

Effet de la méthode de préparation sur le comportement non drainé d'un sol granulaire

**N. DELLA, A. ARAB
M. BELKHATIR**

Laboratoire
des Sciences des matériaux
et Environnement
Faculté des sciences
et sciences de l'ingénieur
Département de génie civil
Université de Chlef
02000 Chlef (Algérie)
ah_arab@yahoo.fr

H. MISSOUM

Faculté des sciences
et sciences de l'ingénieur
Département de génie civil
Université de Mostaganem
27000 Mostaganem
(Algérie)

C. BACCONNET

Université Blaise-Pascal
Clermont Ferrand II
Campus les Cézeaux BP 187
63174 Aubière Cedex

Résumé

Cet article présente une étude expérimentale réalisée en laboratoire à l'appareil triaxial sur l'influence de la méthode de préparation des échantillons sur le comportement non drainé du sol de Chlef. Les essais ont été effectués sur des échantillons de densité relative initiale de 29, 50 et 80 % et à des pressions de confinement effectives initiales de 50, 100 et 200 kPa selon deux méthodes de préparation à savoir la pluviation à sec (PS) et le placement humide (PH) à une teneur en eau de 3 %. Les résultats des essais montrent que le confinement initial affecte d'une manière considérable la résistance à la liquéfaction du sol. En effet, cette dernière augmente avec la pression de confinement. Les résultats montrent aussi que les échantillons préparés avec la méthode de pluviation à sec présentent une résistance à la liquéfaction plus élevée que ceux préparés avec la méthode du placement humide, en mobilisant un effort résiduel plus grand.

Mots-clés : liquéfaction, sol, non drainé, pluviation à sec, placement humide, confinement.

Effect of sample preparation method on the undrained behaviour of a granular soil

Abstract

This paper presents an experimental study of sample preparation method conducted in the laboratory using triaxial apparatus on the undrained behaviour of Chlef soil. The tests were conducted on samples of initial relative density of 29, 50 and 80 % and initial confinement pressure of 50, 100 and 200 kPa using two depositional methods that include dry funnel pluviation (PS) and wet deposition (PH) with a water content of 3 %. The test results show that the initial confinement pressure affects considerably the resistance to liquefaction. However, it increases with the confinement. The results also show that the samples prepared with the dry funnel pluviation method have a greater resistance to liquefaction than those prepared with the wet deposition method, by mobilizing higher residual strength.

Key words: liquefaction, soil, undrained, dry funnel pluviation, wet deposition, confinement.

Introduction

Il est largement reconnu que le comportement mécanique des sables dépend de manière significative de leur état initial en termes d'indice des vides (ou d'indice de densité) et d'état de contraintes effectives. On ne fait cependant que rarement référence à la structure initiale du matériau, au sens de l'arrangement géométrique des grains dans l'empilement granulaire, résultant de tel ou tel mode de reconstitution ou de formation du matériau.

L'effet de la méthode de préparation des échantillons sur la résistance à la liquéfaction a fait l'objet de nombreux travaux de recherches controversés, car on ne trouve pas de consensus dans la littérature. Certains auteurs concluent que la résistance à la liquéfaction est plus élevée pour des échantillons préparés par la méthode de sédimentation que pour des échantillons préparés par d'autres méthodes à savoir la pluviométrie à sec et le placement humide (Zlatovic et Ishihara, 1997). Ishihara (1993) a noté qu'un échantillon préparé par déversement à sec présente une résistance plus élevée que celui préparé par placement humide. D'autres auteurs ont observé que la résistance à la liquéfaction des échantillons préparés par placement humide est plus élevée que par pluviométrie à sec (Mulilis *et al.*, 1977 ; Yamamuro *et al.*, 2008). Par ailleurs, Benahmed *et al.* (2004), Benahmed (2001) ainsi que Canou (1989) ont présenté des résultats montrant que les essais préparés par pluviométrie à sec sont plus résistants que ceux préparés par placement humide. Vaid *et al.* (1999) confirment ce résultat en montrant que le placement humide favorise l'initiation de la liquéfaction par rapport à une mise en place par pluviométrie sous eau. Pour compléter ces résultats et enrichir le débat, on a eu l'opportunité de réaliser deux séries d'essais triaxiaux non drainés en utilisant deux méthodes de déposition à savoir la pluviométrie à sec et le placement humide en vue d'étudier l'effet de la méthode de préparation des échantillons sur le comportement non drainé du sol de Chlef.

Matériau utilisé

Les essais ont été réalisés sur le sable de Chlef (Algérie) contenant 0,5 % de limon de l'oued qui traverse la ville de Chlef à l'ouest d'Alger. La courbe granulométrique de ce sable est donnée sur la figure 1. Le sable de Chlef est un sable moyen, arrondi avec un diamètre moyen $D_{50} = 0,45$ mm. Le limon contenu est peu plastique avec un indice de plasticité de 6 %. Le tableau I donne les caractéristiques physiques du sable utilisé. Les essais ont été réalisés à un indice de densité $I_D = 0,29, 0,50$ et $0,80$ représentant respectivement l'état lâche, moyennement dense et dense, et trois pressions de consolidation effectives $\sigma'_c = 50, 100$ et 200 kPa ($\sigma'_c = p - u_{cp}$). La masse de sable à mettre en place est évaluée en fonction de la densité souhaitée (le volume

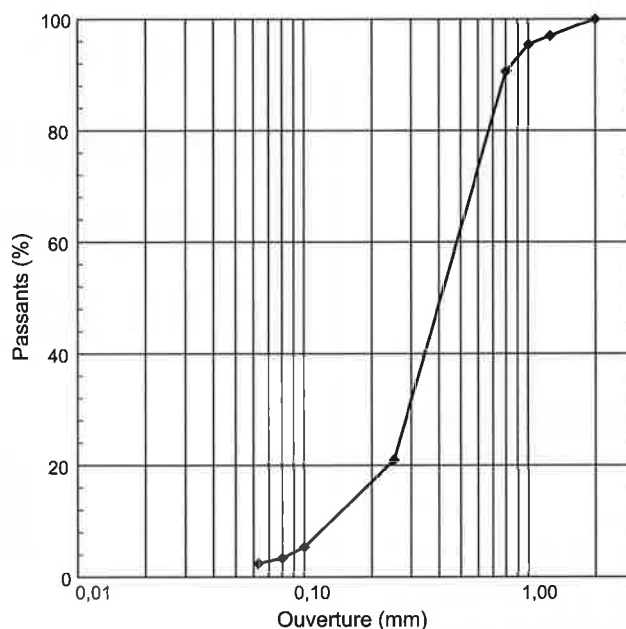


FIG. 1 Courbe granulométrique du sable utilisé.
Grain size distribution of tested material.

initial de l'échantillon est connu), l'état de densité de l'échantillon étant défini par la densité relative :

$$I_D = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$$

Mode opératoire

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

- une cellule triaxiale de type Bishop et Wesley (Bishop et Wesley, 1975) ;
- trois contrôleurs de pression – volume de marque GDS (200 cc) ;



FIG. 2 Dispositif expérimental utilisé.
Experimental apparatus.

TAB. I Caractéristiques du sable de Chlef.
Physical characteristics of Chlef sand.

Matériau	$e_{\min}$	$e_{\max}$	$\gamma_{\min}$ (g/cm ³)	$\gamma_{\max}$ (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)	Cu (D_{90}/D_{10})	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	Forme des grains
O/Chlef	0,54	0,99	1,34	1,73	2,67	3,2	0,45	0,15	Arrondie

- 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.

3.1

Moule de fabrication des échantillons

Les échantillons sont fabriqués à l'aide d'un moule constitué de deux coquilles semi-cylindriques. Celles-ci peuvent être assemblées ou repoussées l'une de l'autre facilement à l'aide d'un collier de serrage. Un conduit d'aspiration est relié à une pompe à vide afin de plaquer la manchette sur les parois latérales du moule.

3.2

Méthodes de déposition

Dans cette étude, on a utilisé deux méthodes de déposition à savoir la pluviation (déversement) à sec et le placement humide.

3.2.1

Méthode de pluviation à sec (PS)

Dans cette méthode, le sol sec est déposé dans le moule à l'aide d'un entonnoir avec contrôle de la hauteur (Fig. 3). Le moule de fabrication est rempli en continu par déversement en pluie du sable sec. Pour obtenir un échantillon lâche, il faut que la hauteur de chute soit quasi nulle. La technique est la même que celle utilisée par Ishihara (1993). Dans le but de fabriquer des échantillons homogènes, pour les échantillons moyennement denses et denses, on a utilisé la méthode préconisée par Ladd (1978), qui 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 densité relative que l'échantillon.

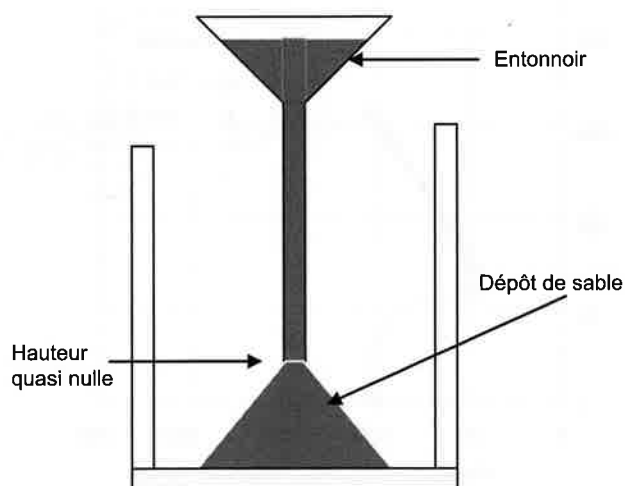


FIG. 3 Préparation par pluviation à sec.
Preparation by dry funnel pluviation.

3.2.2

Méthode de placement humide (PH)

Cette méthode consiste à mélanger, de manière la plus homogène possible, le sable, préalablement séché, avec une petite quantité d'eau. Le sol humide est déposé délicatement par couches successives dans le moule avec contrôle de la teneur en eau. On applique un compactage avec un nombre constant de coups pour obtenir une structure homogène et isotrope. La teneur en eau varie de 2 % pour le sable à 20 % pour les sols fins. Cette méthode est très commode pour le sable, parce qu'elle peut fournir des échantillons avec une large gamme d'indices des vides. Dans notre étude, la quantité d'eau à ajouter a été fixée à 3 %. Le mélange permet d'obtenir des échantillons homogènes avec un milieu remué grâce à la présence de pellicules d'eau entre les grains.

3.3

Préparation de l'échantillon

Les échantillons utilisés sont cylindriques d'élanement 1 ($\phi = 70$ mm et $H = 70$ mm). 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 ; 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 avec des embases de surface lisse ou lubrifiée. Le système d'antifrettage utilisé dans cette étude est composé des éléments suivants (Fig. 4) :

- une surface lisse de Téflon couvrant les embases ;
- une couche de graisse de Silicone « KS63G » (environ 50 μ m d'épaisseur) ;
- un disque de latex de 0,2 mm d'épaisseur sur chaque embase.

La préparation de l'échantillon comporte les étapes suivantes :

- mise en place de la manchette en latex ;
- mise en place du moule ;
- remplissage du moule par le matériau ;

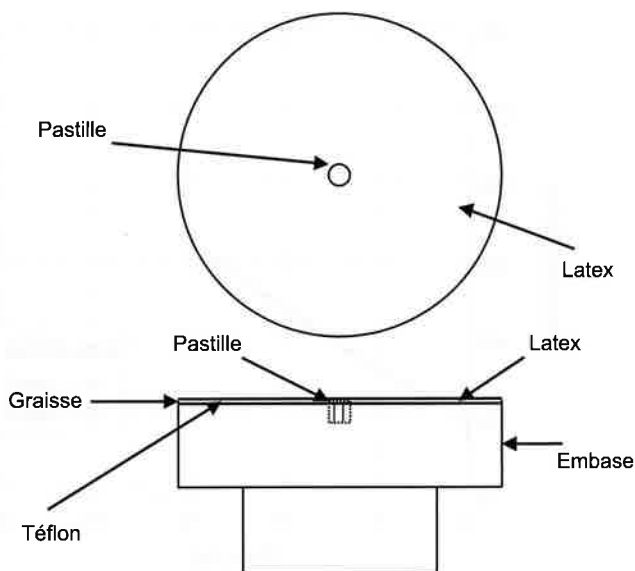


FIG. 4 Système d'antifrettage utilisé.
Antifrettage system used.

- mise en place de l'embase supérieure ;
- application d'un vide (-20 kPa) ;
- mise en place de la cellule ;
- application d'un confinement ($+20$ kPa).

3.4

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 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.

3.5

Consolidation de l'échantillon

Afin de consolider l'échantillon, on applique parallèlement une montée en pression dans la cellule (σ_3) et à l'intérieur de l'échantillon une contre-pression (U). L'application d'une contre-pression améliore la qualité de la saturation en comprimant les microbulles du gaz interstitiel qui peuvent encore être présentes après la phase de saturation. A la fin de la consolidation, la qualité de la saturation est évaluée par la mesure du coefficient de Skempton (B). Dans cette étude, les essais étaient poursuivis si le coefficient B était supérieur à 0,91 et la contre-pression valait 400 kPa.

3.6

Répétabilité des essais

Dans le but de tester le bon fonctionnement du dispositif expérimental, on a réalisé deux essais non drainés monotones sur le sable de Chlef, à une pression de confinement effective de 100 kPa et à un indice de densité $I_d = 0,80$ et avec un coefficient de Skempton

$B = 0,88$. Les résultats sont présentés sur la figure 5. On note un très bon accord entre ces deux essais, ce qui montre la fiabilité du dispositif expérimental utilisé et le mode opératoire suivi.

4

Résultats des essais réalisés

4.1

Effet du confinement

4.1.1

Pluviation à sec

Une série d'essais triaxiaux de compression non drainés a été réalisée sur des échantillons de densité relative 29, 50 et 80 % à des pressions effectives de confinement initiales de 50, 100 et 200 kPa. Les résultats des essais exprimés dans les plans (q, ϵ_1) , $(\Delta u, \epsilon_1)$ et (q, p') mettent en évidence que le confinement affecte d'une manière considérable la résistance à la liquéfaction du sable.

L'essai avec une densité initiale de 29 % (état lâche) cisailé sous une pression de confinement effective $\sigma'_c = 50$ kPa montre une résistance plus faible que ceux cisailés sous des pressions de confinement effectives de 100 et 200 kPa. Sa résistance augmente au début du chargement jusqu'à une valeur de 20 kPa correspondant à une déformation axiale de 0,5 %, puis elle diminue jusqu'à une déformation axiale de 5 % pour se stabiliser passant par un état presque stable ($q_{ss} = 15$ kPa) ; l'échantillon mobilise un effort résiduel augmentant la résistance de l'échantillon à l'état stable. Le chemin de contraintes $(p'-q)$ présente une diminution de la contrainte effective moyenne jusqu'à une valeur de 20 kPa caractérisant la phase de contractance, puis une migration vers des valeurs supérieures caractérisant un état dilatant. Les mêmes tendances sont observées pour les échantillons cisailés sous les contraintes de confinement de 100 et 200 kPa (Fig. 6.1), avec pour le déviateur de contraintes des pics respectifs de 40 et 80 kPa.

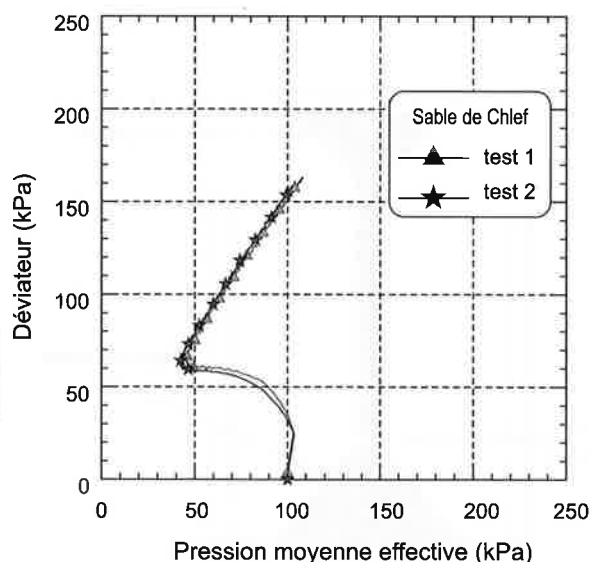
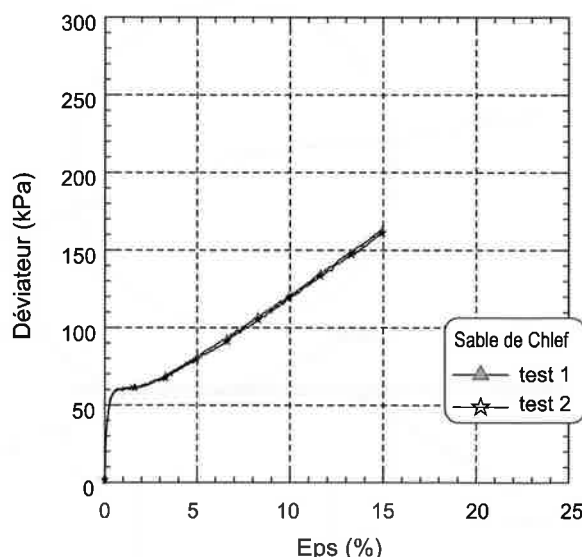


FIG. 5 Essais de répétabilité ($I_d = 0,80$).
Tests of repeatability ($I_d = 0,80$).

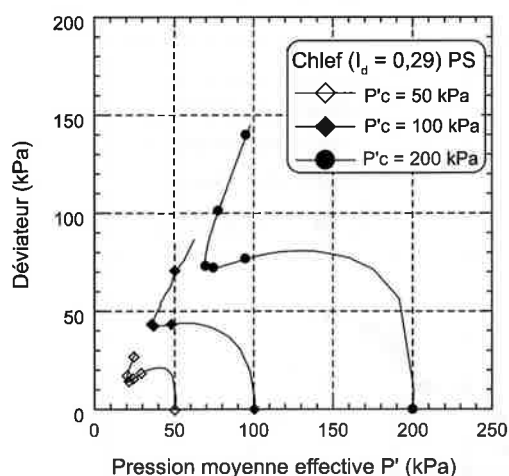
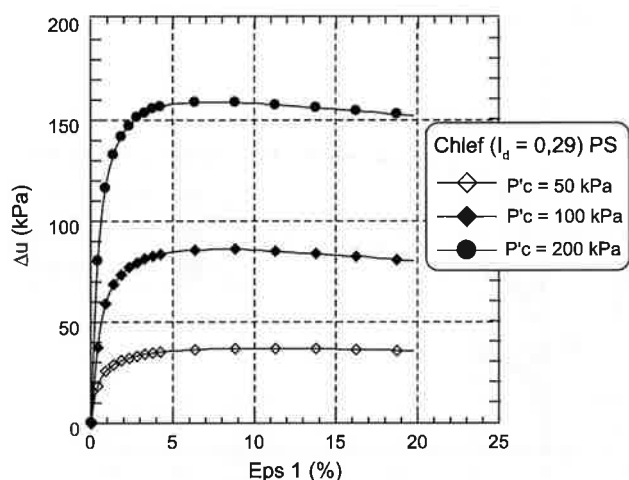
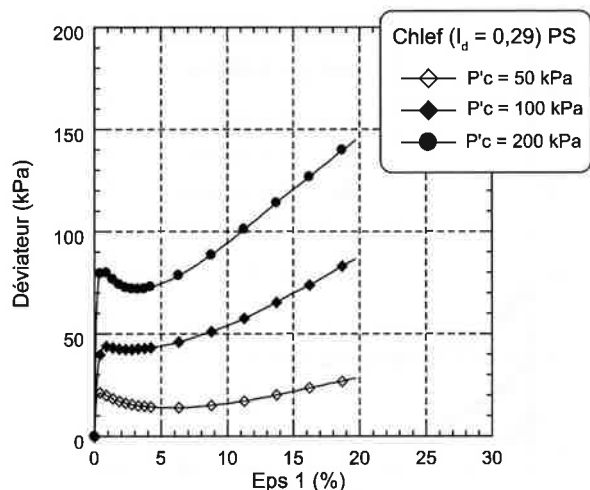


FIG. 6.1 Essais non drainés sur sable lâche ($I_d = 0,29$), par pluviation à sec.
Undrained tests on loose sand ($I_d = 0,29$), by dry funnel pluviation.

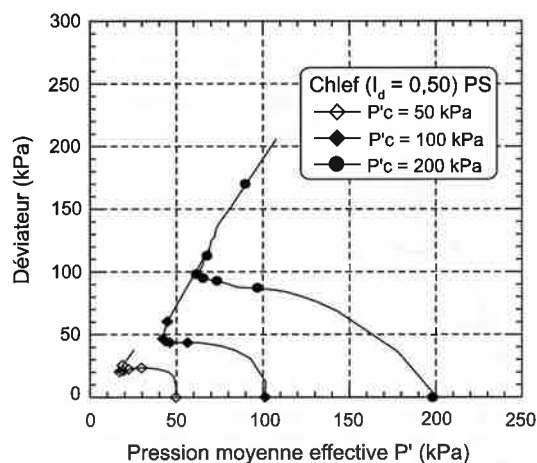
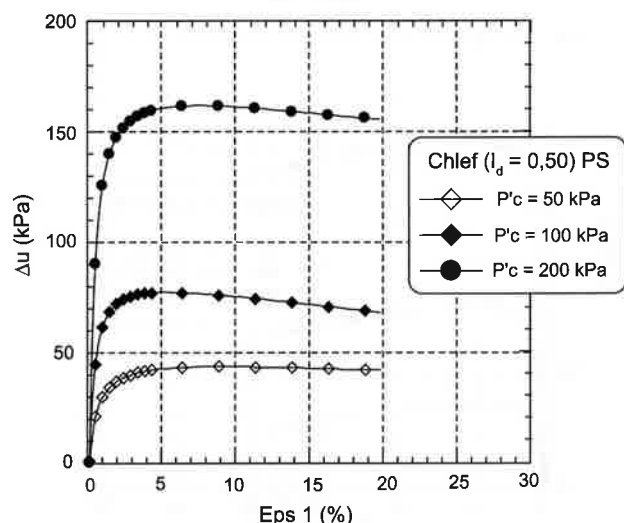
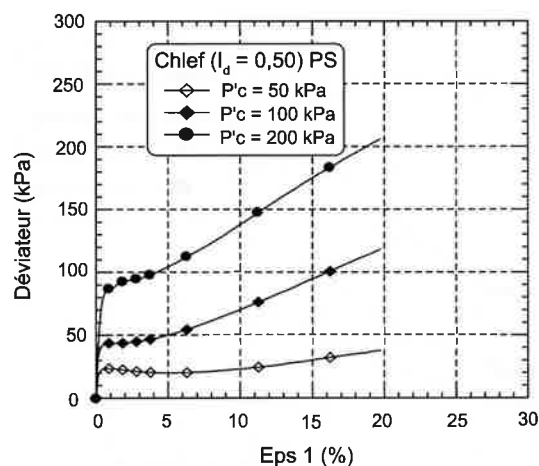


FIG. 6.2 Essais non drainés sur sable moy. dense ($I_d = 0,50$), par pluviation à sec.
Undrained tests on medium dense sand ($I_d = 0,50$), by dry funnel pluviation.

Pour les échantillons moyennement dense ($I_d = 0,50$) et dense ($I_d = 0,80$), les figures 6.2 et 6.3 montrent un comportement plus résistant avec des pics du déviateur de contraintes variant :

- de 25 à 40 kPa pour une pression de confinement effective de 50 kPa ;
- de 45 kPa à 60 kPa pour une pression de confinement effective de 100 kPa ;
- de 90 kPa à 115 kPa pour une pression de confine-

ment effective de 200 kPa, et en mobilisant un grand effort résiduel.

Les courbes de variation de la pression interstitielle présentent deux phases : la première montre un taux initial de génération très élevé, rendant compte du caractère fortement contractant du sable de Chlef ; dans la deuxième phase, ce taux diminue progressivement avec la déformation axiale, indiquant le caractère dilatatant du matériau.

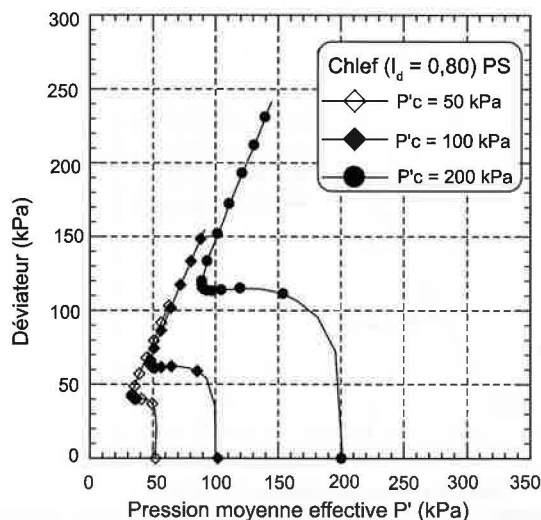
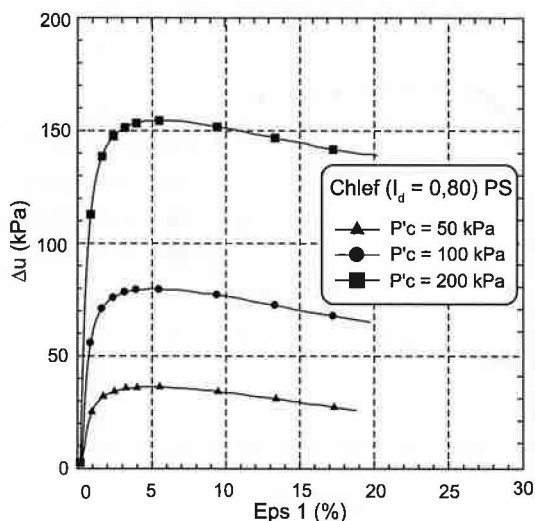
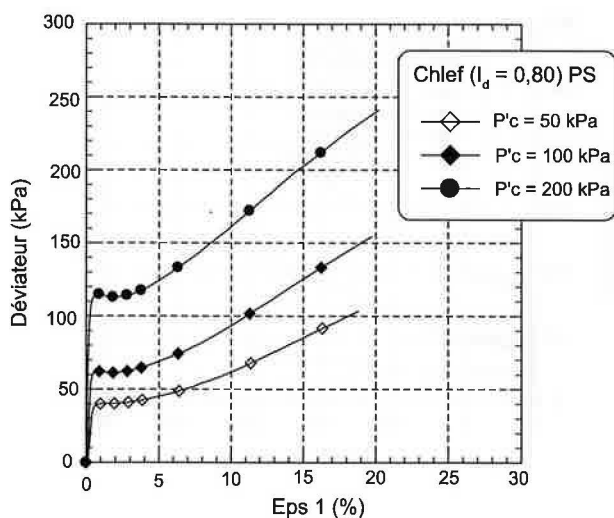


FIG. 6.3 Essais non drainés sur sable dense ($I_d = 0,80$), par pluviométrie à sec.
Undrained tests on dense sand ($I_d = 0,80$), by dry funnel pluviometry.

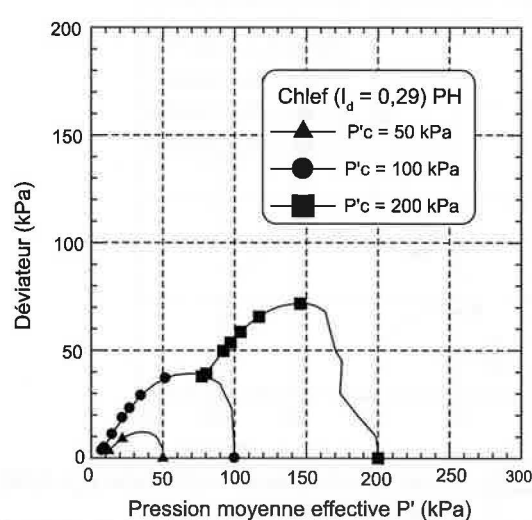
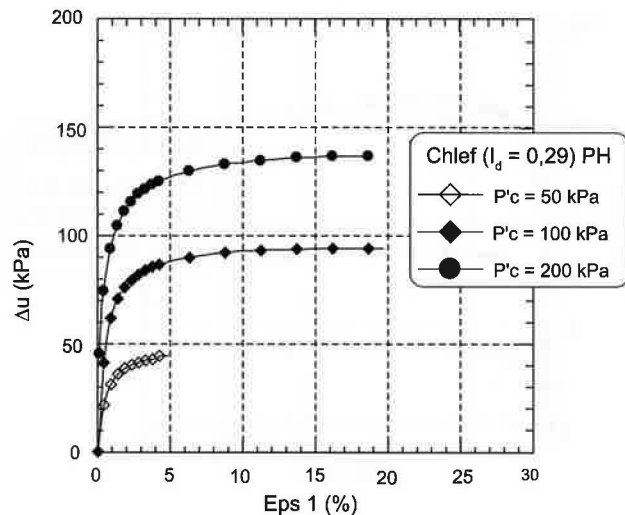
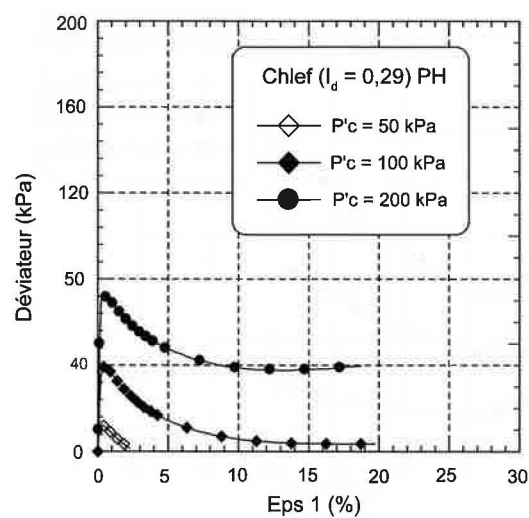


FIG. 7.1 Essais non drainés sur sable lâche ($I_d = 0,29$), par placement humide.
Undrained tests on loose sand ($I_d = 0,29$), by wet deposition.

4.1.2

Placement humide

Une série d'essais non drainés a été réalisée en utilisant la méthode de placement humide pour la mise en place des échantillons avec des densités relatives initiales de 29, 50 et 80 % pour des contraintes de confinement initial de 50, 100 et 200 kPa.

A l'inverse des échantillons réalisés par la première méthode, les résultats représentés sur les figures 7.1, 7.2 et 7.3 montrent une tendance à l'instabilité et la liquéfaction statique observée pour les échantillons avec une pression de confinement effective $P'_c = 50$ et 100 kPa. Les courbes de cisaillement (q, ϵ_s) sont caractérisées par des pics de résistance au cisaillement (pics de déviateur) de faible niveau, inférieurs à 20, 50 et

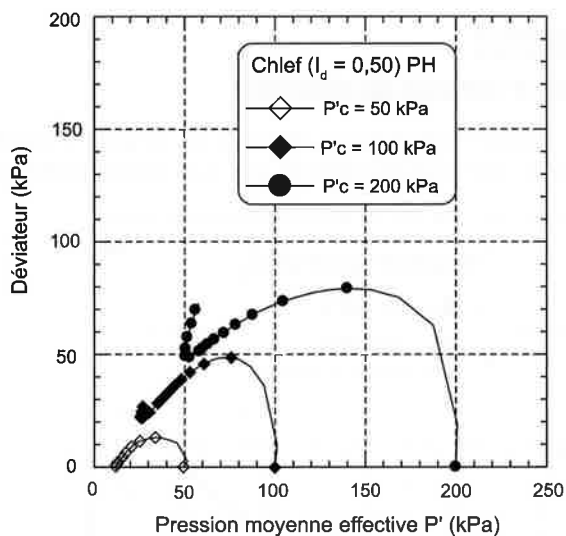
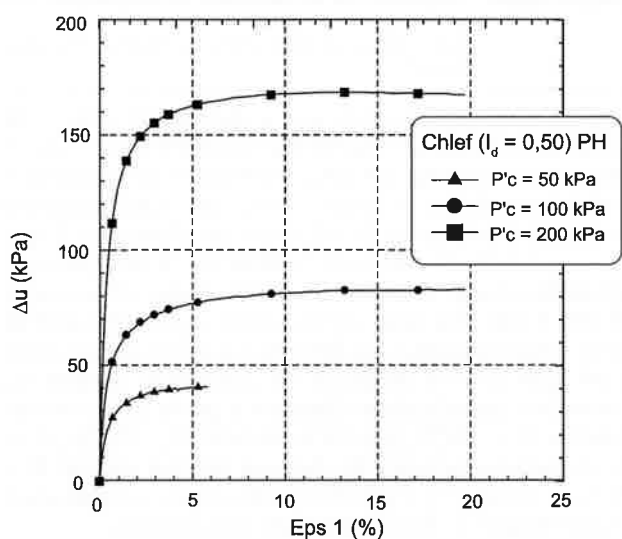
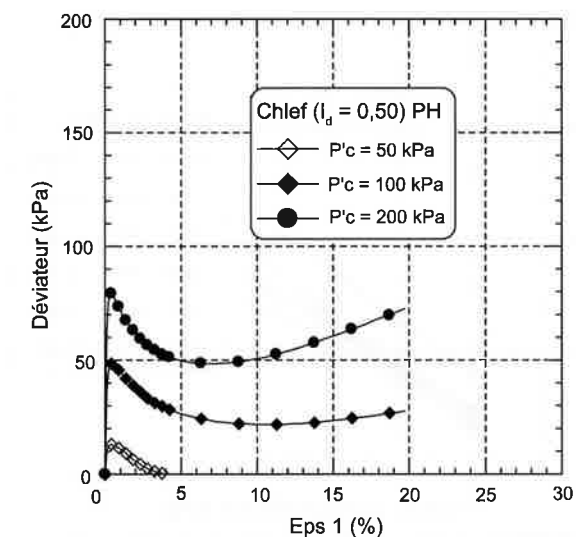


FIG. 7.2 Essais non drainés sur sable moyennement dense ($I_d = 0,50$), par placement humide. Undrained tests on medium dense sand ($I_d = 0,50$), by wet deposition.

100 kPa pour les pressions de confinement effectives de 50, 100 et 200 kPa respectivement, correspondant à de faibles déformations axiales inférieures à 0,5 %, suivis d'une chute très rapide de résistance aboutissant à l'effondrement de l'échantillon pour les pressions de confinement effectives 50 et 100 kPa, ou avec une

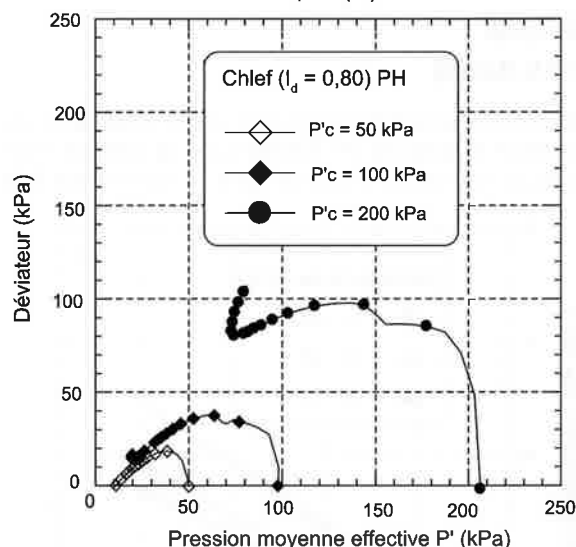
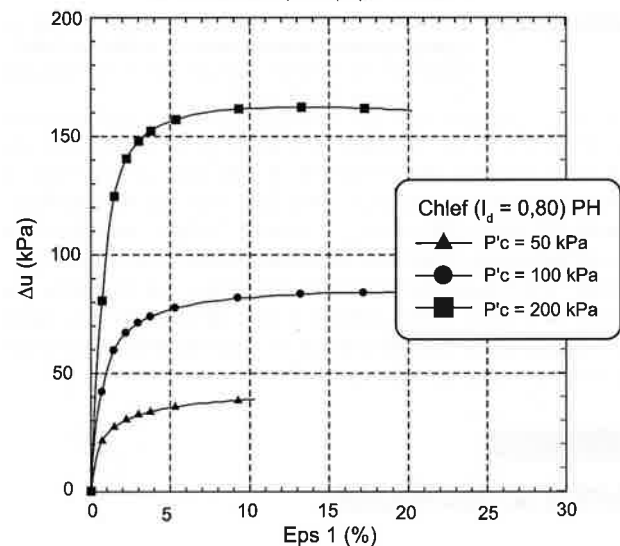
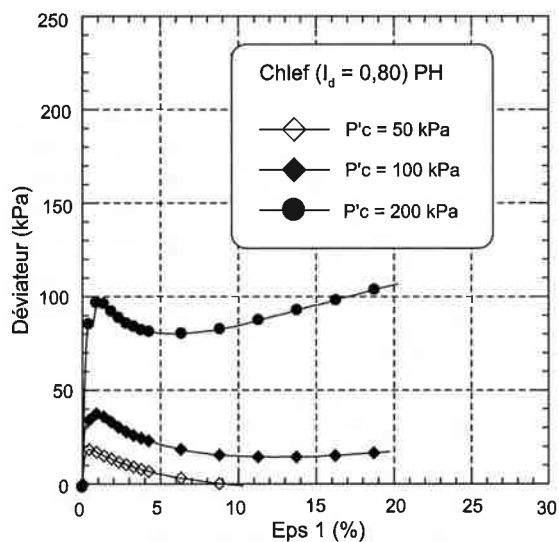


FIG. 7.3 Essais non drainés sur sable dense ($I_d = 0,80$), par placement humide. Undrained tests on dense sand ($I_d = 0,80$), by wet deposition.

stabilisation progressive autour d'une valeur ultime stationnaire très faible pour les autres pressions de confinement effectives. Ce comportement rend compte de l'état très contractant du sable. Sur le plan (q, p'), on constate une décroissance continue de la contrainte moyenne effective p' et le déplacement de l'état des

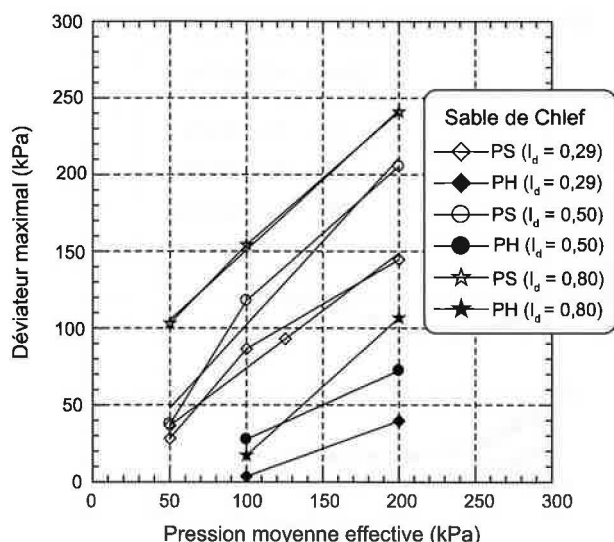


FIG. 8 Influence de la densité relative sur le comportement non drainé du sable de Chlef. Effect of the relative density on the undrained behaviour of Chlef sand.

contraintes vers l'origine des axes pour les pressions de confinement effectives 50 et 100 kPa, et une légère phase de durcissement pour la pression de confinement effective 200 kPa ($I_d = 0,50$ et $0,80$). L'évolution de la surpression interstitielle développée lors du cisaillement rend compte du caractère très contractant du sable de Chlef, avec un taux d'augmentation très élevé dès le début du cisaillement et une stabilisation progressive vers une valeur ultime.

4.2

Synthèse des résultats

4.2.1

Effet de la densité

La figure 8 montre l'évolution de la résistance au cisaillement monotone en fonction de la densité relative initiale du sable. On note que la résistance à la

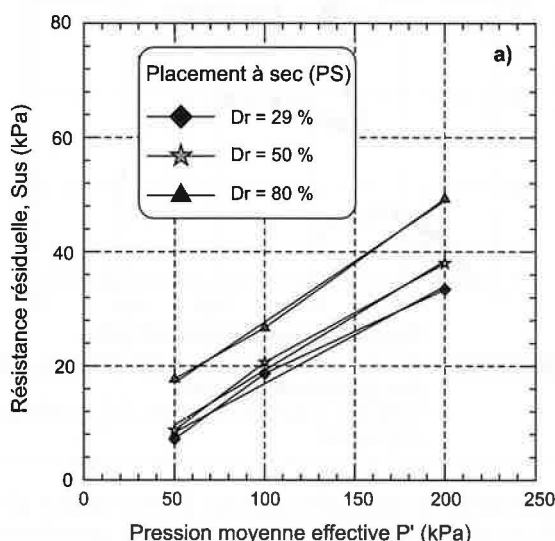


FIG. 10 Influence de la méthode de dépôt des échantillons sur la résistance résiduelle. a) pluviation à sec ; b) placement humide. Effect of the deposition method on the residual strength. a) dry funnel pluviation ; b) wet deposition.

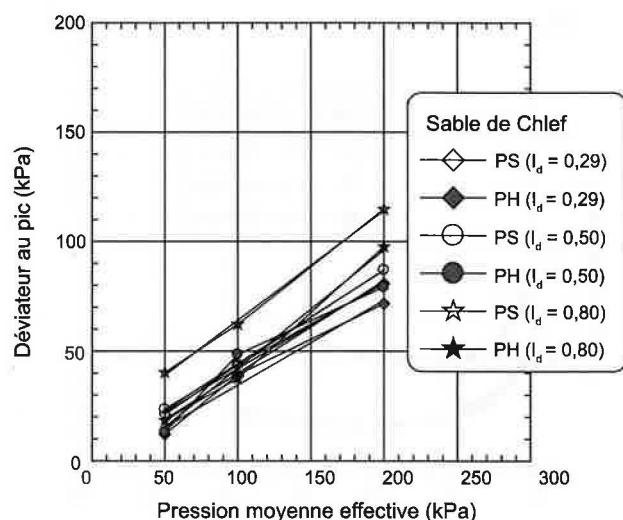


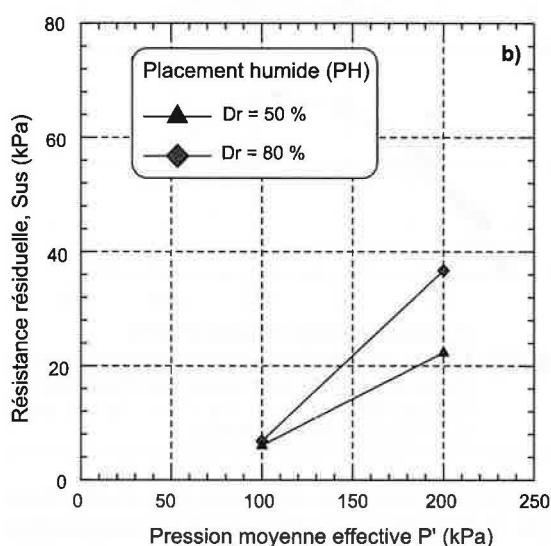
FIG. 9 Influence de la méthode de dépôt sur le déviateur au pic. Effect of the deposition method on the peak deviator.

liquéfaction, représentée par le déviateur à 20 % de déformation axiale, augmente sensiblement avec la densité du sol pour les deux méthodes de dépôt des échantillons utilisées, avec une augmentation plus prononcée pour la méthode de pluviation à sec, où les valeurs du déviateur varient de 28 kPa, pour un sol lâche et une pression de confinement effective de 50 kPa, à 240 kPa pour un sol dense et une pression de confinement effective de 200 kPa. La même observation a été faite pour la méthode de placement humide où l'évolution du déviateur démarre à partir de la densité relative $D_r = 50\%$ jusqu'à la densité $D_r = 80\%$. Pour les échantillons avec une densité relative initiale $D_r = 29\%$, la liquéfaction statique a été observée suite à une chute brutale de la résistance au cisaillement.

4.2.2

Effet de la méthode de dépôt

La figure 9 montre les résultats de la série d'essais triaxiaux non drainés menés sur des échantillons de



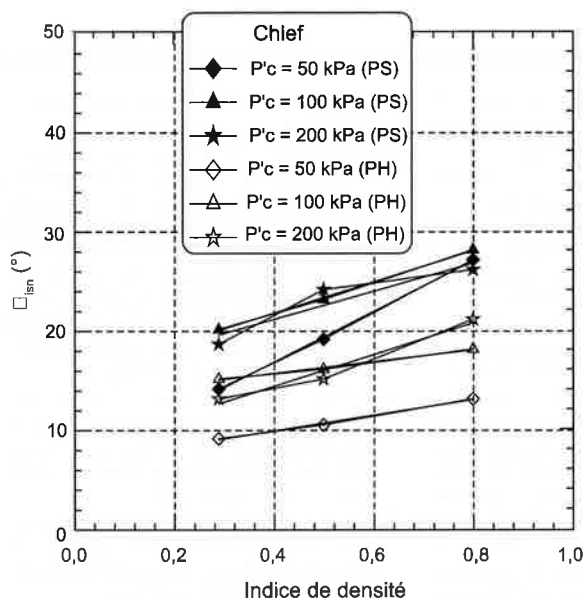


FIG. 11 Évolution de l'angle de frottement d'instabilité en fonction de l'indice de densité initial I_d .
Evolution of instability friction angle versus the initial index of density I_d .

différentes densités avec les deux méthodes de dépôt utilisées. Les résultats des essais montrent que la méthode de pluviation à sec donne des valeurs au pic de déviateur plus grandes que celles obtenues par placement humide.

Les figures 10a et 10b décrivent l'évolution de l'effort résiduel en fonction de la pression de confinement effective. On constate sur la figure 10a que l'effort résiduel des échantillons préparés par la méthode de pluviation à sec augmente d'une manière linéaire avec l'augmentation de la pression de confinement effective et avec la densité relative initiale (I_d). En revanche, pour les échantillons préparés avec la méthode de placement humide (Fig. 10b), on note que l'effort résiduel augmente avec l'augmentation de la pression de confinement effective de 100 à 200 kPa pour des indices de densité relative $I_d = 0,50$ et $0,80$. Pour la contrainte de confinement effective $P'_c = 50$ kPa et pour l'indice de densité relative $I_d = 0,29$, cet effort résiduel est nul même pour la contrainte de confinement effective 200 kPa.

Ces différences de comportement constatées entre les deux méthodes de dépôt, peuvent s'expliquer par le fait que les échantillons préfabriqués par la méthode de pluviation à sec présentent un comportement dilatant et stable, tandis que ceux préparés par la méthode de placement humide sont plutôt contractants

et instables. Cette instabilité peut provenir de la présence d'une certaine quantité d'eau qui permet d'avoir des échantillons foisonnés avec des macropores facilement compressibles et vulnérables à la liquéfaction. La figure 11 montre l'évolution de l'angle de frottement à l'initiative de l'instabilité en fonction de l'indice de densité initiale I_d . On note que cet angle ϕ_{ips} augmente avec l'augmentation de l'indice de densité initial I_d ; et varie d'une manière linéaire avec l'indice de densité pour les deux méthodes de préparation (PS et PH).

Enfin, on a noté que nos résultats sont en parfaite concordance avec ceux donnés par Benahmed *et al.* (2004), Benahmed (2001) et Ishihara (1993) qui ont trouvé que les échantillons préparés par pluviation à sec présentaient une résistance à la liquéfaction plus élevée que ceux préparés par la méthode de placement humide. Zlatovic et Ishihara (1997), en changeant la méthode de préparation, ont observé que la résistance des échantillons préparés par la méthode de pluviation à sec diminuait avec l'augmentation de la fraction des fines, tandis que les échantillons préparés par sédimentation présentaient une diminution de la résistance jusqu'à une teneur en fines de $F_c = 30\%$, puis une nouvelle augmentation à partir de ce seuil. Mulilis *et al.* (1977) ont indiqué de leur côté que les échantillons préparés par damage humide conduisaient à une résistance plus élevée que ceux préparés par pluviation à sec.

5

Conclusion

Cet article a présenté les résultats d'une étude en laboratoire concernant l'influence des méthodes de constitution des échantillons sur la caractérisation du comportement d'un sable de Chlef. L'étude a comporté des essais triaxiaux non drainés, réalisés à des indices de densité relative de 0,29, 0,50 et 0,80 pour des pressions de confinement effectives de 50, 100 et 200 kPa.

Les essais réalisés ont permis d'identifier deux structures granulaires bien différenciées, caractéristiques des modes de dépôt : l'une stable et l'autre instable. La première méthode, appelée pluviation à sec (PS), donne des échantillons avec un comportement dilatant et stable. La seconde méthode, dénommée placement humide (PH), favorise la contractance donc l'instabilité des échantillons. La différence entre ces comportements peut être expliquée par le fait que la méthode de placement humide (PH), fournit des échantillons facilement compressibles et instables favorisant l'initiation à la liquéfaction.