
Comportement monotone du sable de Chlef partiellement saturé

Noureddine Della* — Ahmed Arab* — Hanifi Missoum**

* *Laboratoire des Sciences des Matériaux et Environnement, Département de Génie Civil, Université de Chlef, Route de Sendjas BP 151 Chlef 02000 – Algérie, nour_della@yahoo.fr, ah_arab@yahoo.fr*

** *Département de Génie Civil, Université de Mostaganem, Site 1, route de Belahcel BP 300, Mostaganem 27000 – Algérie, hanifimissoum@yahoo.fr*

RÉSUMÉ. Cet article présente une étude en laboratoire de l'influence de la saturation évaluée en terme de coefficient de Skempton B sur le comportement d'un sable granulaire. L'étude est basée sur des essais triaxiaux drainés et non drainés qui ont été réalisés à une densité relative initiale $I_d = 0,50$ et à une pression moyenne effective égale à 100 kPa pour des coefficients de Skempton B variant entre 13 et 90%. L'article est composé de deux parties. La première présente le sable étudié ; la seconde donne une analyse des résultats des essais réalisés et discute de l'influence de la saturation sur les caractéristiques mécaniques du sable. Les essais montrent que l'augmentation du coefficient de Skempton B réduit la dilatance du sol et amplifie la phase de contractance. Elle réduit l'angle de frottement et l'angle de changement de phase contractance-dilatance du sable. L'effort de résistance résiduel diminue avec l'augmentation du coefficient de Skempton B.

ABSTRACT. This paper presents a laboratory study on the influence of the saturation evaluated in terms of Skempton's pore pressure coefficient B on the behaviour of Chlef sand. The study is based on drained and undrained triaxial compression tests which were carried out for Skempton's pore pressure coefficient varying between 13 and 90%. Tests were conducted on medium dense sand samples having a initial relative density $I_d = 0,50$ at an effective stress of 100 kPa. The paper is composed of two parts. The first one presents the characteristics of the sand used in this study, the second provides an analysis of the experimental results and discusses the influence of Skempton's pore pressure coefficient (B) on the mechanical characteristics of the sand. The tests show that the increase in the Skempton's pore pressure coefficient (B) reduces the soil dilatancy and amplifies the phase of contractancy and reduces the frictional and characteristic angle of the sand. The residual strength decreases with increasing of coefficient Skempton's B.

MOTS-CLÉS : sable, monotone, drainé, non drainé, saturation, angle de frottement.

KEYWORDS: sand, monotonic, drained, undrained, saturation, frictional angle.

1. Introduction

Aux alentours de la ville de Chlef (Algérie), on trouve des zones non saturées au dessus de la nappe phréatique qui a subi un rabattement important suite à la sécheresse qui touche la région depuis les années 80. Au cours des décennies passées, les recherches avancées nous ont aidés à mieux comprendre la liquéfaction des sols basée sur des expériences menées en laboratoire, la modélisation physique et l'analyse numérique. La majorité des investigations sur la liquéfaction des sols granulaires a été basée sur le matériau complètement saturé. L'étude de l'influence du degré de saturation sur la liquéfaction des sols présente un intérêt pratique, car on trouve souvent des structures construites au dessus de la nappe ; ce qui implique la présence des sols partiellement saturés. L'incidence d'une saturation partielle sur la résistance cyclique a été abordée d'une manière théorique par Martin et al. (1978). Mullilis et al. (1978) ont examiné l'effet du degré de saturation sur la liquéfaction du sable de Monterrey. Ils ont constaté que la variation du coefficient de Skempton B entre 0.91 et 0.97 n'affecte pas d'une manière significative la liquéfaction de ce sable. Cette influence dépend du type de sol, de la densité et de la pression de confinement initial. Cependant, les résultats des essais in-situ récents incluent les mesures de la vitesse d'ondes de compression (V_p), et indiquent que la condition de saturation partielle peut exister au dessus du niveau de la nappe d'eau pour quelques mètres due à la présence de bulles d'air (Ishihara et al., 2001 et Nakazawa et al., 2004) ou la présence de bulles de gaz dans les sédiments marins et les sables contenant des huiles comme noté par Mathiroban et Grozic (2004). Les effets d'une condition de saturation partielle sur la liquéfaction, ont été abordés par quelques chercheurs (comme par ex. Atigh et Byrne, 2004; Mathiroban et Grozic, 2004 ; Pietruszczak et al., 2003 ; Yang et Sato, 2001). La condition de saturation d'échantillons de sol en laboratoire peut être évaluée en mesurant la valeur du coefficient de Skempton B ou la vitesse d'ondes de compression V_p comme suggéré par Ishihara et al. (2001). In situ, la saturation peut être évaluée par la mesure de vitesse d'onde de compression (V_p). Les résultats d'essais en laboratoire ont montré que la résistance à la liquéfaction des sables augmente quand le degré de saturation diminue (Martin et al. 1978; Yoshimi et al., 1989 ; Bouferra, 2000; Ishihara et al., 2001 et 2004; Yang, 2002; Yang et al.2004; Bouferra et al. 2007).

Mullilis et al. (1978) et Tatsuoka et al. (1986) ont montré que dans le cas des sables lâches, une bonne saturation requiert des valeurs élevées du coefficient B. Par contre, pour des matériaux plus raides, le problème semble moins critique. Shérif et al. (1977) montrent qu'un sable fin ou argileux peut être considérés saturé si la valeur de B dépasse 0,8, Chaney (1978) précise que le coefficient B doit dépasser 0,96 pour que le sol soit bien saturé. Par contre, Giroud et Cordary (1976) notent que pour des valeurs de B supérieurs à 0,85 le degré de saturation est très voisin de 1. Des essais de liquéfaction ont été effectués par Yoshimi et al. (1989) sur le sable de Toyoura de densité moyenne ($I_d = 0,60$) avec des échantillons ayant différents degrés de saturation. Les résultats montrent que le degré de saturation affecte d'une manière sensible la résistance à la liquéfaction des sols: Avec un coefficient B supérieur à

0,8, il suffit d'appliquer trois cycles pour avoir une liquéfaction du sol; par contre, il faut huit cycles pour la liquéfaction du sol ayant un coefficient B proche de 0,5.

Dans cet article, on présente les résultats d'une étude en laboratoire de l'influence du degré de saturation évalué en terme de coefficient de Skempton B variant entre 13 et 90% sur le comportement d'un sable granulaire. Ces essais permettent de mieux comprendre l'influence de la saturation sur le comportement mécanique d'un sable granulaire. L'article est composé de deux parties. Dans la première partie on présente le matériau utilisé, la seconde donne une analyse des résultats expérimentaux des essais réalisés et discute de l'influence du degré de saturation évalué en terme de coefficient de Skempton (B) sur la résistance à la liquéfaction.

2. Matériau utilisé

Les essais ont été réalisés sur le sable de Chlef (Algérie) contenant 0.5% de limon de l'Oued de Chlef qui traverse la ville de Chlef à (ex El asnam, ex Orleanville) à l'ouest d'Alger. La courbe granulométrique du sable utilisé est donnée dans la figure 1. Le sable de Chlef est un sable moyen, arrondi avec un diamètre moyen $D_{50} = 0,45\text{mm}$. Le limon contenu est peu plastique avec un indice de plasticité de 6%. Le tableau 1 donne les caractéristiques physiques du sable utilisé. Les essais ont été réalisés à un indice de densité $I_d = 0,50$ et avec une pression moyenne effective $\sigma'_c = 100\text{ kPa}$ ($\sigma'_c = P - U_{cp}$).

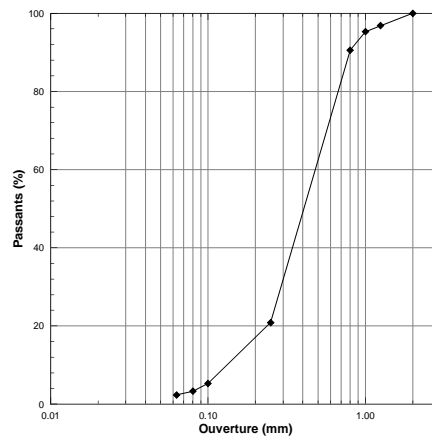


Figure 1. Courbe granulométrique du sable utilisé.

Matériau	e_{\min}	e_{\max}	$\gamma_{d\min}$ (g/cm^3)	$\gamma_{d\max}$ (g/cm^3)	γ_s (g/cm^3)	Cu (D_{60}/D_{10})	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	Forme des grains
O/Chlef	0.535	0.854	1.34	1.73	2.67	3.2	0.45	0.15	Arrondi

Tableau 1. Caractéristiques du sable testé

3. Mode opératoire

Le dispositif expérimental utilisé est présenté dans la figure 2. Il comprend :

- Une cellule triaxiale dynamique de marque GDS 2Hz,
- Deux contrôleurs de pression /volume de marque GDS (200cc),
- Une pompe à vide reliée à un réservoir afin de désaérer l'eau déminéralisée,
- Une centrale d'acquisition,
- Un micro-ordinateur équipé d'un logiciel permettant le pilotage de l'essai et l'acquisition des données.



Figure 2. *Dispositif expérimental utilisé*

3.1. Préparation de l'échantillon

La méthode de préparation utilisée pour la fabrication des échantillons est le déversement à sec où le sol sec est déposé dans le moule à l'aide d'un entonnoir avec un contrôle rigoureux de la hauteur de chute du sable qui doit être quasi-nulle pour les échantillons lâches. Dans le but d'avoir des échantillons homogènes moyennement denses, on a utilisé la méthode préconisée par Ladd (1978) ; cette méthode consiste à partager l'échantillon en plusieurs couches. La densité relative de chaque couche varie de 1% du bas vers le haut. La couche moyenne a la même valeur de la densité relative que l'échantillon ; pour notre cas la couche moyenne a la valeur de $D_r = 50\%$.

Les échantillons utilisés sont cylindriques d'élanement 1 ($\phi=70\text{mm}$ et $H=70\text{mm}$), et Pour s'assurer d'une bonne homogénéité des contraintes et des déformations au sein de l'échantillon plusieurs chercheurs (Lee, 1978; Robinet et al., 1983; Tatsuoka et al., 1984; Colliat 1986, et Al mahmoud 1997) ont insisté sur la

nécessité de réduire les frottements entre l'échantillon et les embases supérieures et inférieures ; ceci peut être obtenu par des embases de surface lisse ou lubrifiée (système d'antifretage). Pour notre cas le système d'antifretage utilisé est représenté sur la figure 3 (Al Mahmoud (1997)). La masse de sable à mettre en place est évaluée en fonction de la densité souhaitée (le volume initial de l'échantillon est connu), l'état de densité de l'échantillon étant défini par la densité relative :

$$I_D = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min}) \quad [1]$$

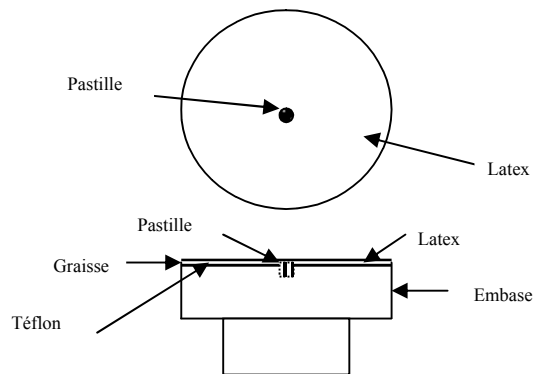


Figure 3. *Système d'antifretage utilisé*

3.2. Saturation de l'échantillon

La saturation est une étape importante dans la procédure expérimentale car de sa qualité dépend la réponse de l'échantillon sous chargement non drainé. Pour obtenir un bon degré de saturation, on utilise la technique du gaz carbonique élaborée par Lade et Duncan (1973). L'échantillon est tout d'abord balayé par du gaz carbonique pendant vingt minutes, ensuite on fait circuler l'eau désaérée et déminéralisée jusqu'à recueillir un volume d'eau supérieur à une fois et demi le volume de l'échantillon. Pour pouvoir obtenir des échantillons avec différents degrés de saturation, on a fait varier le temps de passage du gaz carbonique et la durée de passage de l'eau désaérée à travers l'échantillon.

3.3. Consolidation de l'échantillon

La phase de consolidation consiste à appliquer simultanément une montée de pression dans la cellule par l'intermédiaire du contrôleur de pression/volume (GDS1) et à l'intérieur de l'échantillon (GDS2). L'application d'une contre pression à l'échantillon à l'aide du GDS2 améliore la qualité de la saturation en comprimant les micro-bulles du gaz interstitiel qui restent emprisonnés entre les grains du sol. On maintient les pressions dans la cellule et l'échantillon jusqu'à stabilisation des volumes (cellule et échantillon). La qualité de la saturation est évaluée en mesurant

le coefficient de Skempton (B). Ce coefficient (B) est égal à $\Delta u / \Delta \sigma$. On donne un incrément $\Delta \sigma$ de 100 kPa au GDS1 relié à la cellule et on mesure la variation de la pression interstitielle Δu dans par le GDS2 relié à l'échantillon. La contre pression utilisée est de 400 kPa.

Le degré de saturation est contrôlé lors d'un essai triaxial par le coefficient de Skempton qui peut être lié au degré de saturation par la relation suivante (Lade et Hernandez 1977):

$$B = \frac{1}{1+nK_s} \left(\frac{S_r}{K_w} + \frac{(1-S_r)}{u_a} \right) \quad [2]$$

K_s et K_w désignent les modules de déformation volumiques du squelette solide et de l'eau pure ; n est la porosité du sol, u_a est la pression interstitielle.

4. Résultats des essais réalisés

4.1. Essais de compression drainée

La figure 4 montre les résultats des essais de compression drainée réalisés pour des coefficients de Skempton B compris entre 13 et 90%. On note que le coefficient de Skempton B affecte d'une manière sensible les variations du déviateur (Figure 4a) et de la déformation volumique (Figure 4b). L'augmentation du coefficient de Skempton B de 13 à 90% 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 l'augmentation du coefficient de Skempton B fait retarder l'apparition de la dilatance; l'échantillon avec un degré de saturation B=13% la dilatance apparaît après 3% de déformation axiale, tandis que l'échantillon avec un degré de saturation B=90% on observe une amplification de la phase de contractance et la dilatance est retardée et apparaît après 12% de déformation axiale. La figure 5 montre les courbes de variation des déformations volumiques au changement de phase (contractance-dilatance) et à l'état stable en fonction du coefficient de Skempton B. On remarque que l'écart entre ces courbes décroît avec l'augmentation du coefficient de Skempton B, traduisant la disparition progressive de la phase de dilatance et l'apparition uniquement de la phase de contractance pour l'échantillon avec un coefficient de Skempton B égal à 90%.

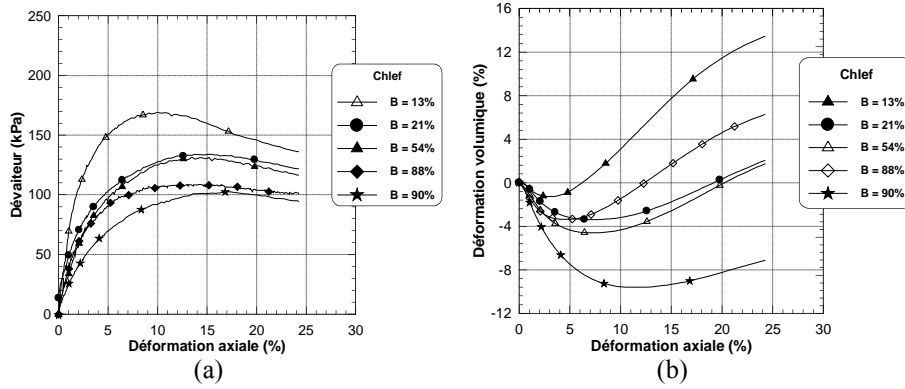


Figure 4. Influence du coefficient de Skempton B sur la réponse drainée du sable de Chlef

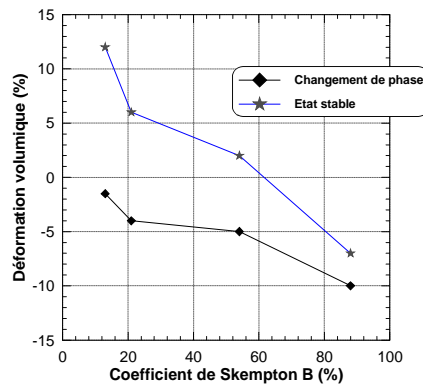


Figure 5. Influence du coefficient de Skempton B sur les déformations volumiques au changement de phase et à la stabilisation

4.2. Essais de compression non drainée

La figure 6 montre les résultats des essais non drainés réalisés pour différentes valeurs de coefficient de Skempton B entre 32 et 90% à une pression de confinement initial de 100 kPa. On note que l'augmentation du degré de saturation caractérisé par le coefficient de Skempton B conduit à une diminution de la résistance du déviateur (Figure 6a) et une augmentation de la pression d'eau (Figure 6b). Cette augmentation de la pression d'eau résulte du rôle du degré de saturation dans l'augmentation de la phase de contractance observé 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 au déviateur comme l'illustre la figure 6a. Le chemin de contrainte dans le plan (p' , q)

montre bien le rôle du degré de saturation dans la réduction de la pression moyenne effective et du déviateur maximal (Figure 6c).

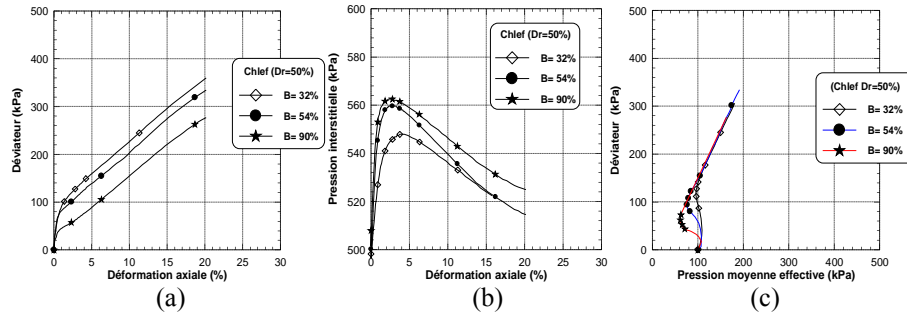


Figure 6. Influence du coefficient de Skempton B sur le comportement non drainé du sable de Chlef

4.3. Influence de la saturation sur les caractéristiques mécaniques

La figure 7a montre l'évolution du module de déformation sécant (q/ϵ_a) en fonction de la déformation axiale (ϵ_a). On observe que ce module décroît avec l'augmentation du coefficient de Skempton B. Cette diminution est très significative jusqu'à une déformation de 10%, ensuite le module sécant tend à se stabiliser. La figure 7b montre l'influence du coefficient de Skempton B sur le module de déformation sécant mesuré à $\epsilon_a = 1\%$. On note que ce module décroît avec l'augmentation du coefficient de Skempton B, ensuite il tend à se stabiliser pour les grandes valeurs de B (Figure 7c) ; pour les grandes déformations, le coefficient de Skempton B influe peu sur le module sécant.

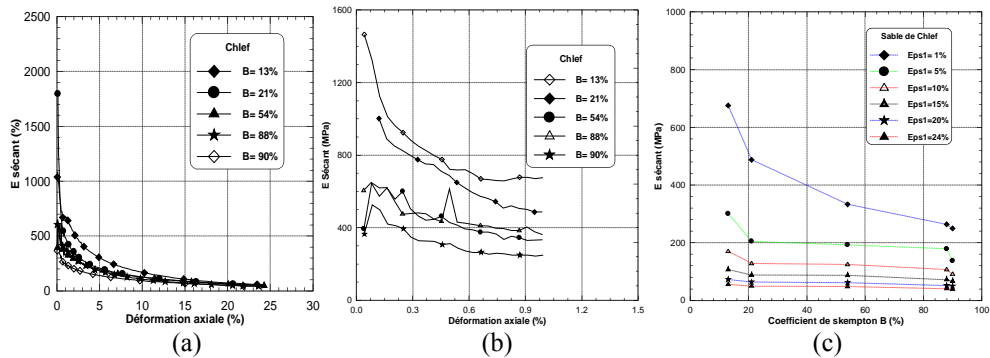


Figure 7. Influence du coefficient de Skempton B sur le module de déformation sécant:

- (a) Variation du module sécant avec la déformation axiale
- (b) Module sécant à $\epsilon_a = 0,01$
- (c) Evolution du module secant (E) avec le coefficient de Skempton B.

La figure 8 montre l'influence du coefficient de Skempton B sur l'angle de frottement à la fin du cisaillement et l'angle caractéristique (changement de phase contractance-dilatance). On remarque que les deux droites traçant l'évolution de l'angle de frottement et l'angle caractéristique sont presque parallèles. On note que l'angle de frottement et l'angle caractéristique décroissent (selon une relation quasi-linéaire) de 24° à 19° et 23° à 19° quand le coefficient de Skempton B croît de 13 à 90% respectivement. La réduction de l'angle de frottement et l'angle caractéristique avec l'augmentation du coefficient de Skempton B expliquent le rôle de la saturation dans l'augmentation de la phase de contractance du sable étudié. La figure 9 montre la variation de l'angle de dilatance (ψ) en fonction du coefficient de Skempton B . On note que cet angle décroît d'une manière quasi-linéaire quand le coefficient de Skempton B croît de 13 à 90%.

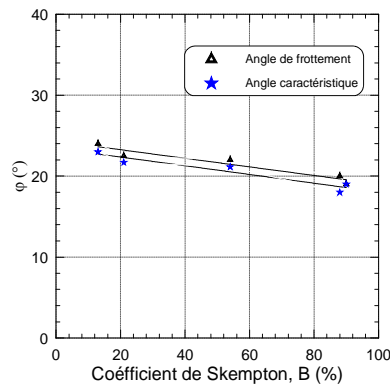


Figure 8. Influence du coefficient de Skempton B sur l'angle de frottement et l'angle caractéristique

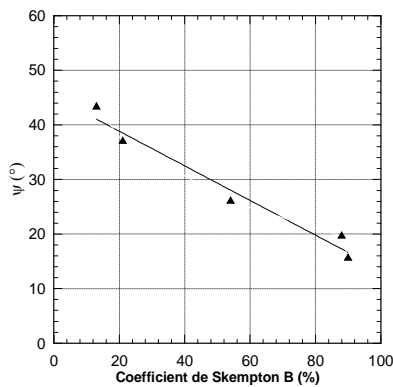


Figure 9. Influence du coefficient de Skempton B sur l'angle de dilatance

4.4. Variation de l'effort résiduel

Quand les sables sont soumis à un cisaillement non drainé ; après le pic de déviateur, la résistance au cisaillement chute à une valeur presque stable sur une large déformation. Conventionnellement, cette résistance au cisaillement est appelée effort résiduel ou l'effort de cisaillement à l'état presque stable (Qss). L'effort résiduel est défini par Ishihara (1993) comme :

$$S_{us} = (q_s/2)\cos\phi_s \quad [2]$$

Où q_s et ϕ_s indiquant le déviateur de contrainte et l'angle de frottement interne mobilisés à l'état presque stable.

La figure 10 montre l'évolution de l'effort résiduel en fonction du coefficient de Skempton B. On note que l'effort résiduel (S_{us}) diminue d'une manière linéaire et significative avec l'augmentation du coefficient de Skempton B résultant du rôle de la saturation quant à l'amplification de la contractance du sol étudié.

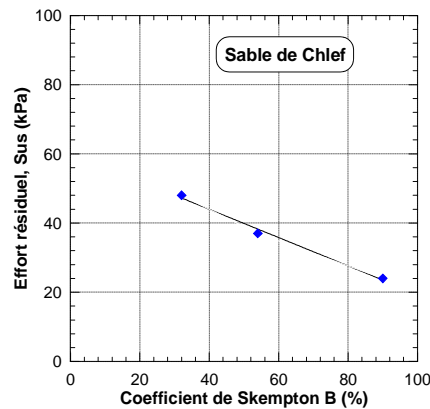


Figure 10. Influence du coefficient de Skempton B sur l'effort de cisaillement résiduel (S_{us})

5. Conclusion

Cet article a comporté une présentation des résultats d'une étude en laboratoire de l'influence de la saturation caractérisée par le coefficient de Skempton B sur le comportement d'un sable granulaire. L'étude a comporté des essais triaxiaux drainés et non drainés qui ont été réalisés à une densité relative initiale $I_d = 0,50$ pour des coefficients de Skempton B variant entre 13 et 90%.

L'étude de l'influence de la saturation sur le potentiel de liquéfaction a été effectuée sur le sable de Chlef en faisant varier le coefficient de Skempton B. Les résultats des essais montrent que la résistance à la liquéfaction augmente avec la diminution du coefficient de Skempton B. Les essais montrent que l'augmentation du coefficient de Skempton induit une diminution de la raideur initiale du sol et de la résistance (déviateur maximal); et accroît la phase de contractance. L'augmentation du coefficient de saturation évalué en terme de coefficient de Skempton (B) affecte d'une manière considérable l'évolution de l'angle de frottement du sable et de l'angle caractéristique (l'angle de frottement et l'angle caractéristique décroissent de 24° à 19° et 23° à 19° quand le coefficient de Skempton B croit de 13 à 90%). Ceci se traduit par un effet important sur le comportement volumique qui se manifeste par une amplification de la phase de contractance lorsque le coefficient de Skempton B augmente. Le module de déformation sécant décroît avec l'augmentation du coefficient de Skempton, ensuite il tend à se stabiliser pour les grandes valeurs de ce coefficient; pour les grandes déformations, il influe peu sur le module sécant.

L'effort résiduel (Sus) diminue d'une manière linéaire et significative avec l'augmentation du coefficient de Skempton B résultant du rôle de la saturation quant à l'amplification de la contractance du sable étudié.

La réduction du coefficient de Skempton, induit une réduction du taux d'augmentation de la pression interstitielle, une amélioration dans l'évolution des caractéristiques mécaniques et de l'effort résiduel du sol et par conséquent une augmentation de la résistance à la liquéfaction de ce sol. Une mauvaise saturation peut écarter tout risque de liquéfaction, ceci peut avoir des applications pratiques dans les zones à haut risque de liquéfaction.

6. Bibliographie

- Al Mahmoud M., Etude en laboratoire du comportement des sables sous faibles contraintes, Thèse de doctorat en génie civil à l'USTL, Lille, 1997.
- Atigh E. and Byrne, P. M., « Liquefaction flow of submarine slopes under partially undrained conditions: an effective stress approach. », *Can. Geotechnical J.*, V. 41, 2004, p.154-165.
- Bouferra R., Etude en laboratoire de la liquéfaction des sols, Thèse de doctorat, Ecole Universitaire des Ingénieurs de Lille USTLille, 2000.

- Bouferra R., Benseddiq N., & Shahrour I., « Saturation preloading effects on the cyclic behaviour of sand », *International journal of geomechanics*, ASCE, 2007, p. 396-401.
- Chaney R.C., « Saturation effects on the cyclic strength of sand », *Proc., Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, vol. 1, ASCE, New York, 1978, p. 342-359.
- Colliat J.L., Comportement des matériaux granulaires sous forte contraintes, influence de la nature minéralogique du matériau étudié, Thèse de doctorat de spécialité, IMG, Grenoble, 1986.
- Giroud J.P. et Cordary D., « Prevision du tassement initial et du tassement différé des fondations superficielles », *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, 135, SP 127, Janvier 1976, p. 105-135.
- Ishihara, K., Tsuchiya, H., Huang, Y. and Kamada, K., «Recent studies on liquefaction resistance of sand effect of saturation», *Proc. 4th Conf. Recent Advances in Geotech. Earth. Engg.*, 2001, *Keynote Lecture*.
- Ishihara, K., Tsukamoto, Y., and Kamada, K., «Undrained behavior of near-saturated sand in cyclic and monotonic loading», *Proc. Conf., Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena*, 2004, p. 27-39.
- Ladd R. S., «Specimen preparation using undercompaction», *Geotechnical testing Journal*, vol.1 n° 1, 1978, p. 16-23.
- Lade P.V. & Duncan J.M., « Cubical triaxial tests on cohesionless soil », *Journal Soil Mech. And Found. Eng. Div. ASCE*, vol. 99, N° SM, 1973, p.793-812.
- Lade P.V. & Hernandez S.B., « Membrane penetration effects in undrained tests », *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol.103, NGT2, February 1977, p. 109-125.
- Lee K.L., « End restraint effect on undrained static triaxial strength of sand », *J. Geotech. Eng. Div.*, Proc. Of ASCE, Vol.104, N° GT6, 1978, p.687-704.
- Martin G.R., Finn W.D.L. & Seed H.D., « Effects of system compliance on liquefaction tests », *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol. CIV, 1978 NGT4.
- Mathiroban S., and Grozic, J., «A model to predict the undrained behaviour of loose gassy sand» *Proceeding 57th Geotech. Conf.*, Session 6G, 2004, p.16-22.
- Mullilis J.P., Townsend F.C., & Horz R.C., « triaxial testing techniques and sand liquefaction », ASTM STP 654, *Dynamic Geotechnical Testing*, 1978, p. 265-279.
- Nakazawa, H., Ishihara, K., Tsukamoto, Y., and Kamata, T., « Case studies on evaluation of liquefaction resistance of imperfectly saturated soil deposits », *Proc., Conf., Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena*, 2004, Germany.
- Pietruszczak, S., Pande, G. and Oulapour M., «A hypothesis for mitigation of risk of liquefaction », *Geotechnique*, 53(9), 2003, p. 833-838.
- Robinet J.C., Mohkam M., Doanh D. & Torrenti J.M., « Amélioration des appareils triaxiaux pour les sols et les bétons », *18ème Colloque annuel du groupe Français de rhéologie, Méthodes et appareils de mesures rhéologiques*, 1983, Paris.

- Sherif A.M., Tsuchiya C. and Isibashi I., « Saturation effects on initial soil liquefaction», *Journal of Geotechnical engineering division*, vol. 103, n° 8, 1977, p. 914-917.
- Tatsuoka F., Maeda S., Ochi K. and Fujii S., « Prediction of cyclic undrained strength of sand subjected to irregular loading», *Soils and Foundations*, vol. 26, n° 2, 1986, p. 73-89.
- Tatsuoka F., Molenkamp F., Torii T., Hino T., « Behavior of lubrication layers of platens in element tests », *Soils and Foundations*, vol. 24, n°1, March, 1984, p.113-128.
- Yang, J., «Liquefaction resistance of sand in relation to P-wave velocity», *Geotechnique*, 52(4), 2002, p.295-298.
- Yang, J., and Sato, T., «Analytical study of saturation effects on seismic vertical amplification of a soil layer. », *Geotechnique*, 51(2), 2001, p. 161-165.
- Yang, J., Savidis, S. and Roemer M., «Evaluating liquefaction strength of partially saturated sand », *Journal of Geotech. and Geoenviron.Engg.*, ASCE, 130(9), 2004, p. 975-979.
- Yoshimi Y. Tanaka K.& Tokimatsu K., « Liquefaction resistance of partially saturated sand», *Soils and foundations*, vol.29, n°3, 1989, p.157-162.