

ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MONOTONE D'UN SOL GRANULAIRE: EFFET DE LA STRUCTURE INITIALE

N. DELLA¹, A. ARAB¹, M. BELKHATIR¹, H. MISSOUM²

1 Laboratoire des Sciences des Matériaux et Environnement, Département de Génie Civil, nour_della@yahoo.fr

2 Département de génie civil, Université de Mostaganem

Résumé :

Une étude expérimentale, réalisée en laboratoire à l'appareil triaxial, se propose d'évaluer l'influence de la méthode de préparation des échantillons sur le comportement non drainé du sable de Chlef. Les essais ont été effectués sur des échantillons de densité relative initiale de 29 et 50%, à des pressions de confinement initiales de 50, 100 et 200 kPa selon deux méthodes de reconstitution : la pluviation à sec et le placement humide. Tous les échantillons ont été soumis à un chargement monotone après consolidation. Les résultats expérimentaux montrent que la pression de confinement et la densité relative affectent d'une manière très significative la résistance à la liquéfaction du sol. En effet cette dernière augmente avec la pression de confinement et la densité. 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.

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

1. Introduction

Le 10 octobre 1980 à 13h25 (heure locale), la région fut le théâtre d'un violent séisme de magnitude 7.3, suivi de deux secousses importantes de magnitudes 6 et 6.1 à quelques heures d'intervalle et de nombreuses répliques se sont manifestées pendant plusieurs mois (Ouyed, 1981). L'épicentre de ce séisme fut localisé au nord est d'El-Asnam aux environs du village de Beni Rached.

La catastrophe du 10 octobre 1980 a provoqué de nombreuses pertes en vies humaines (environ 3000 morts) des destructions d'habitations en grand nombre et des dommages importants à des infrastructures de liaison et à des équipements publics. Outre les manifestations purement tectoniques, telles que la spectaculaire faille apparue près d'El-Asnam, les vibrations sismiques ont engendré aussi un certain nombre de phénomènes géodynamiques à la surface du sol : mouvements de terrain de nature et d'ampleur variées, et surtout la liquéfaction des sols sableux.

Selon Durville et Méneroud (1982) le phénomène de liquéfaction est apparu sur une vaste vallée alluvionnaire traversée par l'Oued Chlef et à la zone de confluence de cet Oued avec l'Oued Fodda.

La liquéfaction du point de vue général c'est la transformation d'un solide en un liquide. Pour une couche de sable saturé et à drainage faible, cette transformation se traduit par une disparition totale des forces de contacts intergranulaires. Cette disparition est engendrée par l'annulation de la contrainte moyenne effective à la suite de l'augmentation de la pression interstitielle, qui est obtenue soit par un chargement monotone soit par un chargement cyclique.

A l'échelle microscopique, le phénomène peut être représenté comme sur la Figure 1.

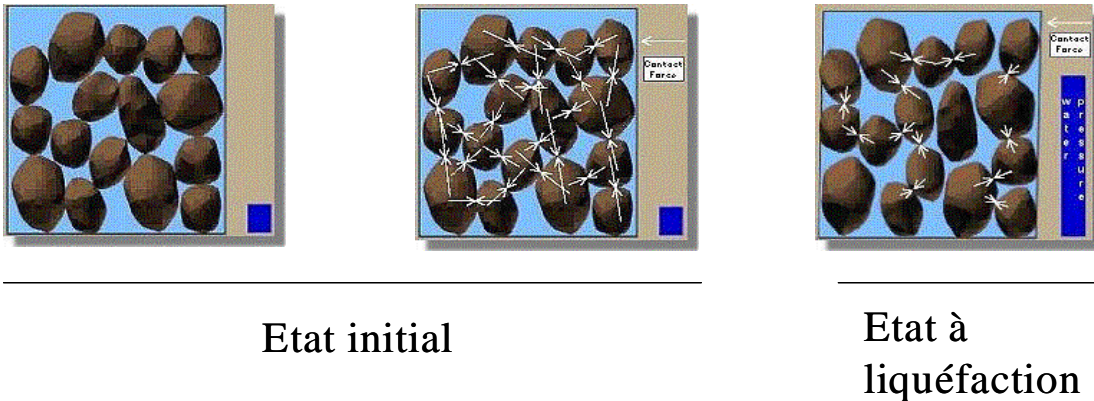


Figure 1: Phénomène de liquéfaction à l'échelle microscopique

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 controversées, car on ne trouve pas un consensus dans la littérature, certains auteurs trouvent 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 pluviation à sec et le placement humide (Zlatovic et Ishihara (1997)); d'autres trouvent que la résistance à la liquéfaction des échantillons préparés par placement humide est plus élevée que par pluviation à sec (Mulilis et al. (1977), Yamamuro et Wood (2004)). Benahmed et al. (2004) ainsi que Canou (1989) ont présenté des résultats montrant que les essais préparés par pluviation 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 pluviation sous eau. Yamamuro et al. (2008) ont montré que la méthode de pluviation à sec favorise l'instabilité des échantillons à l'inverse de la méthode de sédimentation. Wood et al. (2008) ont trouvé de leur côté que l'effet de la méthode de déposition sur le comportement non drainé décroît, lorsque la densité croît. Ils ont trouvé aussi que cette influence diminue avec l'augmentation de la teneur en fines, particulièrement aux faibles densités. A cet effet nous avons réalisé deux séries d'essais triaxiaux non-drainés en utilisant deux méthodes de déposition à savoir la pluviation à sec et le

placement humide en vue de cerner l'effet de la méthode de préparation des échantillons sur la résistance à la liquéfaction. Etant donné la grande diversité des modes possibles de formations des massifs sableux naturels, l'utilisation des deux modes de déposition du sable de Chlef, permet de se rapprocher de la réalité du terrain de la région, le but final étant la caractérisation du comportement de ce sable à la liquéfaction.

2. Sol 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 même nom (ex-El-Asnam, ex-Orleansville). La figure 2 montre la courbe de distribution de la taille des grains. 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 5,81%. Les caractéristiques physiques de ce sable sont représentées sur le tableau 1. Les échantillons ont été fabriqués pour deux densités relatives $D_r = 29\%$ et 50% respectivement représentant l'état lâche et moyennement dense.

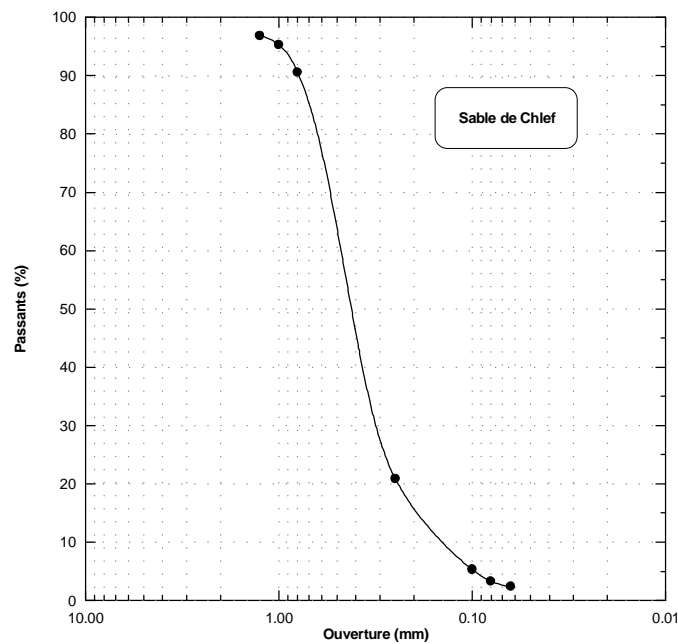


Figure 2 : Courbe granulométrique du matériau

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du sable

Forme des grains	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	Cu (D_{60}/D_{10})	γ_s (g/cm^3)	γ_{dmin} (g/cm^3)	γ_{dmax} (g/cm^3)	e_{min}	e_{max}
Arrondie	0.15	0.45	3.2	2.67	1.34	1.73	0.54	0.99

3. Mode opératoire

La figure 3 montre le dispositif expérimental utilisé. Il se compose de:

- Une cellule triaxiale autonome type Bishop et Wesley (Bishop et Wesley, 1975),
- Deux contrôleurs de pression /volume type GDS (200cc),
- Une pompe à vide, reliée à un réservoir afin de désaérer l'eau déminéralisée,
- Un micro-ordinateur équipé d'un logiciel permettant le pilotage de l'essai et l'acquisition des données.



Figure 3 : Dispositif expérimental

3.1 Moule de mise en place des échantillons

Le moule utilisé pour la fabrication des échantillons est constitué de deux coquilles semi-cylindriques, qui peuvent être assemblées ou repoussées l'une de l'autre facilement à l'aide d'un collier de serrage. Quatre conduits d'aspiration sont percés dans les coquilles, pour maintenir la membrane en latex le long des parois du moule. Ces conduits communiquent avec l'intérieur du moule par des rangées de petits trous (1mm de diamètre). Ils sont reliés à des tuyaux souples qui sont assemblés dans un seul tube raccordé à une pompe à vide.

3.2 Préparation de l'échantillon

Afin d'éviter le cisaillement latéral dû à l'élançement, On utilise des échantillons cylindriques de 70mm de diamètre et de hauteur ($H/D = 1$). Tout d'abord on pose un papier filtre sur les pastilles (orifice de drainage) afin de les protéger, ensuite on met une couche de Silicone (KS63G) sur les deux embases. Un disque en latex est posé au-dessus de chaque embase, puis on procède à la préparation de l'échantillon d'après le mode opératoire suivant:

- mise en place de la membrane,
- mise en place du moule,
- remplissage du moule par le matériau,
- mise en place de la cellule.

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 :

$$D_r = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min}) \quad (1).$$

3.3 Méthodes de déposition utilisées

Deux méthodes de fabrication des échantillons ont été utilisées: le placement humide et la pluviation à sec.

- (1) La méthode de placement humide (PH) consiste à mélanger de manière la plus homogène possible, le sable préalablement séché avec une petite quantité d'eau fixée à 3% et la déposition du sol humide dans le moule avec contrôle de la teneur en eau. Le sol est placé délicatement par couches successives. On applique un nombre constant de coups pour avoir une structure homogène et isotrope. Cette méthode est très commode pour le sable, parce qu'elle peut fournir des échantillons avec une large gamme d'indices des vides.
- (2) La méthode de pluviation à sec (PS) où le sol sec est déposé dans le moule à l'aide d'un entonnoir avec contrôle de la hauteur. Cette méthode consiste à remplir en continu le moule de fabrication par déversement en pluie du sable sec. Pour avoir des échantillons lâches, il faut que la hauteur de chute soit quasi-nulle.

3.4 Saturation et consolidation 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). Cette technique consiste à faire circuler le gaz carbonique à travers les circuits de drainage et l'échantillon à faible débit pendant un certain temps, afin d'occuper tous les vides et chasser l'air contenu dans l'échantillon. Ensuite, on fait circuler l'eau désaérée et déminéralisée pour chasser le gaz interstitiel et occuper sa place. Malgré le passage de l'eau, certains vides restent occupés par le gaz carbonique. Comme la solubilité du gaz est élevée, l'eau peut dissoudre ce qui reste de gaz carbonique après son passage, ceci permet généralement d'assurer une bonne saturation de l'échantillon. Afin de consolider l'échantillon, on applique parallèlement une montée en pression dans la cellule (GDS n°1) et à l'intérieur de l'échantillon (GDS n°2). L'application d'une contre pression, à l'aide du GDS n°2, améliore la qualité de la saturation en comprimant les micros-bulles du gaz interstitiel qui peuvent encore être présentes après la phase de saturation. On maintient ces deux pressions (dans la cellule et à l'intérieur de l'échantillon) pendant une nuit entière pour assurer une bonne consolidation.

La qualité de la saturation est évaluée par la mesure du coefficient de Skempton (B) selon une démarche classique: on donne un incrément $\Delta\sigma$ de la pression de confinement de 100 kPa en condition non drainée, on mesure la réponse de la pression interstitielle Δu et on évalue le degré de saturation par la formule $B = \Delta u / \Delta\sigma$.

4. Résultats expérimentaux

les figures 4 et 5 représentent les résultats de la première série d'essais non drainés réalisée en utilisant la méthode de placement humide avec des densités initiales de 29 et 50% pour des contraintes de confinements initial de 50, 100 et 200 kPa. Ces résultats, montrent une tendance à l'instabilité et la liquéfaction des échantillons appelée liquéfaction statique sous cisaillement monotone surtout pour les confinements de 50 et 100 kPa. Sur les figures 4a et 5a, les courbe de cisaillement (q, ϵ_1) se caractérisent par des pics de résistance au cisaillement très marqués et de faible niveau, inférieurs à 20, 50 et 100 kPa pour les confinements de 50, 100 et 200 kPa respectivement correspondant à des déformations axiales faibles inférieures à 0.5%, suivis d'une chute très rapide de résistance aboutissant à une rupture de l'échantillon pour le confinement de 50 kPa, ou avec stabilisation progressive autour d'une valeur ultime stationnaire très faible pour les autres confinements, ce comportement rend compte de l'état très contractant du sable. Sur le plan (q, p') (figures 4b et 5b), on constate une décroissance continue de la contrainte effective moyenne p' et déplacement de l'état des contraintes vers l'origine des axes pour des confinements de 50 et 100 kPa, et stabilisation à l'état ultime.

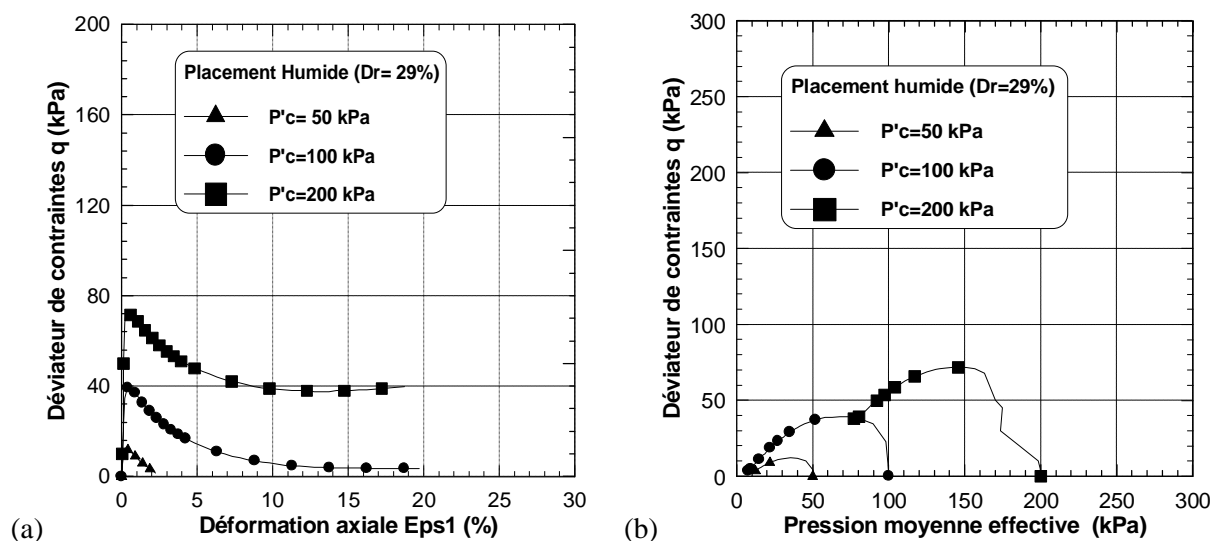


Figure 4: Essais non drainés sur sable lâche (placement humide):

(a) courbe de cisaillement, (b) chemin de contrainte

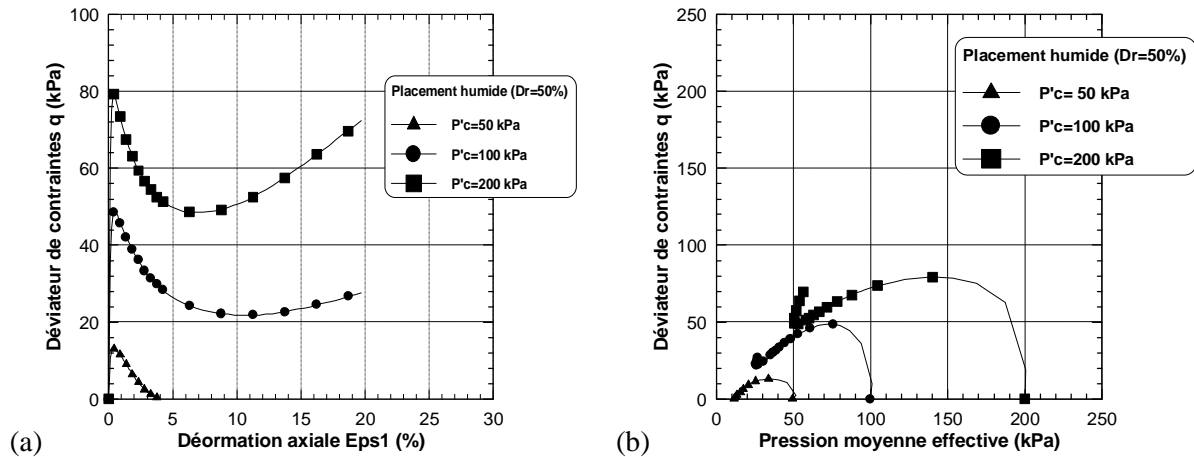


Figure 5: Essais non drainés sur sable moyennement dense (placement humide):
 (a) courbe de cisaillement, (b) chemin de contrainte

Une deuxième série d'essais triaxiaux de compression non drainée a été réalisée sur des échantillons reconstitués par la méthode de pluviométrie à sec, pour des densités relatives et à des pressions de confinement initiales identiques à ceux de la première série. Les résultats des essais sur les plans (q, ϵ_1) et (q, p') représentés sur les figures 6 et 7, montrent que le confinement affecte d'une manière considérable la résistance à la liquéfaction du sable. Les résultats de la figure 6a pour des essais avec une densité initiale de 29% (état lâche) cisailés sous une pression de confinement $\sigma'_c = 50$ kPa, l'échantillon montre une résistance plus faible que ceux cisailés sous des pressions de confinement $\sigma'_c = 100$ et 200 kPa ; sa résistance augmente au début du chargement jusqu'à une valeur de 20 kPa correspondante 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 (QSS) puis l'échantillon mobilise un effort résiduel augmentant la résistance de l'échantillon à l'état stable. Le plan de chemin de contraintes représenté sur la figure 5b présente une diminution de la contrainte effective moyenne jusqu'à une valeur de 20 kPa, puis une migration vers des valeurs supérieures caractérisant un état dilatatant. Mêmes tendances sont signalées pour les échantillons cisailés sous une contrainte $\sigma'_c = 100$ et 200 kPa, avec des pics pour le déviateur de contraintes de 40 kPa et 80 kPa respectivement.

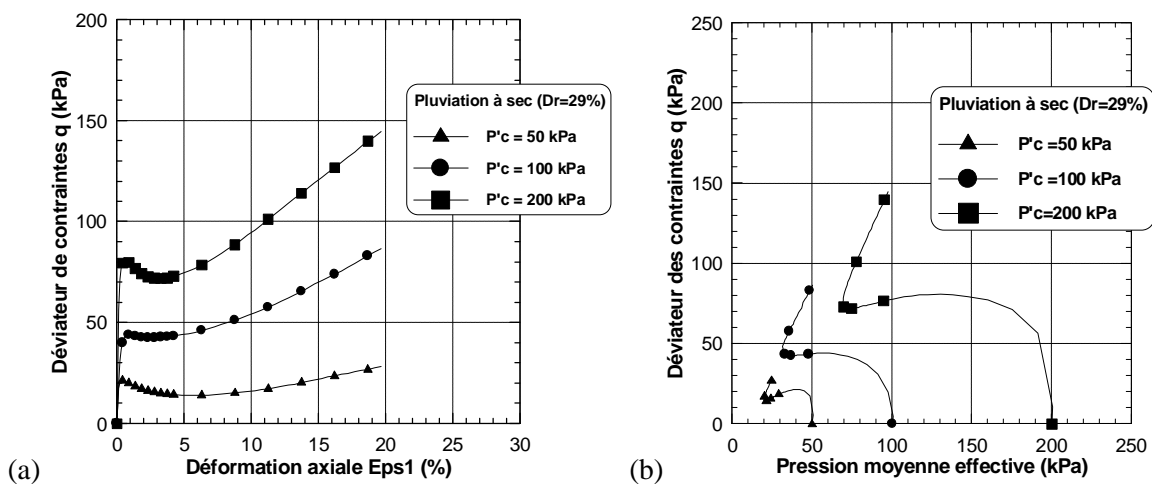


Figure 6: Essais non drainés sur sable lâche (pluviométrie à sec):
 (a) courbe de cisaillement, (b) chemin de contrainte

Les résultats de la figure 7, pour des échantillons moyennement denses, montrent un comportement plus résistant avec des pics du déviateur de contraintes variant de 25 kPa à 115 kPa pour des confinements de 50 kPa à 200 kPa, associés à un effort résiduel plus grand pour l'état stable.

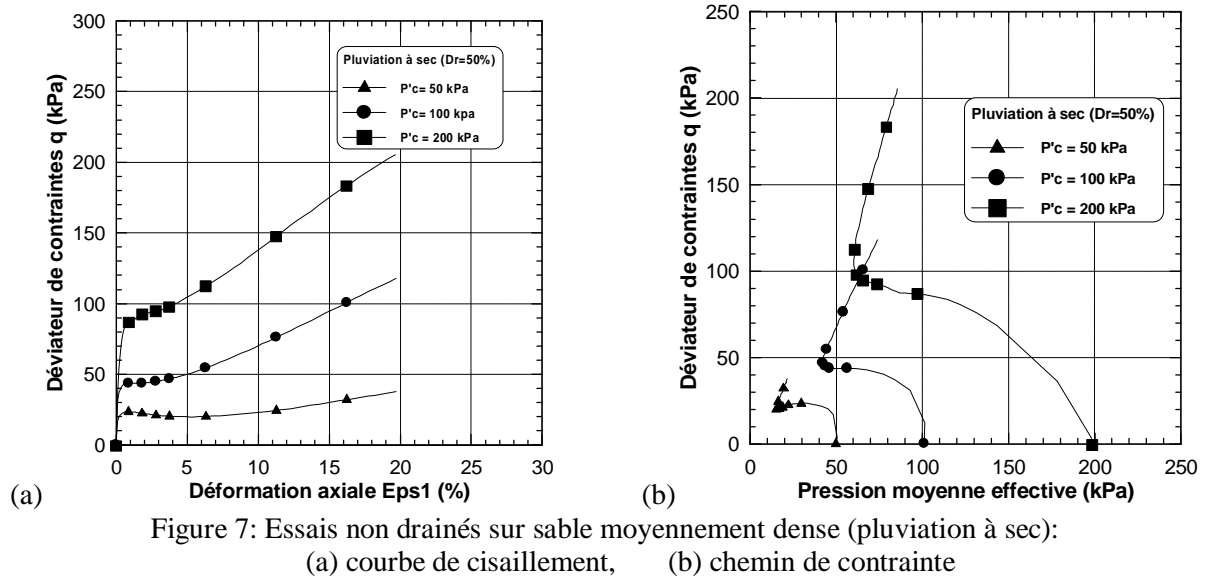


Figure 7: Essais non drainés sur sable moyennement dense (pluviation à sec):

(a) courbe de cisaillement, (b) chemin de contrainte

5. Conclusion

Cet article a comporté une présentation des résultats d'une étude en laboratoire de l'influence des méthodes de constitution des échantillons sur le comportement d'un sable de Chlef collecté sur des sites où le phénomène de liquéfaction est apparu durant les précédents séismes. L'étude a comporté des essais triaxiaux non drainés qui ont été réalisés à des densités de 29% et 50% pour des contraintes de confinement de 50, 100 et 200 kPa. Les résultats des essais ont montré que la densité initiale et la pression de confinement jouent un rôle important dans le comportement à la liquéfaction du sable. Ces essais ont permis aussi d'identifier deux structures sableuses bien différenciées, caractéristiques des modes de reconstitution, l'une stable et l'autre instable. La première méthode appelée pluviation à sec donne des échantillons plus stables (dilatants), la deuxième méthode dénommée placement humide favorise la contractance donc l'instabilité des échantillons. La différence de ces comportements peut être expliquée par le fait que dans la méthode de placement humide, la présence de l'eau confère au sol une plus grande porosité, ce qui aboutit à des échantillons facilement compressibles favorisant une réponse volumique très contractante rendant les sols très vulnérables à la liquéfaction. L'un des problèmes pratiques que peuvent poser ces résultats, est la caractérisation des matériaux sableux humides mis en place par remblaiement hydraulique pour la construction de remblais, sans possibilité de compactage efficace in situ et qui peuvent de ce fait, entraîner la formation de massifs à structure instable au sens de la liquéfaction, sans oublier la forte sismicité de la région qui pourrait induire une grande instabilité dans ces massifs sableux humides, du moins dans les couches de sables moyennement profondes.

7. Références bibliographiques

- Benahmed N., Canou J., Dupla J. C. 2004. Structure initiale et propriétés de liquéfaction statique d'un sable. Comptes Rendus Mécanique 332, p. 887-894.
- Canou J. 1989. Contribution à l'étude et à l'évaluation des propriétés de liquéfaction d'un sable. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Des Ponts et Chaussées, Paris.
- Durville J. L., Méneroud J. P. 1982. Phénomènes géomorphologiques induits par le séisme d'El-Asnam, Algérie. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., N° 120, juillet-août, p. 13-23.
- Lade P. V., J. M. Duncan J. M. 1973. Cubical triaxial tests on cohesionless soil. Journal Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, vol. 99, n° SM10, p. 793-812.
- Mulilis J. P., Seed H. B., Chan C. K., Mitchell J. K., Arulanadan K. 1977. Effects of sample preparation on sand liquefaction. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol.103, GT2, p. 91-108.
- Ouyed M. 1981. Le tremblement de terre d'El-Asnam du 10 octobre 1980: étude des répliques. Thèse de 3ème Cycle, Université de Grenoble.
- Vaid Y. P., Sivathayalan S., Stedman D. 1999. Influence of specimen reconstituting method on the undrained response of sand. Geotechnical Testing Journal, vol. 22, n° 3, p.187-195.

- Wood F. M., Yamamuro J. A., Lade P. V. 2008. Effect of depositional method on the undrained response of silty sand. *Canadian Geotechnical Journal*, vol.45, N° 11, p. 1525–1537.
- Yamamuro J. A., Wood F. M. 2004. Effect of depositional method on the undained behavior and microstructure of sand with silt. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, p.751-760.
- Yamamuro J. A., Wood F. M., Lade P. V. 2008. Effect of depositional method on the microstructure of silty sand. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45, N° 11, p.1538–1555.
- Zlatovic S., Ishihara K. 1997. Normalized behavior of very loose non-plastic soils: effects of fabric. *Soils and Foundations*, vol. 37, N° 4, p.47-56.