

EFFET DU RAPPORT DE SURCONSOLIDATION SUR LE COMPORTEMENT NON DRAINE DES SOLS

A. Djafar Henni¹, A. Arab¹, M. Belkhatir¹, S. Hamoudi¹, H. Khelafi²

¹ *Laboratoire des sciences des matériaux et environnement. Département de Génie Civil Chlef (Algérie)*
hennidjaafar@yahoo.fr

² *Département de Génie Civil Université des Sciences et Technologie, BP 1505 El – Menouar Oran (Algérie).*

RESUME :

Dans cet article, on présente une étude en laboratoire de l'effet du rapport de surconsolidation (OCR) sur le comportement non drainé d'un sable limoneux. L'étude est basée sur des essais triaxiaux non drainés qui ont été réalisés pour des rapports de surconsolidation ($OCR = 1, 2, 4$ et 8) à des fractions de fines (F_c) dans les mélanges variant entre 0% et 40%. Les essais ont été effectués sur des échantillons ayant une densité initiale $Dr = 50\%$. L'article est scindé en deux parties. La première partie traite les éléments constitutifs du sol ; la seconde partie donne une analyse des essais réalisés et discute de l'influence du rapport de surconsolidation sur la résistance du sol. Les essais montrent que l'augmentation du rapport de surconsolidation (OCR) augmente d'une manière considérable la résistance du sol se traduisant par une augmentation de la dilatance. L'augmentation de la fraction des fines (F_c) de 0 à 40 % augmente la phase de la contractance et par conséquent réduit la phase de dilatance du sol étudié

Mots clés : surconsolidation, non drainé, contractance, dilatance, teneur en fines.

1. Introduction :

En géotechnique les sols surconsolidés sont souvent liés aux actions dues aux déformations et sollicitations qu'ils subissent au cours de leur histoire. Ils sont dû soit à des mouvements de l'écorce terrestre (activité tectonique) , à un apport de surcharge (anthropique ou naturel) , à des actions climatiques provoquées par des cycles de séchages ou à la fusion des glacier .

On les différencie des sols normalement consolidés par la pression agissant à une certaine profondeur appelée pression effective de préconsolidation et déterminée généralement par des essais au laboratoire (oedomètre) ou in-situ (piézocône).

Le rapport de surconsolidation OCR, étudiée par plusieurs auteurs est un paramètre déterminant caractérisant d'une part l'histoire des contraintes et permet d'autre part d'injecter ce facteur dans les études géotechniques pour l'évaluation de la stabilité des fondations et la vérification des tassements.

Biarez et Hicher (1994) définissent le paramètre OCR comme le rapport entre la pression effective maximale à la fin de consolidation à la pression finale à la décharge :

$$OCR = \frac{p'_{max}}{p'_f}$$

Dans ce contexte on cite les travaux réalisés par plusieurs chercheurs relatifs aux essais in-situ à partir du piézocone test sur les dépôts d'argile qui ont bien mis en évidence le caractère influent de l'OCR sur la résistance non drainée des argiles, [Lunne et al., 1989,1997 ; Ladd et al.1977; Andresen et al .1979 ; Sully et al .1988; Larsson et Mulabdic 1991a ; Mayne 1991 ; Chen and Mayne 1994 ; Kurup 1993 ; Tumay et al .1995].

Dans le domaine numérique, Kurup et Dudani (2002) ont permis de mettre au point un modèle de prédiction de OCR basé sur un réseau de neurone artificiel en se référant à une base de données relevant d'essais aux tests par piézocone .Les résultats de leurs travaux sont très satisfaisants. Pijush (2008), à partir d'un modèle numérique a permis de prédire ce paramètre OCR à partir d'un potentiel à support de vecteur machine (SVM).

Pour les sols granulaires composés d'une fraction de fines, les différents travaux consacrés sur la surconsolidation des sables, montrent des aspects plus ou moins divergents lorsque les deux paramètres OCR et les fines sont pris en considération.

Ishihara et Takatsu (1979), Seed et al. (1975), Seed et Peacock (1971) ont étudié l'influence de l'OCR sur la résistance à la liquéfaction. Ils ont constaté que la résistance à la liquéfaction augmente lorsque OCR augmente .Ceci s'accroît avec l'augmentation du pourcentage de fines.

(Bouferra ,2000) ,en réalisant des essais cycliques non drainés sur le sable d'Hostun, a remarqué qu'avec un rapport de surconsolidation de 7 , la liquéfaction est obtenue au bout de 17 cycles, par contre pour un rapport de surconsolidation OCR=1 (normalement consolidé), la liquéfaction est atteinte durant 6 cycles.

Sekiguchi et al (1988), par le biais d'un modèle LAPES 1-D à comportement élasto-plastique du sable, a étudié la surconsolidation en injectant dans le modèle un paramètre décrivant l'histoire contrainte – déformation. Ils ont constaté que :

- La réponse du sol dépend fortement du rapport de surconsolidation OCR.
- Plus le rapport de surconsolidation (OCR) augmente plus le développement de la pression interstitielle reste faible.

Récemment Khin Swe Tint et al. (2007, 2009), en réalisant des essais triaxiaux drainés et non drainés sur le sable de Nakdong River, ils ont constaté que la résistance à la liquéfaction diminue progressivement lorsque OCR augmente.

Tout au long de ces travaux réalisés dans le domaine de la surconsolidation des sables, le but de cet article permet de donner un éclaircissement sur quelques résultats controversés rencontrés dans la littérature.

2. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans le cadre de notre travail sont principalement composés du sable de Oued Chélif et d'un limon d'Oued Chélif.

• **Le sable d'Oued Chélif :**

Le sable d'Oued Chlef est un matériau alluvionnaire prélevé sur le lit même de l'oued dont le cours d'eau passe dans la région de Chlef (Algérie); (Ville sévèrement touchée par le séisme du 10.10.1980, dont la Magnitude évaluée est de l'ordre de 7.3 à l'Echelle de Richter).

Les caractéristiques physiques de ce sable ainsi que les mélanges à Fc= 10, 30 et 40% de fines sont présentées dans les tableaux 1 et 2.

Le sable possède un diamètre moyen $D_{50} = 0.41$ mm de coefficient d'uniformité $C_u = 2.77$ et de compacité maximale et minimale de 0.841 et 0.533 respectivement .Le poids spécifiques des grains solides est de 26.80 kN/m^3 . Les courbes granulométriques des deux matériaux sont reportées dans la figure 1 .

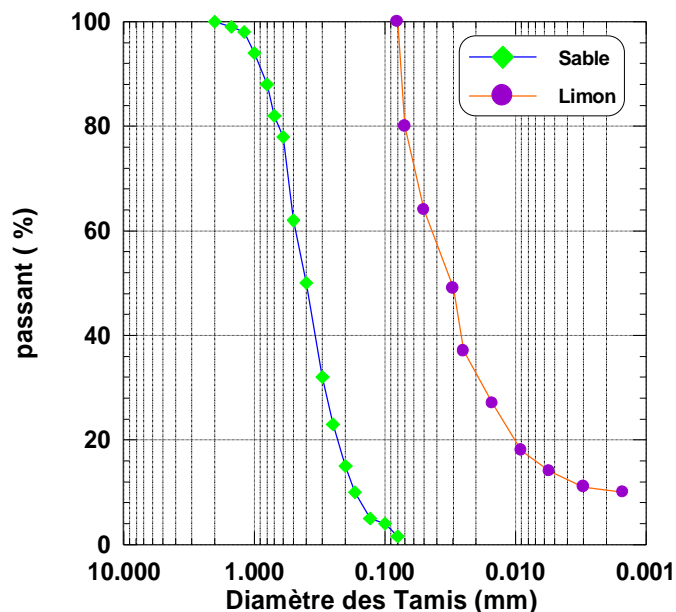


Fig 1 : Courbes granulométriques des sols étudiés

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du sable

Matériaux	γ_s [kN/m ³]	e_{max}	e_{min}	e (global)	d_{50} (mm)	d_{10} (mm)	$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	forme
Sable propre	26.80	0.854	0.535	0.694	0.41	0.18	2.77	arrondie

Tableau 2 : Caractéristiques physiques des mélanges.

Fraction Fines (%)	γ_s [kN/m ³]	e_{max}	e_{min}	e (global)	γ_{dmax} [kN/m ³]	γ_{dmin} [kN/m ³]
10%	26.82	0.798	0.472	0.635	18.22	14.92
30%	26.86	0.718	0.412	0.565	19.02	15.63
40%	26.88	0.732	0.478	0.605	18.19	15.52

• **Le Limon :**

Le Limon utilisé dans cette étude est matériau récupéré du tamisat à 80 µm du sable de l'Oued Chlef. Ses caractéristiques physiques sont reportées dans le tableau 3.

L'indice des vides global ou de fabrication (e) est un paramètre très important permettant de bien caractériser les sols et de nous informer sur la réponse en condition non drainée des différents mélanges.

Tableau 3: Caractéristiques physiques du Limon.

Matériau	γ_s [kN/m ³]	e_{max}	e_{min}	γ_{dmax} [kN/m ³]	γ_{dmin} [kN/m ³]	D ₅₀ [mm]	I _p [%]
Limon	27.0	1.42	0.72	15.65	11.15	0.031	5

L'observation effectuée par Microscope Electronique à Balayage (MEB), présentée sur la figure 2, montre des formes typiques du sable et les particules limoneuses fig.2a et b. Les photos font apparaitre une texture microscopique des grains de forme arrondis à sub-arrondis et composés en majorité de Silice (Si) et de Calcium (Ca), mais en quantité relativement faible en Aluminium (Al) et magnésium (Mg) fig2.c.

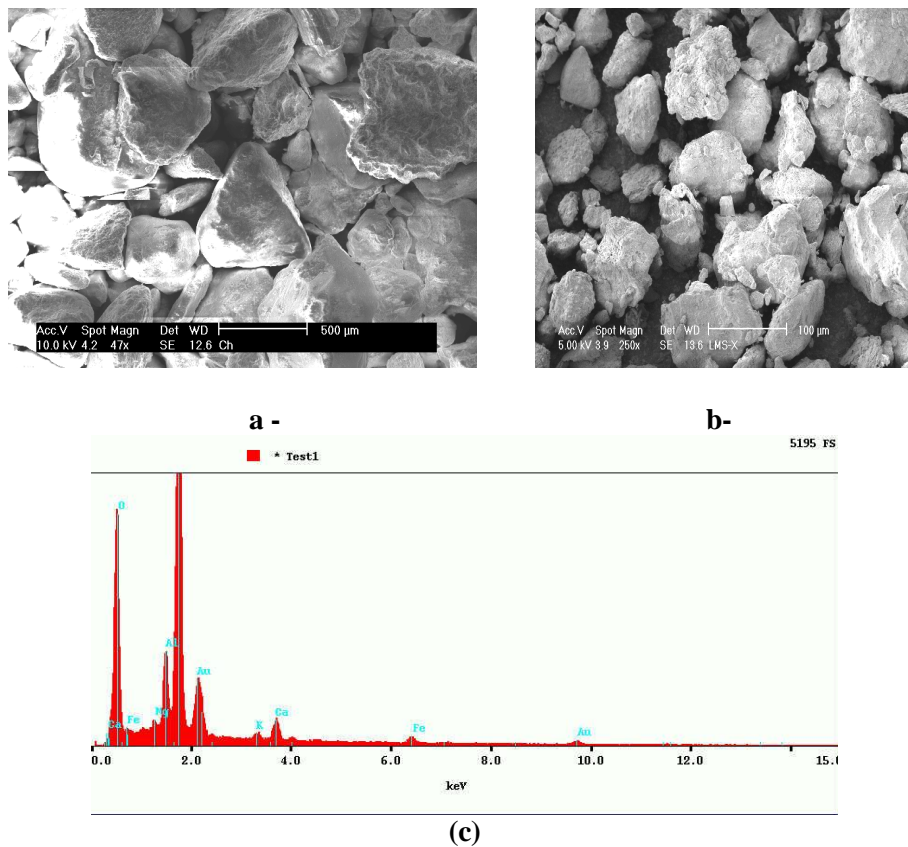


Fig 2 : Photos du sable de Chlef (a) et Limon (b) au MEB
 (c) Diffraction au Rayon X du Limon de l'Oued Chlef

3. Dispositif expérimental et mode opératoire :

3.1 Le dispositif expérimental :

Il est composé essentiellement en :

- Une cellule triaxiale type GDS 2 Hz
- Deux contrôleurs de pressions / volumes qui permettent d'assurer le confinement de l'échantillon et le contrôle de sa variation volumique.
- Une pompe à vide reliée au réservoir d'eau afin de désaérer l'eau déminéralisée
- Le chargement axial est assuré par le déplacement vertical du plateau à la base de la cellule piloté par un micro ordinateur permettant l'acquisition des données.

3.2 Préparation des échantillons :

Les échantillons ont été préparés à partir d'un mélange sable –limon de densité relative initiale $D_r = 50\%$. Les fines limoneuses sont faiblement plastiques ($I_p = 5\%$) et ont été recueillies sur le tamis d'ouverture 0.08 mm (80 μ m). Le mélange a été réalisé pour des fractions $F_c = 0$ (sable propre), 10, 30 et 40 %.

Les échantillons sont de forme cylindrique de diamètre 70 mm et 70 mm de hauteur. La mise en place de l'échantillon dans le moule a été réalisée selon la méthode de Ladd (1978), modifiée par Chan (1985), qui consiste à diviser la quantité totale du matériau en plusieurs couches successives et déposée dans le moule à des densité croissante du bas vers haut. Dans le but d'avoir des échantillons de densité homogène, la densité de chaque couche varie de 1% du bas vers le haut.

3.3 Saturation :

L'étape de saturation comporte trois phases essentielles :

- La circulation du CO₂ à travers l'échantillon pendant 20 à 30 minutes ; cette technique a été initiée par Lade et Duncun (1973).
- Circulation désaérée à travers l'échantillon avec un gradient de 1 pendant 45 à 60'.
- Application d'une contre pression de saturation au GDS2 de 400 kPa.

3.4 Consolidation

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 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. Pour notre travail, les essais sont poursuivis si le coefficient de Skempton (B) est supérieur à 91%. La contre pression utilisée est de 400 kPa.

3.5 Phase de la Surconsolidation :

Pour les rapports de surconsolidation, on applique une montée en pression jusqu'à la valeur requise, ensuite on décharge pour avoir le rapport de surconsolidation désiré.

Tous les échantillons sont consolidés isotropiquement avec une contrainte effective initiale $\sigma_v = 100, 200, 400$ et 800 kPa, ensuite on décharge jusqu'à une contrainte latérale égale à 500 kPa pour avoir une contrainte effective finale $\sigma_v = 100$ kPa afin d'obtenir des rapports de surconsolidations OCR = 1, 2, 4 et 8 respectivement. Voir tableau (4).

La qualité de la saturation est évaluée en estimant le coefficient de Skempton $B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$; on passe à

l'étape suivante de cisaillement dans le cas où $B \geq 0.91$.

4- Résultats des essais réalisés en compression non drainée :

Les figures 3,4, 5 et 6 montrent les résultats des essais de compression non drainés réalisés à différentes fractions de fines (0 à 40%) et avec différents rapports de surconsolidation (OCR) variant de 1 à 8. On note que la résistance au cisaillement caractérisée par le déviateur augmente d'une manière très sensible avec l'augmentation du rapport de surconsolidation (OCR). Cette augmentation de la résistance devient très significative quand la fraction des fines (FC) augmente de 10 à 40% (fig3a, 4a, 5a et 6a). On constate aussi que la variation de la pression interstitielle diminue avec l'augmentation du rapport de surconsolidation (OCR), cette diminution résulte de la dissipation de pression interstitielle lors de la phase de surconsolidation (fig3b, 4b, 5b et 6b).

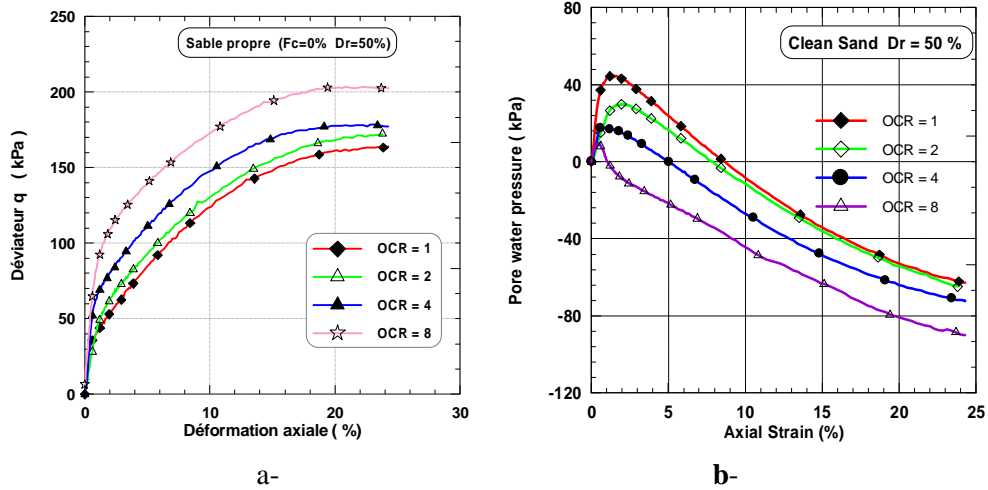


Fig 3 : Réponse non drainée du Sable propre d'Oued Chlef :

a-Déviateur –déformation axiale b-Variation de pression –Déformation axiale.

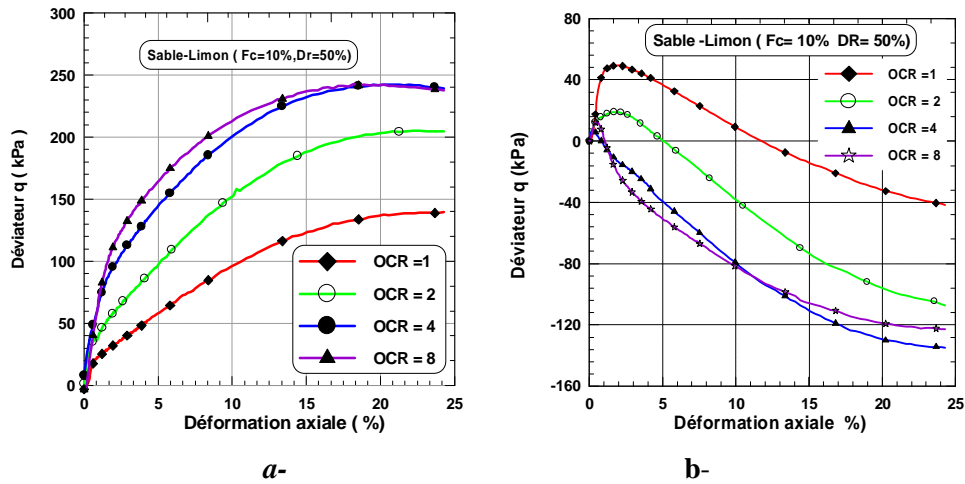


Fig 4 : Réponse non drainée des mélanges à 10% de limon .

a-Déviateur –Déformation axiale b- Variation de pression – Déformation axiale

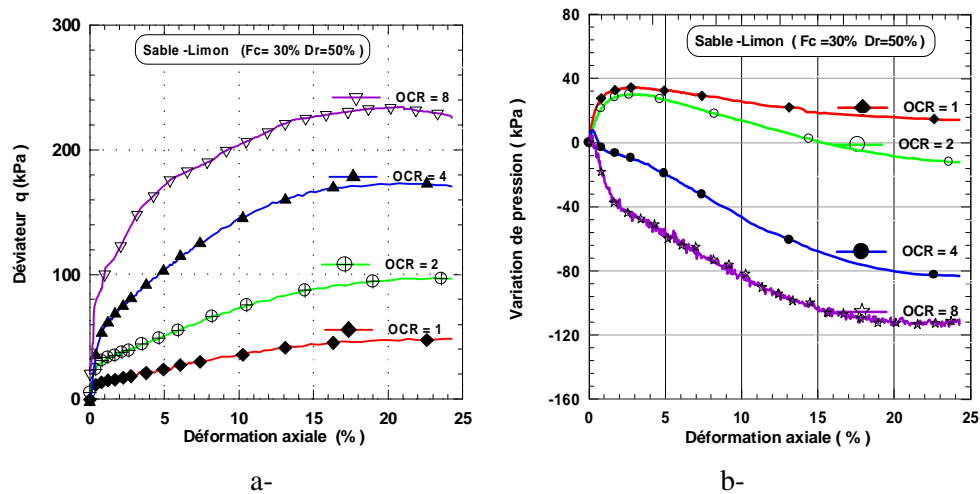


Fig 5 : Réponse non drainée des mélanges à 30 % de Limon

a- Déviateur- Déformation axiale b-Variation de pression – Déformation axiale

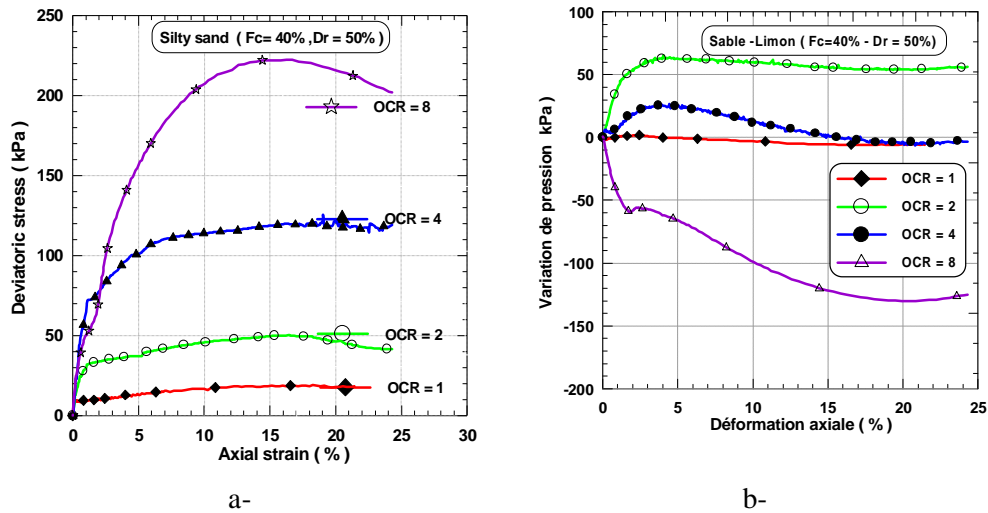


Fig 6 : Réponse non drainée des mélanges à 40 % de Limon

a-Déviateur- Déformation axiale b-Variation de pression – Déformation axial

La figure 7.a montre l'évolution du déviateur en fonction de la fraction des fines (0 à 40%). On note que la résistance du déviateur au pic augmente quasi-linéairement pour un même essai et diminue lorsque $OCR \geq 2$ avec l'augmentation de la teneur en fines. Ceci résulte explicitement aux rôles des fines dans la contractance dans les mélanges.

La fig 7.b illustre la variation du déviateur au pic en fonction de l'angle de frottement interne φ° . On remarque que la résistance au pic devient insensible et indépendante de l'OCR lorsque l'angle de frottement augmente. Une seule relation représente les différents mélanges pour des OCR variant de 1 à 8.

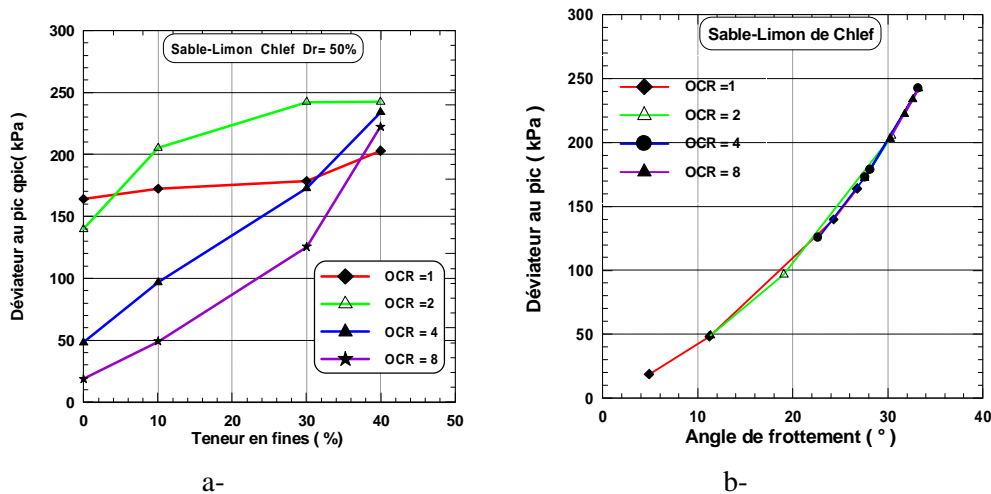


Fig 7 : Variation du Déviateur au pic en fonction de

a- teneur en fines b – angle de frottement interne φ° .

Les figures 8.a et 8.b montrent les variations de l'angle de frottement interne φ° en fonction de la teneur en fines (fig.8a) et l'indice des vides global (e).

On note dans la fig 8.a que l'angle de frottement φ° diminue pour même essai à OCR fixé mais augmente tant que la valeur de l'OCR augmente de 1 à 8.

Dans la fig 8.b, on remarque que l'angle de frottement interne ϕ° ne reflète en aucune manière la réponse des mélanges lorsque l'indice des vides global augmente avec l'augmentation de OCR. Ceci peut être interprété par la non considération de cet indice dans la caractérisation des différents mélanges.

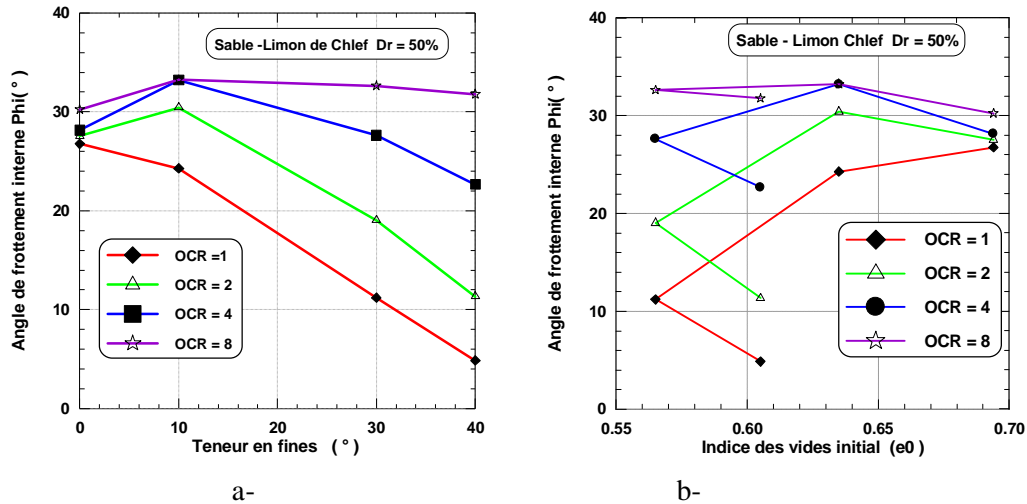


Fig 8 : Variation de l'angle de frottement interne ϕ° en fonction a- de la teneur en fine (a) et de l'indice des vides initial (b).

7. Conclusion :

Ce travail comporte une présentation des résultats d'étude expérimentale en laboratoire de l'influence du rapport de surconsolidation sur le comportement d'un sol. L'étude a comporté des essais triaxiaux non drainés qui ont été réalisés à une densité relative $D_r = 50\%$ pour des fractions de fines variant entre 0 (sables propre) et 40% et avec un rapport de surconsolidation (OCR) variant de 1 à 8.

Les résultats montrent que l'angle de frottement augmente avec l'augmentation du rapport de surconsolidation et diminue avec l'augmentation de la fraction des fines. Cette diminution 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.

L'augmentation du rapport de surconsolidation (OCR) induit une augmentation de la résistance au cisaillement qui se manifeste par une augmentation du déviateur et une diminution importante de la pression interstitielle. Cette diminution résulte de la forte dissipation de la pression interstitielle lors de la phase de surconsolidation.

La résistance au pic traduit augmente pour un même OCR et diminue lorsque $OCR \geq 2$ à différentes fractions de fines. Mais on constate l'unicité d'une relation à la résistance au cisaillement quand l'angle de frottement augmente à différents valeurs de OCR.

L'angle de frottement interne caractérise une légère augmentation à différents rapports de surconsolidation OCR variant de 1 à 8 et ce à différents mélanges, mais ne reflète en aucune manière le comportement global de nos matériaux lorsque l'indice des vides initial (global) augmente.

Références :

- Andresen .A ., Berre .T., Kleven .A ., and Lunne .T.(1979) : "Procedures used to obtain soil parameters for foundation engineering in North Sea " Mar.Geotech .3(3) 201-266.
- Bouferra Rachid (2000): « Etude en laboratoire de la liquéfaction des sols», Thèse de doctorat, Ecole Universitaire des Ingénieurs de Lille USTLille, 2000, p. 110.
- Biarez .J et Hicher,P.Y (1994) " Elementary mechanics of soil behavior , saturated remolded soils ." A.A .Balkema ,Rotterdam
- Chan C.K. (1985): « Instruction manual, CKC E/P cyclic loading triaxial system user's manual», Soil Engineering Equipment Company, San Francisco.

- Chen , B.S.Y .and Mayne .P.W .(1994) "Profiling the OCR of clays by piezocone tests ".Rep .N0.CEEGEO 94-1 .Georgia Institute of technology .Atlanta .
- Ishhara , K. et Takatsu,H(1979) .Effects of overconsolidated and k_0 conditions on the liquefaction characteristics of sands .Soils and Foundations ,15(1) : 29-44.
- Khin Swe Tint ,Young Su Kim,In-Shik Seo ,and Das-Man Kim (2007) " Shear behaviour of overconsolidated Nakdong River sandy silt ". KSCE Journal of Civil Engineering .Vol 11 N°5 pp 233-244.
- Khin Swe Tint ,SeungRae lee,Young Su Kim (2009) : "Comparison between shear behaviour of overconsolidated Nakdong River Sandy silt and silty sand . Marine Georesources and Geotechnology 27:3,217-229.
- Kurup .P.U(1993) ."Calibration chamber studies of miniature piezocone penetration tests in cohesive soil specimes ." PhD .Dissertation ,Louisiana State University , Baton rouge .La
- Kurup , P.U and Dudani, N.K (2002) ." Neural networks for profiling stress history of clays from PCPT data ." J.Geotech .Geoenviron .Eng ., 128 (7) .569-579.
- Ladd R.S. (1978) : « Preparing test specimen using under compaction», Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 1, pp. 16-23.
- Larsson,R .,and Mulabdic.M(1991a)."Piezocone test in clays."Rep.42,Swedish Geotechnical Institute ,Linkoping, Sweden .
- Lunne ,T, Lacasse, S., and Rad , N.S (1989) " SPT ,CPT , presumed testing and recent developpment on in situ testing of soils ." Proc ,12 th Int .Conf . On soil mechanics and fondation Engineering .Vol.4 , Balkema , Rotterdam .The Netherlands , 339- 403 .
- Lunne .T .,Roberston.P.K , and Powell .J.J.M (1997) " Cone Penetration testing : In Geotechnical pactice Blackie Academie and Professional , London, UK .
- Ladd ,C.C., Foot , R ., Ishihara , K., Schlosser ,F ., and Poulos , H.G .(1977) ." Stress deformation and strenght characteristics state of the art report " Proc.,9th Int Conf on soil Mechanics and Foundation Engineering , Vol .2 , 421-494 .
- Lade P.V. & Duncan J.M. (1973): « Cubical triaxial tests on cohesionless soil» Journal Soil Mech. And Found. Eng. Div. ASCE, vol. 99, N° SM, pp.793-812.
- Mayne .P.W (1991) "Determination of OCR in clays by PCPT using cavity expansion and critical state concepts 'Soils Found , 31(2) , 65-76.
- Pijush Samui , Sitharam, T.G , Kurup , P.U (2008) " OCR Prediction Using Vector Machine Based On Piezocone Data " Journal of Geotechnical and Geoenvironmental ,ASCE , 894-897 .
- Seed H.B., Idriss I.M. & Lee K.L. (1975): « Dynamics analysis of the slide in the lower San Fermondo dam during the earthquake of February 1971», Journal Geotechnical Engineering, division ASCE, vol. 101, GT 9, PP. 889-911.
- Seed H.B & Peacock W.H. (1971): « Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics», Journal of the Soils Mechanics and Foundation Division. ASCE, vol.97 (8), 1099-1119.
- Sekiguchi,K.,Oka ,F.,et Oishi,H.[1988]"Liquefaction analyses of layered sans deposits considering overconsolidated ratio "In Proc .Ninth World Conference on Earthquake Engineering , Tokyo-Kyoto, JAPAN ,volume 3,page 279-284 .
- Sully.Y.P ., Campanella ,R.G,and Robertson,P.K(1988) "Overconsolidated ratio of clays from penetration pore pressures ." J,Geotech.Engrg., 114(2).209-216.
- Tumay ,M.T.,Kurup ,PU, and Voyiadjis.G.Z.(1995) "Profiling OCR and K_0 from piezocone penetration testing test " Proc. , Int .Symp .on Cone penetration testing .Vol.95 .SGF Report PCPT data ." J. Geotech .Geoenviron, Eng., 128 (7) . 569-579.