

Laboratory study of overconsolidated ratio of the undrained soil behavior.

Etude en laboratoire de l'effet du rapport de surconsolidation sur le comportement non drainé des sols.

A. Djafar Henni ^{1*}, A. Arab ¹ and H. Khelafi ²

¹Laboratoire des sciences des matériaux et environnement .Faculté des sciences et science de l'Ingénieur .Département de Génie Civil , BP 151 route de Sendjas Chlef (Algérie)

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

*Auteur Correspondant

Abstract. In this paper, we present a laboratory study of the influence of overconsolidation ratio on the undrained behavior of silty sand. This study is based on the undrained triaxial tests which were performed for the overconsolidation ratio at OCR = 1, 2, 4 and 8, with fractions of fines of mixture varying between 0 % and 40 %. Tests were carried out on samples with an relative density $D_r = 50\%$ and confinement pressure $\sigma'_c = 100$ kPa . The article is divided into two main parts. The first one presents the soils studied and the second one gives an analysis of the results and discusses the influence of overconsolidation ratio on the shear strength of the soil. The tests show that the shear strength of the soil increases with increasing overconsolidation ratio, resulting of in an increase of dilatancy . Increasing the fines content (F_c) ranging from 0 to 40 % , increases the phase of contractancy and consequently reducing the phase of dilatancy of the tested soil . A decrease in angle of internal friction (φ°) is due to a high content of fines ($F_c = 40\%$) and at OCR = 1 (soil normally consolidated) .

Résumé. Dans cet article, on présente une étude en laboratoire de l'influence du rapport de surconsolidation 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 particules du mélange variant entre 0% et 40% .Les essais ont été effectués sur des échantillons ayant une densité initiale $D_r = 50\%$. L'article est scindé en deux parties principales. La première partie présente les sols étudiés ; 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) fait croître 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 .Une décroissance de l'angle de frottement φ° est due à une forte teneur en fine ($F_c = 40\%$) et à OCR = 1 (sol normalement consolidé) .

1 Introduction

L'évaluation de l'histoire des contraintes et/ou le rapport de surconsolidation (OCR) a été largement exploré dans le domaine de la mécanique des sols. Skempton [1] qui fût l'un des pionniers de la recherche dans les domaines des glissements de terrains et de la mécanique des sols en général, concluait que l'arrangement des particules post-contractance d'une masse de sol surconsolidé reste toujours dense en comparaison à un sol normalement consolidé soumis à la même contrainte normale.

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 dus soit à des mouvements de l'écorce terrestre (activité tectonique ou sismique ou solifluxion gravitaire), à un apport de surcharge (anthropique ou naturel), à des actions climatiques provoquées par des cycles de séchages ou à la fusion des glaciers.

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 [2] définissent le paramètre OCR comme le rapport entre la pression effective maximale à la fin de consolidation à la pression finale à la décharge :

Pour les sols granulaires composés d'une fraction de fines, les différents travaux consacrés à 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 [3], Seed et al. [4], 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) [5] ,en réalisant des essais cycliques non drainés sur le sable d'Hostun , a remarqué qu'avec un rapport de suconsolidation 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 .

Récemment Khin Swe Tint et al. [6,7], 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 lorsqu'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

2.1 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 où la Magnitude ayant été évaluée à 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.

Le sable possède un diamètre moyen $D_{50} = 0.41$ mm de coefficient d'uniformité $C_u = 2.77$, d'indice des vides maximale et minimale de 0.841 et 0.533 respectivement. Le sable est de symbole SP en se référant à la classification Américaine USCS. Le poids spécifiques des grains solides est de 26.80 kN /m³. Les courbes granulométriques du sable propre, du limon et les mélanges sont reportées dans la figure 1 .

INVACO2

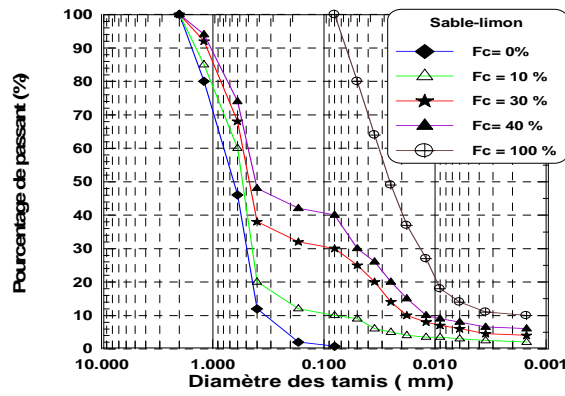
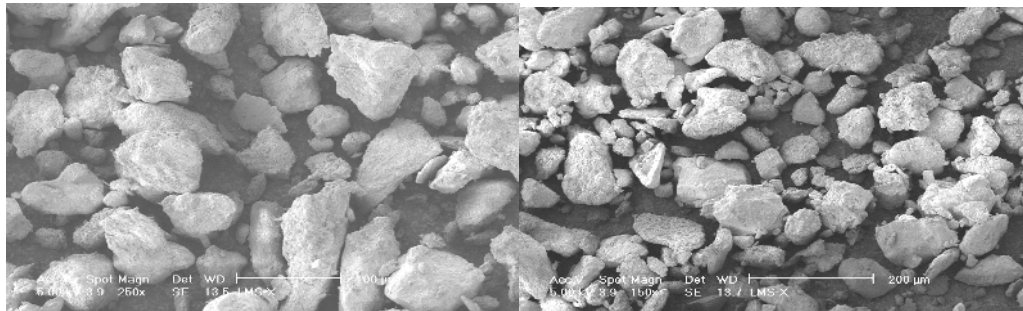


Fig. 1. Courbes granulométriques des sols étudiés

2.2 Le Limon

Le Limon utilisé dans cette étude est récupéré du tamisat à 80 μm du sable de l'Oued Chlef. Ses caractéristiques physiques sont reportées dans le tableau 3 où son poids spécifique est de 27 kN/m^3 , son diamètre moyen $d_{50} = 0.025$ et d'indice de plasticité $I_p = 5$ (faiblement plastique). Les valeurs des indices des vides min et max sont respectivement 0.72 et 1.42. Les différentes caractéristiques physiques du limon sont reportées dans le tableau 1.

La figure 2 montre une vue microscopique réalisée grâce au microscope électronique à balayage sur du sable d'Oued Chlef (fig 2. a) et les fines limoneuses (fig2.b), utilisées dans les mélanges. En grande partie, la composition minéralogique indique une proportion élevée de silice (SiO_2) de l'ordre de 60% et les autres composantes telles que K, Ca, Mg se réduisent à des pourcentages infimes de l'ordre de 0.14%.



(a)

(b)

Fig. 2. Photos relevées au microscope électronique à balayage (MEB),
Sable fig.3a, limon Fig.3b

Tableau 1. Propriétés Physiques des matériaux étudiés

N°	Mélanges	USCS	γ_s [kN/m^3]	e_{max}	e_{min}	e	D_{50} [mm]	D_{10} [mm]	C_u	C_c	Forme
1	F 0	SP	26.80	0.854	0.535	0.694	0.66	0.32	2.50	0.97	arrondi
2	F 10	SP- SM	26.82	0.798	0.472	0.635	0.55	0.80	0.75	0.42	-
3	F 30	SM	26.86	0.718	0.412	0.565	0.48	0.018	30.55	0.64	-
4	F 40	SM	26.88	0.732	0.478	0.605	0.41	0.012	41.66	0.41	-
5	F100	ML	27.0	1.42	0.72	1.07	0.025	0.0016	18.75	4.69	-

3 Programme expérimental et mode opératoire

Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule triaxiale classique équipée des contrôleurs de pressions (GDS) qui permettent d'assurer le confinement de l'échantillon et le contrôle de sa variation volumique. Les échantillons sont de dimensions 70 X 70 mm, préparés à densité relative constante ($D_r = 50\%$) et soumis à un confinement constant $\sigma'_c = 100$ kPa. Les fines limoneuses présentant une plasticité faibles ($I_p = 5\%$), sont additionnées au sable de l'Oued Chélif à des proportions variant entre 0% (sable propre) à 40% de limon. Le mélange des deux matériaux est obtenu par malaxage pour assurer une bonne homogénéité. La mise en place des échantillons dans le moule a été réalisée selon la méthode de Ladd [8], modifiée par Chan [9] qui consiste à diviser la quantité totale du matériau en plusieurs couches successives (dans notre étude on a pris sept couches) et déposée dans le moule à des densité croissante du bas vers le haut. La saturation de nos échantillons a été initiée suivant la méthode de Lade et Duncun [10] (circulation du CO₂ à travers l'échantillon puis passage de l'eau désaérée pendant 45 à 60). La consolidation des échantillons a été faite par chargement successif de 100, 200, 400 et 800 kPa puis un déchargement à la contrainte de confinement actuelle de 100 kPa pour avoir des OCR de 1,2,4 et 8. Ensuite on passera à l'étape suivante du cisaillement en s'assurant toutefois que tous nos échantillons possédaient un coefficient de Skempton $B \geq 0.97$.

4 Discussion des résultats

4.1 Influence du rapport de surconsolidation sur la résistance des mélanges

Les figures 3 et 4, montrent les résultats des essais de compression non drainés réalisés à différentes fractions de fines (0 et 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 dans les mélanges à 40% (fig 3a, 4.a). Les déviateurs aux pics varient entre 163.9 kPa (OCR =1) et 203.15 kPa (OCR =8) pour le sable propre et 18.89 kPa (OCR=1) et 222.40 kPa (OCR=8) pour le sable à 40% de limon.

Du point de vue variation de pression, 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 (fig 3b, 4b). les pics min et max enregistrés sont respectivement : sable propre 9.2 kPa ($\varepsilon_{ax}=0.52\%$) à OCR = 8 et 43.59 kPa ($\varepsilon_{ax}=1.88\%$) à OCR = 1 ; Sable + 40% limon : 0.7 kPa ($\varepsilon_{ax}=0.35\%$) à OCR = 8 et 63.65 kPa ($\varepsilon_{ax}=3.47\%$) à OCR = 2.

Les chemins de contrainte dans le plan (p' , q) montrent bien le rôle de l'augmentation du rapport de surconsolidation dans l'augmentation de la pression moyenne effective et du déviateur maximal (fig 3c, 4c). La pente M déterminée à l'état permanent des déformations (steady state strain), donne pour le sable propre la valeur $M=0.796$ à OCR = 1 correspondant à un angle $\Phi'=22.86^\circ$ et $M=1.196$ correspondant à $\Phi'=33.26^\circ$ à OCR = 4 pour le sable à 40% de limon. Ce qui dénote aussi une tendance à une augmentation de l'angle de frottement Φ' lorsque OCR augmente et le pourcentage de fines augmente dans les mélanges.

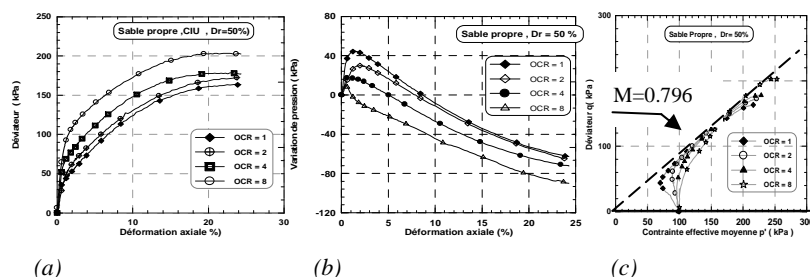


Fig. 3. Réponse non drainée du sable propre Oued Chlef ($e = 0.694$; $\sigma'_c = 100$ kPa), a-déviateur-déformation axiale b-pression interstitielle-déformation axiale, c-chemin de contrainte

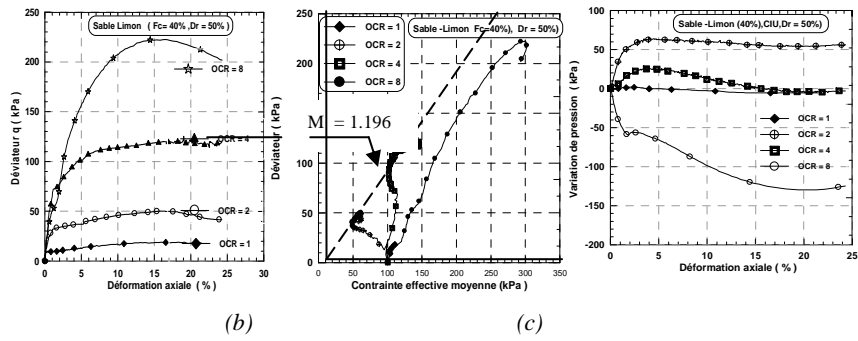


Fig. 4. Réponse non drainée (40% de limon) (confinement =100 kPa, e =0.605), a -déviateur-déformation axiale b- pression interstitielle-déformation axiale, c-chemin de contrainte.

4.2 Influence du Rapport de surconsolidation à OCR (min et max) sur les caractéristiques mécaniques des mélanges.

La figure 5.a illustre la variation du déviateur à OCR = et OCR = 8 à différentes fractions de fines. On note que l’effet de surconsolidation (OCR =8) exhibe de forte résistance quand la teneur en fines augmente ceci s’explique par une forte dilatance des échantillons lorsqu’ils sont soumis à de fortes pressions de chargement ($\sigma_{max} = 800$ kPa). Tandis que l’essai normalement consolidé (OCR = 1) montrant initialement une forte contractance due à l’augmentation des fines amplifie la résistance en diminuant d’amplitude .L’écart entre les résistances à OCR =1et OCR =8 à 40 % de fines reste très marquée et fluctue autour de 203.47 kPa .

La figure 5.b représente la variation de la pression interstitielle en fonction de la fraction des fines . On constate que pour OCR = 1 , il existe une légère montée en pression jusqu’à 10 % de fines ($\Delta u = 49.5$ kPa) , puis une chute brutale à 40 % de fines ($\Delta u = 1.59$ kPa) , tout en devenant compressible car il représente une forte contractance (Δu toujours positive). Par contre pour OCR = 8 , les faibles valeurs enregistrées de la pression interstitielles $\Delta u= 12.39$ kPa à 10% et $\Delta u= 0.29$ kPa à 40 % montrant d’une part une forte dilatance (Δu négative à faible déformation axiale) et un écart très marqué entre OCR= 1 et OCR =8 (37.11 kPa à10% de fines) .

La figure 5.c montre la variation de l’angle de frottement au pic en fonction de la teneur en fines. Pour un rapport de surconsolidation OCR =8, on constate une légère variation de cet angle fluctuant autour de $\phi' = 32^\circ$. Ceci s’expliquant par la bonne imbrication des grains de particules solide au cours du cisaillement. Par contre pour les échantillons normalement consolidé (OCR = 1) , la décroissance de cet angle ϕ' de 26.77° (0%) à 4.95° (40 %) est due à la forte teneur en fines existante dans les mélanges induisant une forte contractance des échantillons .

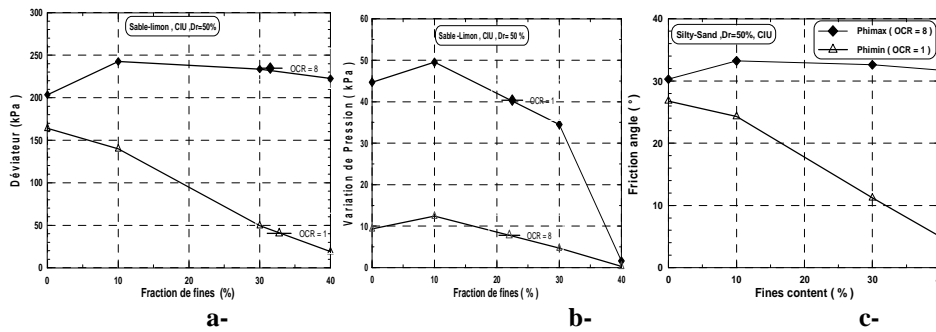


Fig. 5. Réponse non drainée à OCR = 1 et OCR = 8 et à différents mélanges.

- a- Déviateur –fraction de fines
- b- Variation de pression (Δu) – fraction de fines
- b- Angle de frottement ϕ' – fraction de fines

5 Conclusion

Cette communication présente une étude en laboratoire de l'effet du rapport de surconsolidation sur le comportement non drainé des sols. Les différents essais réalisés mettent en lumière :

- Les fortes valeurs enregistrées de la résistance non drainée pour des OCR =8 sont dues à une forte amplification de la dilatance des échantillons causant de faibles variations de pression interstitielle à faible déformation axiales. Ceci n'étant pas le cas pour les sols normalement consolidés (OCR = 1) indiquant de forte contraction donc de faible résistance quand la fraction de fines augmente (Fc= 40 %).
- A l'état limite de déformation (Steady state line), Les chemins de contraintes en condition non drainée dans les plans (p'-q), ont enregistré, pour les mélanges FC= 40 %, une cohésion apparente de 20kPa pour OCR = 4 correspondant à un angle de frottement critique $\Phi'_{ss} = 33.26^\circ$, ceci tient compte de la légère compressibilité des fines peu plastiques dans les mélanges lorsque le pourcentage de fines dépasse un certain seuil estimé dans la littérature au-delà de 20 % [Thevanayagam 11].
- Les angles de frottement internes déterminés en condition non drainée sont plus favorisés que les essais en condition drainée. Les valeurs enregistrées à OCR = 8 pour les essais non drainés restent supérieures à 30° en comparaison avec les essais drainés qui fluctuent autour de 23° . Ceci pouvant s'expliquer par une bonne imbrication des particules lors de la phase de surconsolidation. Alors que pour OCR = 1 (Normalement consolidé), les valeurs de l'angles de frottement enregistrées diminuent avec l'augmentation des fines (FC > 10%). Ceci s'explique, tant par l'excès de pression interstitielle que par la lubrification des fines dans les mélanges.

Références

1. A.W.Skempton, "Long term stability of clay slopes. Fourth Rankine lecture 1964. Geotechnique, juin 1964.
2. J. Biarez et P.Y Hicher, "Elementary mechanics of soil behavior, saturated remolded soils." A. Balkema, Rotterdam 1994.
3. K.Ishihara et H. Takatsu, "Effects of overconsolidated and k_0 conditions on the liquefaction characteristics of sands, Soils and Foundations, 15(1), 29-44.
4. H.B. Seed, I.M. Idriss & K.L. Lee (1975): "Dynamics analysis of the slide in the lower San Fernando dam during the earthquake of February 1971". Journal Geotechnical Engineering, division ASCE, 101(1975), GT9, 889-911.
5. R. Bouferra, Etude en laboratoire de la liquéfaction des sols, Thèse de doctorat, Ecole Universitaire des Ingénieurs de Lille USTLille, 2000, 110 p.
6. Khin Swe Tint, Young Su Kim, In-Shik Seo, and Das-Man Kim, "Shear behaviour of overconsolidated Nakdong River sandy silt", KSCE Journal of Civil Engineering 11(2007), 233-244.
7. Khin Swe Tint, SeungRae lee, Young Su Kim, "Comparison between shear behaviour of overconsolidated Nakdong River Sandy silt and silty sand", Marine Georesources and Geotechnology 27(2009), 217-229.
8. H.B Seed, K Tokimatsu, L.F Harder, R.M Chung (1985), "Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111(2), pp1425-1445.
9. J.H Troncoso, "Failure risks of abandoned tailing dams", Proc., Int. Sym...On Safety and Rehabilitation of Tailing Dams, Int.Commission on Large Dams, Paris, pp.82-89.
10. J.P Koester, "The influence of fines type and content on cyclic strength", in Ground Failures under Seismic Conditions (eds, Prakash S., Dakoulas,) ASCE Publication N°. 44, pp, 17-33.
11. R.S. Ladd, "Preparing test specimen using under compaction, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 1(1978), 16-2.
12. C.K. Chan, Instruction manual, CKC E/P cyclic loading triaxial system user's manual, Soil Engineering Equipment Company, San Francisco 1985.
13. Thevanayagam S Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of sandy soils. Geoenviron. Eng. Div. ASCE, 124, N° 6, 479-491. (1998)