
Effet du rapport de surconsolidation sur le comportement drainé et non drainé des sols

A. Djafar Henni^{1*}, A.Arab¹, S. Hamoudi¹, H. Khelafi²

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

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

* hennidjafer@yahoo.fr, ah_Arab@yahoo.fr, Saeedhamoudi@yahoo.fr, khelafi@yahoo.fr.

RÉSUMÉ. Dans cet article, on présente une étude en laboratoire de l'influence du rapport de surconsolidation sur le comportement d'un sable limoneux. L'étude est basée sur des essais triaxiaux drainés et non drainés qui ont été réalisés pour des rapports de surconsolidation (OCR = 1, 2, 4 et 8), à des fractions de fines du mélange variant entre 0% et 40%. Les essais ont été effectués sur des échantillons ayant une densité initiale $I_d = 0.50$. L'article est composé de deux parties. 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) augmente d'une manière considérable la résistance du sol se traduisant par une augmentation de la dilatance. L'augmentation de la fraction des fines (Fc) de 0 à 40 % augmente la phase de la contractance et par conséquent réduit la phase de dilatance du sol étudié.

ABSTRACT. This experimental study deals with the effect of the overconsolidation ratio on the behaviour of silty sand. The study is based on the drained and undrained monotonic triaxial tests for the overconsolidation ratio (OCR= 1, 2, 4 and 8), with different silt contents ranging from 0 to 40%. The laboratory tests were carried out at an initial relative density of $D_r = 50\%$. The paper is composed of two parts. The first one presents the tested soils ; the second one gives an analysis of the test results and discusses the influence of the overconsolidation ratio on the shear strength of the soil. The results show that the shear strength of the soil increases with the increase of the overconsolidation ratio resulting in an increase of dilatancy. The increase in the amount of fines (FC) from 0 to 40% increases the phase of the contractancy and consequently reducing the phase of dilatancy of the tested material.

MOTS-CLÉS : surconsolidation, drainé, non drainé, contractance, dilatance.

KEYWORDS: overconsolidation, drained, untrained, contractancy, dilatancy.

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 dus 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 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 (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 :

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), 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 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., 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

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 ayant été évaluée par une Magnitude de 7.3 à l'Echelle de Richter).

Les caractéristiques physiques de ce sable ainsi que les mélanges à $F_c = 10, 30$ 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 $C_u = 2.77$, d'indice des vides 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 du sable propre, du limon et les mélanges sont reportées dans la figure 1.

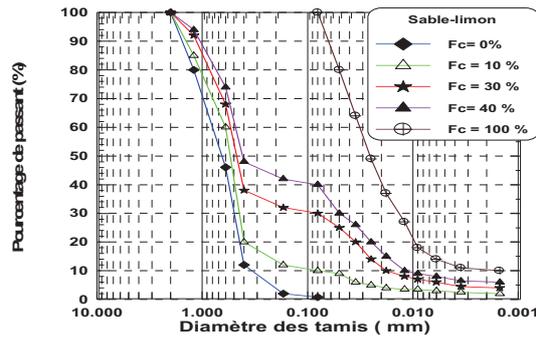


Figure 1. Courbes granulométriques des sols étudiés

Matériau	γ_s [kN/m ³]	e_{max} [-]	e_{min} [-]	e_0 [-]	d_{50} [mm]	d_{10} [mm]	C_u [-]	forme
Sable propre	26.80	0.854	0.535	0.694	0.41	0.18	2.77	arrondi

Tableau 1. Caractéristiques physiques du sable

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

Tableau 2. *Caractéristiques physiques des mélanges.*

2.2. Le limon

Le Limon utilisé dans cette étude est récupéré du tamisât 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/m³, son diamètre moyen $d_{50} = 0.031$ et d'indice de plasticité $I_p = 5$.Les valeurs des indices des vides min et max sont respectivement 0.72 et 1.42.

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

Tableau 3. *Caractéristiques physiques du Limon*

3. Mode opératoire et programme expérimental :

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 dimension 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 (1978), modifiée par Chan (1985) qui consiste à diviser la quantité totale du matériau en plusieurs couches successives (sept couches) et déposée dans le moule à des densités croissantes du bas vers le haut. La saturation de nos échantillons a été initiée suivant la méthode de Lade et Duncun (1973) (circulation du CO₂ à travers l'échantillon

puis passage de l'eau désaérée pendant 45 à 60'). La consolidation des échantillons a été réalisée en appliquant une contre-pression constante au GDS2 de 400 kPa pour assurer une bonne saturation en mesurant le coefficient de Skempton B. La valeur obtenue de $B \geq 0.96$. Les rapports de surconsolidation OCR ont été obtenus pour des chargements et déchargement respectifs à : OCR= 1 (500- 500) , OCR = 2 (600 – 500) , OCR = 4 (800 – 500) , OCR = 8 (1200 – 500) .

4. Discussions des résultats

4.1 Essai de compression drainé

Les figures 2, 3 montrent les résultats d'essais de compression drainés réalisés sur le sable propre et sur un mélange à 40% de limon avec des rapports de surconsolidation (OCR) variant de 1 à 8. On note que pour tous les essais réalisés, la résistance au cisaillement caractérisée par le déviateur de contrainte augmente d'une manière très sensible avec l'augmentation du rapport de surconsolidation. On constate aussi que l'augmentation de la fraction des fines de 0 à 40 % induit une diminution de la raideur initiale du sol et de la résistance du sol (déviateur maximal) (fig.2a, 3a). Les pics des déviateurs pour le sable propre varient entre 119 kPa (OCR =1) et 138.26 kPa (OCR = 8). Pour les sables à 40% de limon , le déviateur au pic varie entre 115.29 kPa (OCR =1) et 130.6kPa (OCR = 8).

En ce qui concerne les déformations volumiques (fig.2b, 3b), on note que les échantillons avec un rapport de surconsolidations (OCR) égale à 1, 2 et 4 présentent une phase de contractance suivie par une phase de dilatance ; cette phase de dilatance tend à disparaître avec l'augmentation de la fraction des fines (Fc); pour les échantillons avec un rapport de surconsolidation égale à 8, on observe uniquement une phase de dilatance pour toutes les fractions des fines. On remarque que pour l'essai avec $F_c = 40\%$, la phase de dilatance tend à disparaître pour les échantillons avec des rapports de surconsolidation (OCR) égaux à 1,2 . Pour les échantillons avec un OCR égaux 4 et 8, ces phases de dilatance tendent à diminuer d'intensité (fig. 3b), cette diminution avec l'augmentation de la fraction des fines résulte du rôle des fines dans l'augmentation de la contractance du sol.

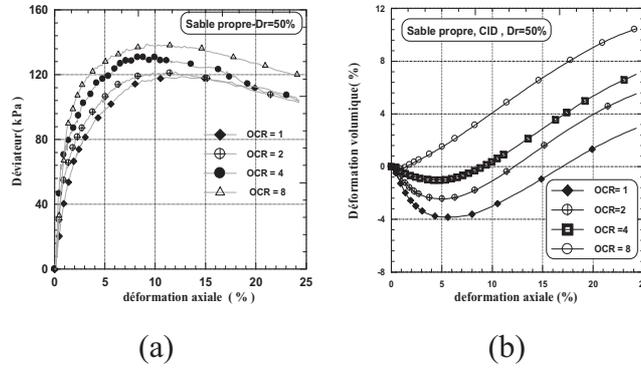


Figure 2 . Réponse drainée du sable propre d'Oued Chlef (Confinement =100 kPa, $e=0.694$) a-Déviateur –déformation axiale (%), b-Déformation volumique – déformation axiale (%)

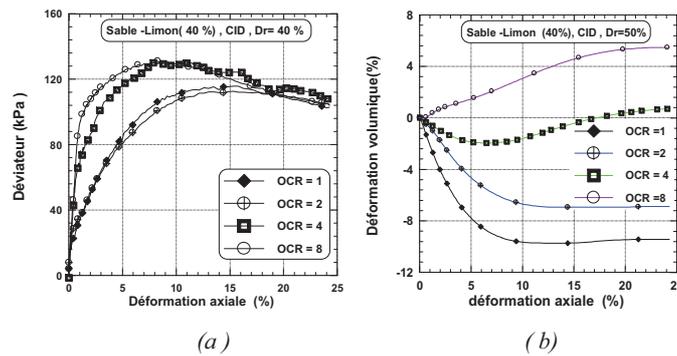


Figure 3 . Réponse drainée mélange à 40% fines (Confinement =100 kPa , $e =0.605$) a-Déviateur –déformation axiale (%), b-Déformation volumique – déformation axiale (%)

4.2 Essai de compression non drainé:

Les figures 4 et 5, 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 4a, 5.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 (OCR1) et 222.40 kPa (OCR =8) pour le sable à 40% de limon.

Effet du rapport de surconsolidation sur le comportement drainé et non drainé des sols

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 4b, 5b). les pics min et max enregistrés sont respectivement : sable propre 9.2 kPa ($\epsilon_{ax}=0.52\%$) à OCR = 8 et 43.59 kPa ($\epsilon_{ax}=1.88\%$) à OCR = 1 ; Sable + 40 % limon : 0.7 kPa ($\epsilon_{ax}=0.35\%$) à OCR = 8 et 63.6 5 kPa ($\epsilon_{ax}=3.47\%$) 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 4c, 5c). 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.

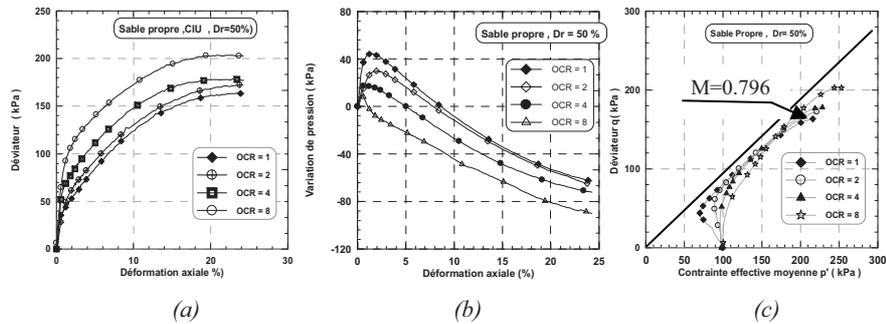


Figure 4. Réponse non drainée du sable propre Oued Chlef ($e=0.694$; $\sigma'_c = 100$ kPa), **a**- déviateur-déformation axiale **b**-pression interstitielle-déformation axiale, **c**-chemin de contrainte

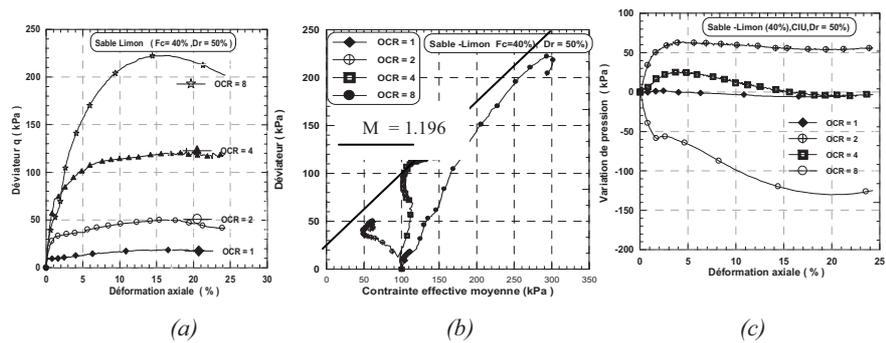


Figure 5. Réponse non drainée (40% de limon) (confinement =100 kPa, $e=0.605$), **a** - déviateur-déformation axiale **b**-pression interstitielle-déformation axiale, **c**-chemin de contrainte.

4.3 Effet du Rapport de surconsolidation sur l'angle de Frottement interne ϕ' :

La figure 6 illustre la variation de l'angle de frottement interne ϕ' en fonction de la fraction des fines limoneuse contenue dans les mélanges variant de 0% (sable propre) à 40 % de fines en condition drainée fig.6a et non drainée fig.6b . On a reporté dans les deux figures les valeurs max et min correspondants à OCR = 1 (Normalement consolidé à 100 kPa) et à OCR = 8 (surconsolidé à 800 kPa) . On constate d'après les figures 6 (a) et 6(b) , qu' à OCR = 8 ,les essais non drainés donnent des valeurs plus fortes que les essais drainés où les valeurs enregistrées de l' angle de frottement sont tous supérieurs à 30 ° . Pour les essais drainés , les valeurs de l'angle de frottement sont pratiquement constantes et fluctuent en moyenne autour de $\phi'= 23^\circ$. Ceci dénote la bonne imbrication des particules des grains dans les mélanges lors de la phase de surconsolidation. En revanche , à l'état normalement consolidé (OCR =1) ,on constate une chute brusque de l'angle de frottement au-delà de 10% de fines (Essai non drainé) en enregistrant une valeur minimale $\phi'_{min} = 4^\circ$ (pour FC = 40 %). Contrairement aux essais drainés où on constate une légère diminution de l'angle de frottement qui se stabilise autour de 17.01° (FC= 30%) .Au delà de ce pourcentage ,on observe une légère inversion du phénomène de l'angle de frottement donnant une valeur de $\phi'= 21.48^\circ$ pour FC = 40%. Ceci pouvant s'expliquer par le fait que pour FC > 10% , l'indice des vides intergranulaire ($e_s = 1.22$ pour FC=30%) restant supérieur à celui du sable propre $e_{max_sable}(FC=0) = 0.854$;Thevanayagam (1998) , et la matrice sablo-limoneuse contribue en tant que phase limoneuse relativement compressible.Par contre ,pour les essais non drainés , l'augmentation de la pression interstitielle Δu et la lubrification des particules fines permet d'affaiblir le sol , ce qui favorise une chute brusque de l'angle de frottement interne. La faible cohésion $c = 20$ kPa enregistrée à FC=40 % est due à la légère compressibilité du limon dans les mélanges .Fig 5b.

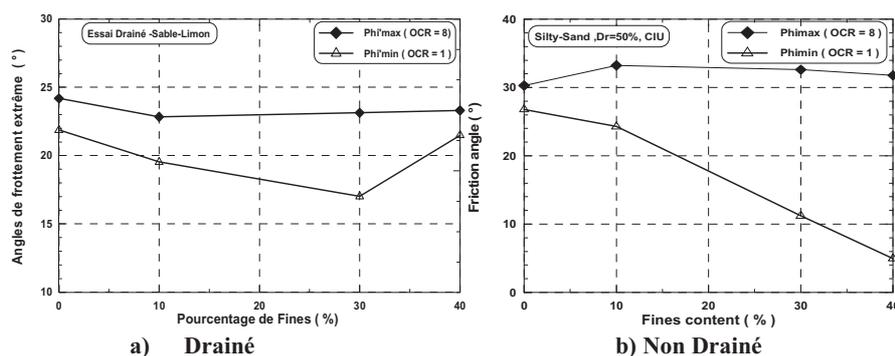


Figure 6. Variation de l'angle de Frottement interne ϕ' en fonction des fines en condition Drainé (a) et non drainé (b)

5. Conclusion

Cette communication présente une étude de l'influence des fines et du rapport de surconsolidation (OCR) sur le comportement drainé et non drainé des sols. Les essais drainés et non drainés montrent une amplification de la résistance lorsque le rapport de surconsolidation augmente avec des dilatances observées pour des OCR élevés. La variation de la pression devient négative pour $OCR \geq 4$ caractérisant une forte rigidité due à la dilatance du sol. Avec l'augmentation des fines ($F_c=40\%$), la résistance au cisaillement diminue d'ampleur pour des $OCR = 1,2$ et 4 . Les chemins de contrainte dans le plans $p'-q$, montrent des pentes plus ou moins prononcées lorsque la teneur en fine augmente.

Les angles de frottement internes déterminés en condition non drainé sont plus favorisés que les essais en condition drainés. Les valeurs enregistrés à $OCR = 8$ pour les essais non drainés restent supérieurs 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 enregistrés 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.

A l'état limite de déformation (Steady state line), Les chemins de contraintes en condition non drainée dans les plans ($p'-q$), ont enregistrés, 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% .

6. Références

- Biarez J., et Hicher P.Y., « *Elementary mechanics of soil behavior, saturated remolded soils* », A.A. Balkema, 1994, Rotterdam.
- Bouferra Rachid, « *Etude en laboratoire de la liquéfaction des sols* », Thèse de doctorat, Ecole Universitaire des Ingénieurs de Lille UST Lille, 2000.
- Chan C.K. (1985): « *Instruction manual, CKC E/P cyclic loading triaxial system user's manual* », Soil Engineering Equipment Company, San Francisco.
- Ishihara K., et Takatsu H., « *Effects of overconsolidated and k_0 conditions on the liquefaction characteristics of sands* », Soils and Foundations, vol. 15, n° 1, 1979, p. 29-44.
- 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, vol 11 n°5, 2007, p. 233-244.
- 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, vol. 27, n° 3, 2009, p. 217-229.
- Ladd R.S., « *Preparing test specimen using under compaction* », Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 1, 1978, p. 16-20

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil .Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

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.

Seed H.B., Idriss I.M., & Lee K.L., « *Dynamics analysis of the slide in the lower San Fernando dam during the earthquake of February 1971* », Journal Geotechnical Engineering, division ASCE, vol. 101, GT 9, 1975, p. 889-911.

Thevanayagam, S. (1998): « *Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands*», J. Geotech. Geoenviron. Eng. Div., ASCE , 124, N° 6, 479-491.

Yamamuro J.A., .and Kelly M.C., « *Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content* », J. Geotech Eng, ASCE, vol .127, n° 4, 2001, p.314 -324