempton B obtenu est toujours supérieure à 0,9 ce qui permet de valider que le sol peut être considéré comme saturé. Avec cette hypothèse, l'indice des vides de l'éprouvette après consolidation sera mesuré grâce à sa teneur en eau à la fin de l'essai (Ishihara, 1993). Le cisaillement de l'éprouvette est effectué par un déplacement du piston à une vitesse de 1 cm par minute après le contact.

5. Résultats

5.1. Influence de l'indice de vide ou de la densité relative.

La figure 2 présente les résultats de cisaillements du sable de Fontainebleau à la pression de confinement de 400kPa aux diverses densités relatives. Ils montrent qu'à l'état très lâche et lâche, les deux éprouvettes sont liquéfiées mais la pression à l'état stable du sable lâche est plus grande. À structure plus dense, ($e_c=0,77$), le sol est plus résistant, ce qui correspond à une liquéfaction limitée. On peut constater visuellement un pic de résistance de faible niveau pour une déformation environ 0,6%. De plus, lorsque la densité relative augmente, le pic du déviateur de contrainte augmente également.

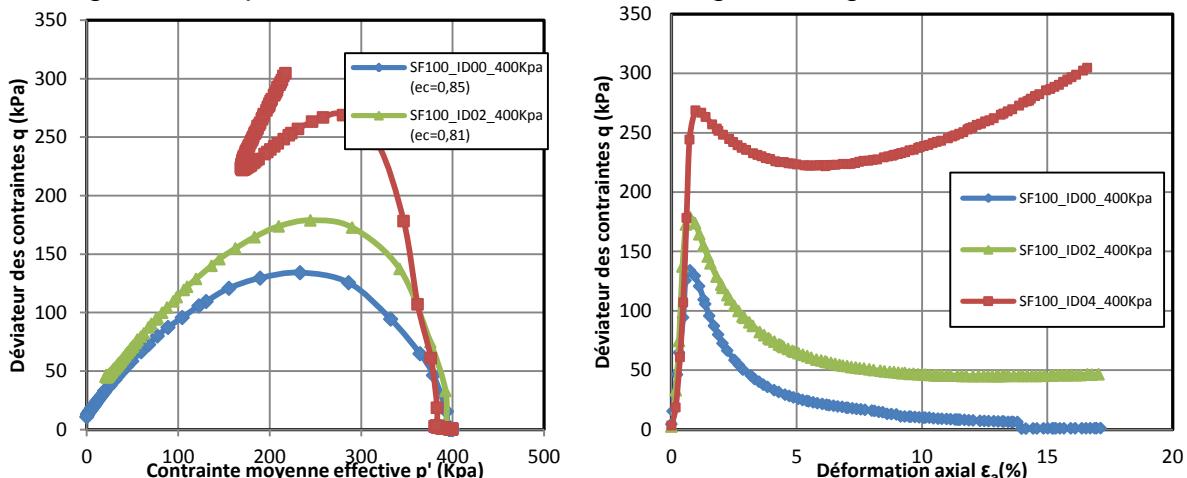


Figure 3 : Influence de l'indice de vide sur le comportement du sable de Fontainebleau.

Le comportement du mélange sable et 15% illite est très proche du comportement du sable lâche (figure 4). Les trois mélanges sont liquéfiés avec un pic de résistance très marqué aux faibles déformations. Pour les deux mélanges les plus lâches, les courbes sont répétables.

Pour le sable, l'indice de vide initial et l'indice de vide consolidé sont presque les mêmes, cependant, il y a un changement significatif pour les mélanges sable et illite. Malgré des indices de densités initiales différents, les mélanges deviennent beaucoup plus denses aux mêmes indices des vides vers 0,7.

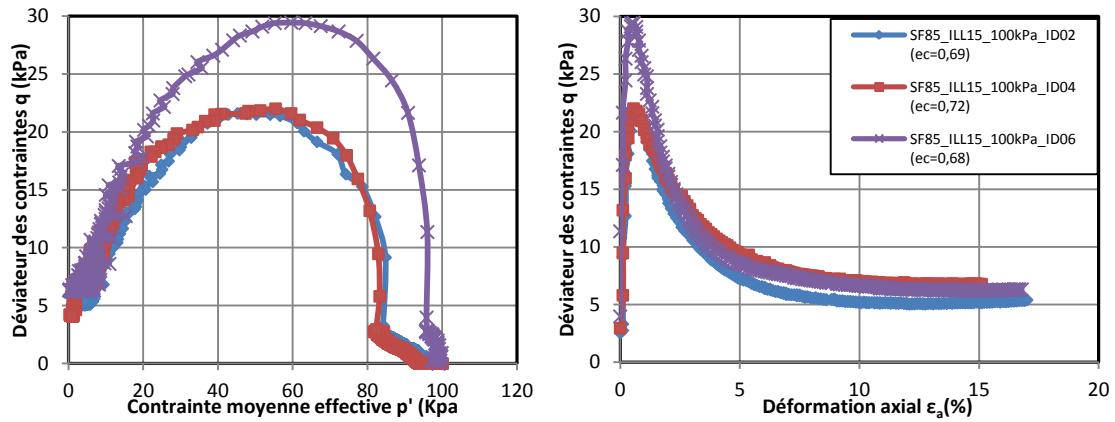


Figure 4 : Influence de l'indice de vide sur le comportement du mélange sable de Fontainebleau et illite Arvel.

5.2. Influence de la pression de confinement

L'influence de la pression de confinement est étudiée en effectuant les essais sur des éprouvettes de même indice de densité aux différentes contraintes de consolidation. Les figure 5 et figure 6 présentent les courbes de cisaillement du sable lâche ($I_{Dini}=0$) de 50 kPa à 600 kPa et du mélange sable-illite moyen lâche ($I_{Dini}=0,4$) respectivement. On note que la valeur de pic de déviateur de contrainte où est initiée la liquéfaction augmente avec l'augmentation de la pression de confinement. De plus, la déformation axiale correspondante semble s'élever légèrement également.

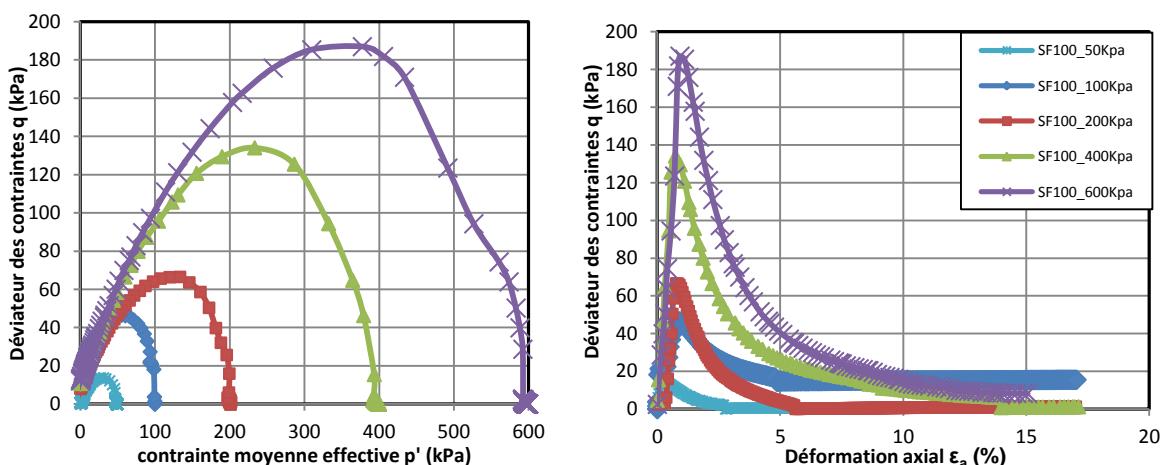


Figure 5: Influence de la pression de confinement sur le comportement du sable de Fontainebleau.

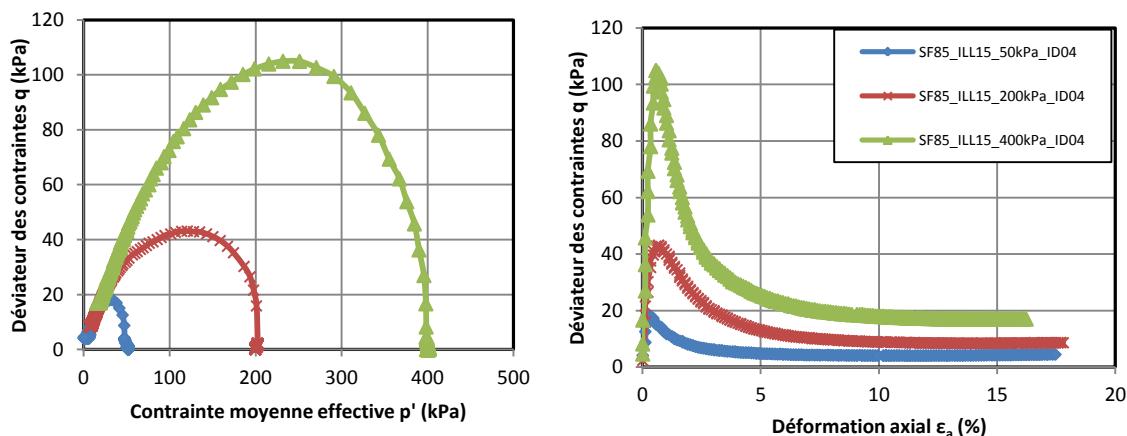


Figure 6 : Influence de la pression de confinement sur le comportement du mélange sable de Fontainebleau et illite Arvel.

5.3. Influence du rapport de surconsolidation

La figure 7 présente le comportement du sable de Fontainebleau lâche ($I_{Dini}=0,2$) aux différentes rapports de surconsolidation (OCR). Les résultats montrent que le rapport de surconsolidation influence significativement la liquéfaction du sol. En effet, le sol normalement consolidé (OCR=1) est liquéfié mais à l'état surconsolidé, il est plus résistant à la liquéfaction. On observe encore le pic de résistance mais après une chute de résistance, le déviateur des contraintes ré-augmente.

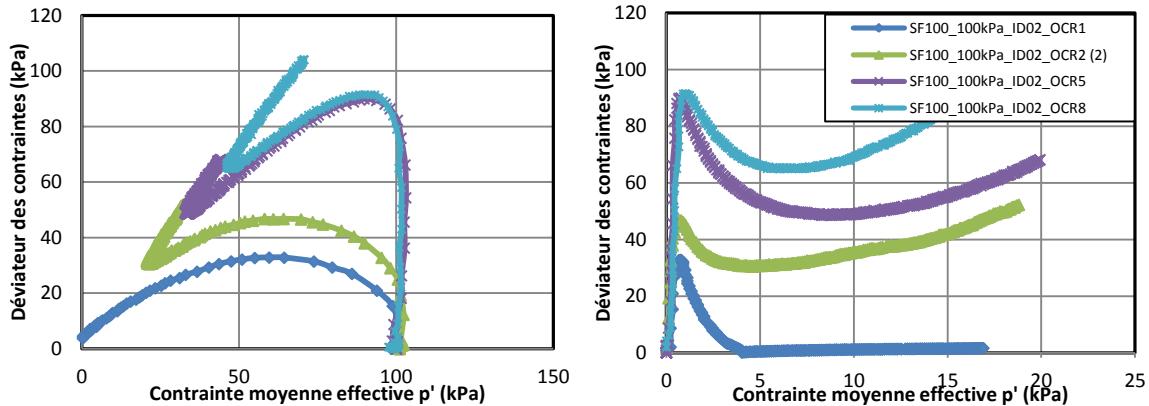


Figure 7 : Influence du rapport de surconsolidation sur le comportement du sable de Fontainebleau.

5.4. Influence de la fraction fine plastique.

La figure 8 montre qu'en ajoutant les fines jusqu'à 15%, la résistance du sol diminue. Les différences les plus significatives apparaissent entre le sable pur et le mélange. Parmi les mélanges, la valeur du pic de résistance bien que différente ne change pas beaucoup. La figure 9 montre un résultat inverse, en continuant à ajouter des fines au-delà de 15%, la résistance du sol augmente.

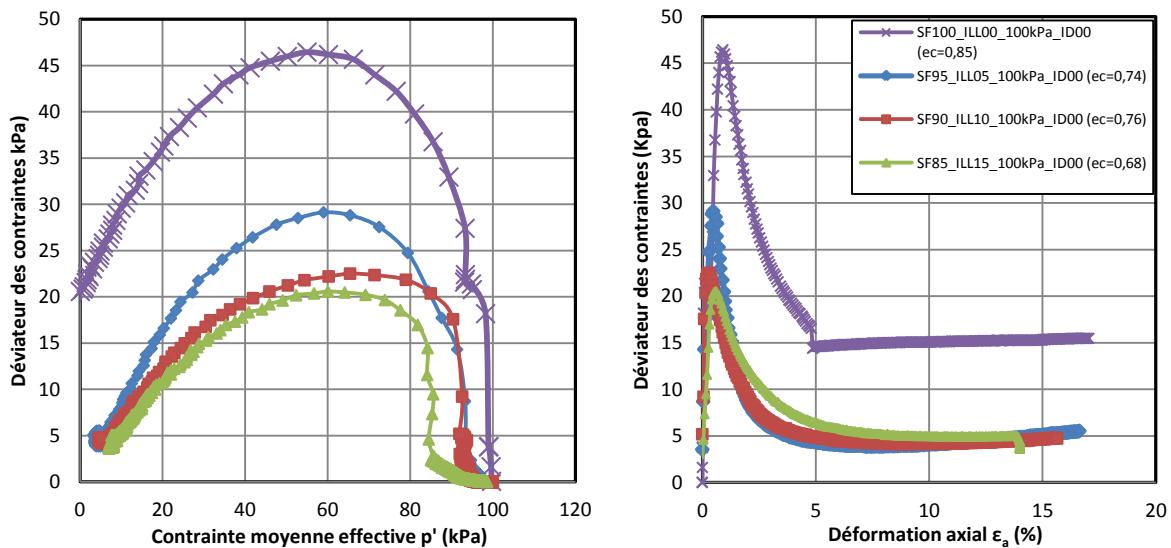


Figure 8: Le comportement du mélange sable et illite plus lâche.

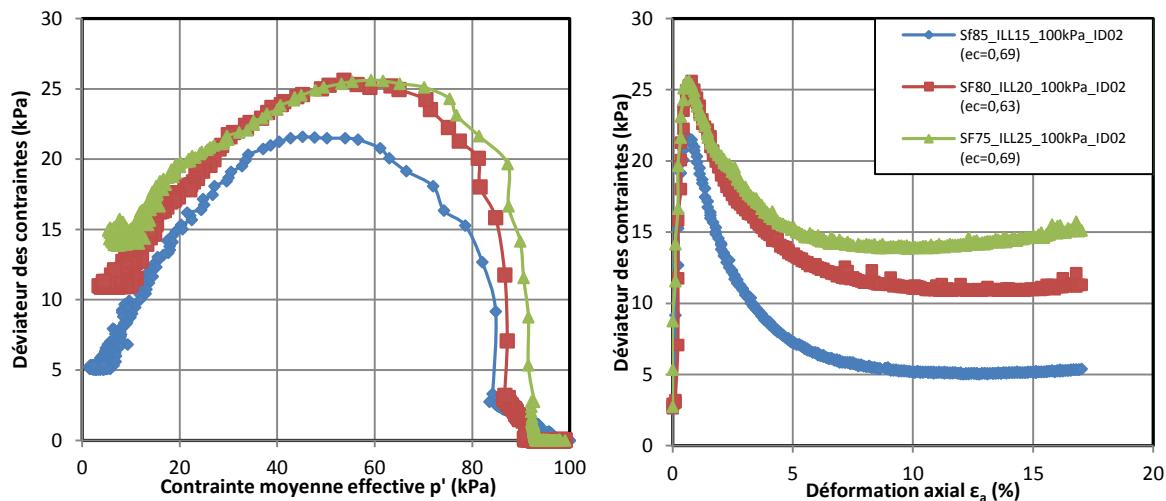


Figure 9: Le comportement du mélange sable et illite lâche.

5.5. Critère chinois

D'après le critère chinois décrit précédemment, un sol n'est susceptible de liquéfier que si il respecte trois conditions : une teneur en fines inférieure à 15%, une limite de liquidité inférieure à 35% et un ratio teneur en eau sur la limite de liquidité supérieur à 0,9 (Seed, 1982). Si nous comparons nos résultats à ce critère (figure 10), on trouve que la plupart des éprouvettes satisfaisant ces conditions sont liquéfiées. Néanmoins, il existe deux éprouvettes sable de Fontainebleau avec le ratio Wc/LL autour de 1 qui ne liquéfient pas. De plus, un mélange avec 20% d'illite est liquéfié et deux autres mélanges présentent une liquéfaction limitée. Le critère chinois n'est donc pas adapté pour ces cas. Toutefois, en raison du nombre d'essais limité, une étude plus approfondie est nécessaire.

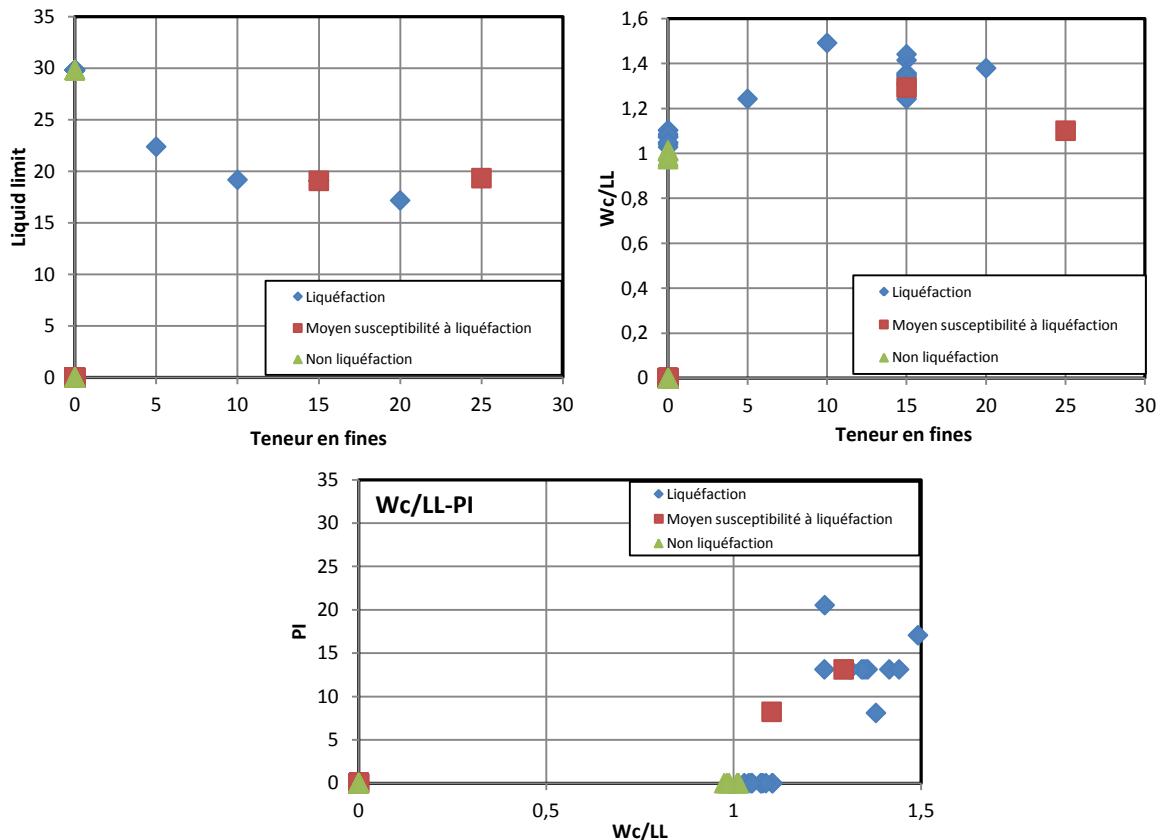


Figure 10: Comparant les résultats au critère chinois.

6. Conclusion

En effectuant des essais triaxiaux monotones sur le sable de Fontainebleau et des mélanges sable-illite, nous pouvons conclure que plus le sol est dense, plus il est résistant à la liquéfaction. Pour le sable très lâche, il est susceptible de liquéfier aux différentes pressions de confinement et la valeur du pic de déviateur de contrainte dépend de la pression de confinement. Toutefois, même à l'état légèrement surconsolidé, le sol ne liquéfie plus. En ajoutant des fines plastiques, la résistance du sol diminue jusqu'à 15% de fines et ensuite, croît. Les résultats indiquent également que le critère chinois n'a pas pu prédire l'ensemble des résultats et que des recherches complémentaires sont nécessaires.

7. Bibliographie

- Benahmed N. (2001). *Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique: application au phénomènes de liquéfaction et mobilité cyclique*,. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées.,
- Boulanger, R. W. (2006). Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(11), 1413-1426.
- Bray, J. D. (2006). Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(9), 1165-1177.
- Hazen, A. (1920). Hydraulic fill dams. *ASCE transactions*, Vol.83, 1713-1745.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Géotechnique* 43, No. 4, 349-415.
- Kodikara, J. S. (1986). Evaluation of plastic limit and plasticity index by cone penetrometer. *Geotechnical Problems and Practices in Foundation Engineering* (pp. 229-233). Colombo, Sri Lanka: Asian Regional Symposium.
- R. Belviso., S. C. (1985). Use of the cone penetrometer to determine consistency limits. *Ground engineering*, 21-22.
- Seed, H. B. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. *EERI Monograph, Berkeley, Calif.*
- Terzaghi, K. &. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. Chichester: Wiley.
- Wang, W. (1979). Some findings in soil liquefaction. *Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China*.
- Wood, D. M. (1978). The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soils. *Ground engineering, volume 11*, 3.
- Youd, T. e. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *J. Geotech. Geoenvir. Eng.* 127(10), 817-833.