

---

# Influence de la méthode de reconstitution d'un sable lâche sur la résistance statique à la liquéfaction

Noureddine DELLA<sup>1\*</sup>, Ahmed ARAB<sup>1</sup>, Mostefa BELKHATIR<sup>1</sup>, Hanifi MISSOUM<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences des Matériaux et Environnement (LSME)  
Département de Génie Civil, Université de Chlef, 02000 – Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire de Construction Transport et Protection de l'Environnement (LCTPE)  
Département de Génie Civil, Université de Mostaganem, 27000 – Algérie

\* Auteur correspondant : [nour\\_della@yahoo.fr](mailto:nour_della@yahoo.fr)

---

**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 80% et à des pressions de confinement de 50, 100 et 200 kPa selon deux méthodes de préparation : pluviation à sec (PS) et placement humide (PH) avec une teneur en eau de 3%. Tous les échantillons ont été soumis à un chargement monotone après consolidation. Les résultats expérimentaux montrent que le confinement et la densité initiale 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, en mobilisant un effort résiduel plus grand.

**ABSTRACT.** An experimental study, realized in laboratory with the triaxial apparatus, proposes to evaluate the influence of sample preparation method on the undrained behaviour of the Chlef sand. The tests were conducted on samples of initial relative density of 29% and 80% and confining pressure of 50, 100 and 200 kPa using two depositional methods that include dry funnel pluviation (PS) and wet deposition (PH) with water content of 3%. All the samples were subjected to a monotonic loading after consolidation phase. The test results show that the initial confining pressure and the relative density affect considerably the resistance to liquefaction. However, it increases with the confinement and the density. 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.

**MOTS-CLÉS :** liquéfaction, sol, non drainé, pluviation à sec, placement humide, confinement.

**KEYWORDS :** liquefaction, sand, undrained, dry funnel pluviation, wet deposition, confinement, density, residual strength.

---

## 1. 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 certaines 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), 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. A cet effet nous avons réalisé deux séries d'essais en utilisant deux méthodes de déposition à savoir la pluviation à sec et le placement humide en vue de voir l'effet de la méthode de préparation sur la résistance à la liquéfaction.

## 2. Matériau utilisé

Les essais ont été réalisés sur du sable de Chlef (Algérie) contenant 0.5% de limon de l'Oued de Chlef qui traverse la ville de Chlef à l'ouest d'Alger. La courbe granulométrique de ce sable est donnée dans la figure 1. 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%. Le tableau 1 donne es caractéristiques physiques du sable utilisé. Les essais ont été réalisés pour deux densités relatives  $D_r = 29$  et 80% respectivement représentant l'état lâche et l'état dense.

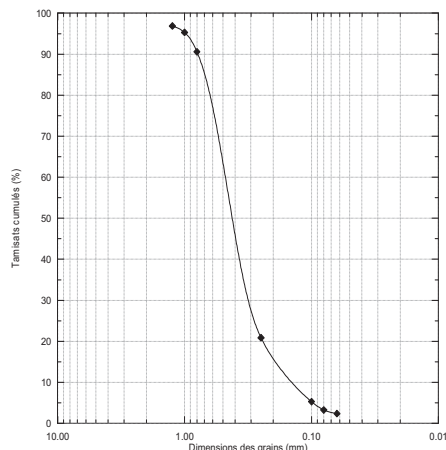


Figure 1. Courbe granulométrique du sable utilisé.

Matériau	$e_{\min}$	$e_{\max}$	$\gamma_{d\min}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{d\max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Cu (D <sub>60</sub> /D <sub>10</sub> )	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	Forme des grains
O/Chlef	0.54	0.99	1.34	1.73	2.67	3.2	0.45	0.15	Arrondie

Tableau 1. Caractéristiques du sable testé

### 3. Mode opératoire

Le dispositif expérimental utilisé comprend :

- Une cellule triaxiale autonome type Bishop et Wesley (Bishop et Wesley, 1975),
- Trois contrôleurs de pression /volume type GDS (200cc),
- Une pompe à vide relié 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 mesures.

#### 3.1. Le moule de fabrication des échantillons

Les échantillons sont fabriqués à l'aide d'un moule constitué de deux coquilles semi-cylindriques. Les deux coquilles peuvent être assemblées ou repoussées l'une de l'autre facilement à l'aide d'un collier de serrage. Dans le but de maintenir la manchette en latex le long des parois du moule, quatre conduits d'aspiration sont percés dans les coquilles. 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. Ce dernier peut être raccordé à une pompe à vide.

### 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. 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, 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.

#### 3.2.2. Placement humide (PH)

Cette méthode consiste à mélanger de manière la plus homogène possible, le sable préalablement séché avec une petite quantité d'eau 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. 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 teneur en eau a été fixée à 3%.

### 3.3. Préparation de l'échantillon

Les échantillons utilisés sont cylindriques de 70mm de diamètre et de hauteur. 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 manchette en latex,
- 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 :

$$Id = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min}) \quad [1]$$

### **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). 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.

### **3.5. Consolidation 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  $\Delta u$  et on évalue le degré de saturation par la formule  $B = \Delta u / \Delta\sigma$ .

## **4. Résultats des essais réalisés**

### **4.1. Effet du confinement**

#### **4.1.1. Pluviation à sec**

Une première série d'essais triaxiaux de compression non drainé a été réalisée sur des échantillons de densité relative 29 et 80% à des pressions de confinement initial de 50, 100 et 200 kPa. Les résultats des essais sur les plans (q,  $\epsilon_1$ ) et (q, p') montrent 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  $\sigma_c' = 50$  kPa 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 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 dilatant. Mêmes tendances sont signalés pour les échantillons cisailés sous une contrainte  $\sigma_c'=100$  et 200 kPa (figure 2), avec des pics pour le déviateur de contraintes de 40 kPa et 80 kPa respectivement.

Les Résultats de la figures 3, pour des échantillons denses ( $I_d = 0.80$ ), montrent un comportement plus résistant avec des pics du déviateur de contraintes jusqu'à 40 kPa pour un confinement de 50 kPa, jusqu'à 60 kPa pour un confinement de 100 kPa et jusqu'à 115 kPa pour un confinement de 200 kPa, associés à un effort résiduel plus grand pour l'état stable.

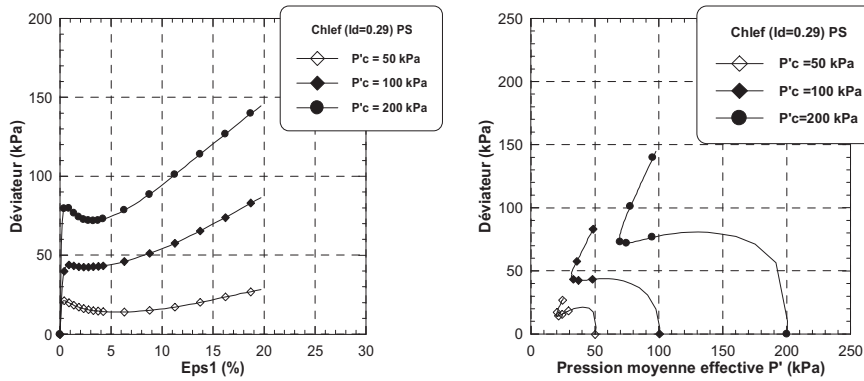


Figure 2. Essai de Chlef Lâche ( $I_d=0.29$ ) pluviation à sec

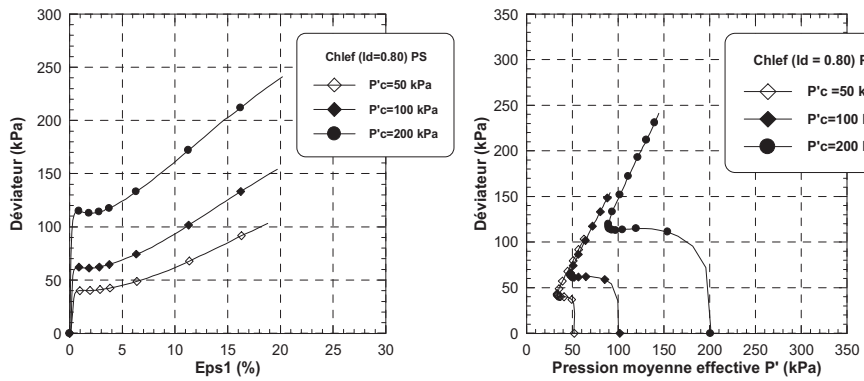


Figure 3. Essai de Chlef Dense ( $I_d=0.80$ ) pluviation à sec

#### 4.1.2. Placement humide

Une deuxième 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 initiales de 29 et 80 % pour des contraintes de confinements initial de 50, 100 et 200 kPa.

A l'inverse des échantillons réalisés par la première méthode, les résultats représentés sur les figures 4 et 5, 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. Les courbes de cisaillement ( $q, \varepsilon_1$ ) 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 ( $q, p'$ ), 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.

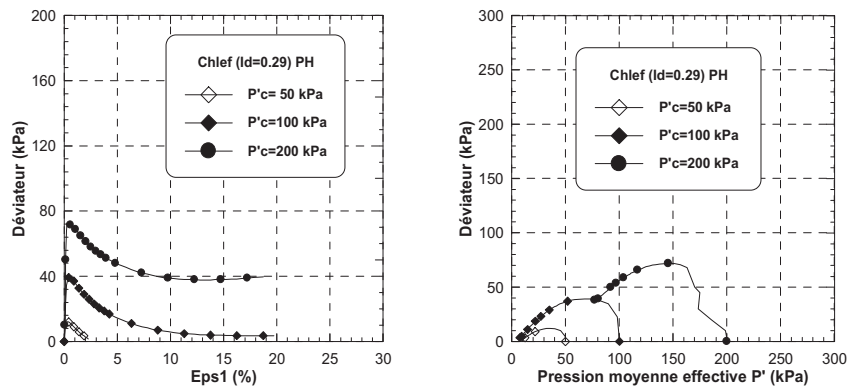


Figure 4. Essai de Chlef Lâche (Id=0.29) placement humide

## Etude expérimentale de l'effet de l'état initial sur la résistance au cisaillement

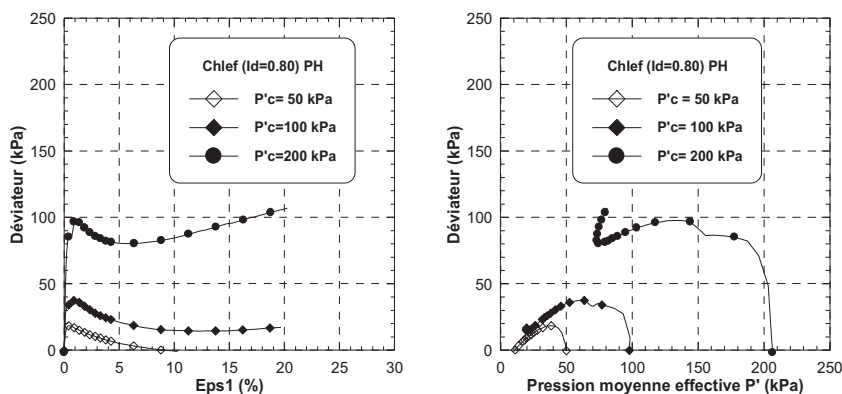


Figure 5. Essai de Chlef Dense ( $I_d=0.80$ ) placement humide

### 4.2. Effet de la méthode de déposition

La figure 6 montre les résultats de la série d'essais triaxiaux non drainés menés sur des échantillons de différentes densités avec les deux méthodes de déposition utilisées. On note dans ces résultats que la méthode de déposition par pluviation à sec (PS) donnent des valeurs du déviateur maximal beaucoup plus importants donc une résistance à la liquéfaction beaucoup plus grande, à l'inverse de la méthode de placement humide (PH) où l'on constate des valeurs du déviateur maximal plus faibles pour des densités faibles ou modérée (état lâche pour  $I_d= 0.29$ ) avec stabilisation progressive autour d'une valeur ultime stationnaire très faible ou nulle signifiant la liquéfaction de l'échantillon.

Les mêmes tendances sont constatées pour les variations des valeurs au pic du déviateur données sur la figure 7, où l'on remarque que les échantillons conçus par la méthode de pluviation à sec montrent une résistance au cisaillement monotone supérieure ( $q_{max}=240.97$  kPa à l'état dense et à un confinement de 200 kPa) à ceux fabriqués par placement humide ( $q_{max}=106.73$  kPa à l'état dense et à un confinement de 200 kPa).



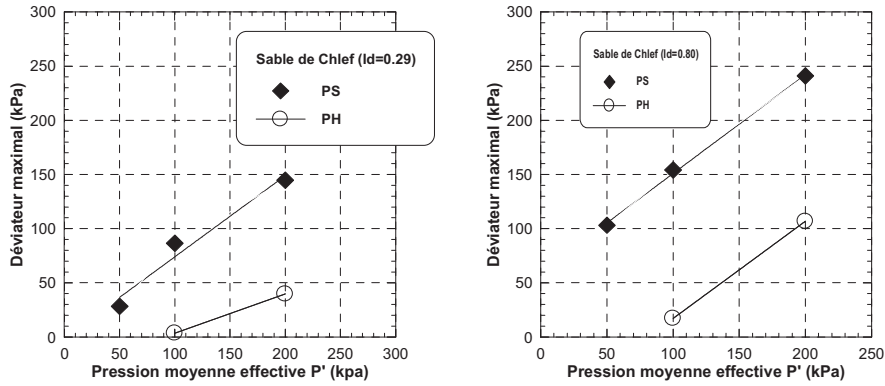


Figure 6. Influence de la méthode de déposition sur le déviateur maximal

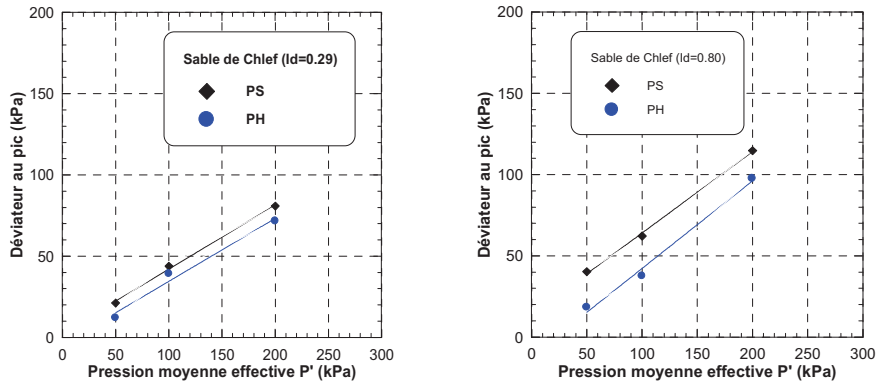


Figure 7. Influence de la méthode de déposition sur le déviateur au pic

Les résultats des figures 6 et 7 sont en parfaite concordance avec ceux des figures 2, 3, 4 et 5, et conformes à ceux trouvés par Benahmed et al. [1] et Canou [2] sur le sable d'Hostun RF, à savoir que la méthode de pluviation à sec favorise l'augmentation de la résistance au cisaillement monotone des échantillons, à l'inverse de la méthode de placement humide qui accélère l'instabilité des échantillons qui montrent une résistance beaucoup plus faible et provoque même le phénomène de liquéfaction du sable pour les faibles densités et faibles confinements menant à l'effondrement de l'échantillon.

Ces différences de comportement constatées entre les deux méthodes de déposition, peuvent s'expliquer par le fait que les molécules d'eau contenues dans les structures fabriquées par la méthode de placement humide constituent des macropores facilement compressibles lors de l'écrasement de l'échantillon et qui empêchent en même temps l'adhérence grain-grain d'où l'aptitude de l'échantillon à se contracter, à l'inverse des structures des échantillons fabriqués par la méthode de pluviation à sec qui montrent un comportement beaucoup plus dilatant.

## 5. Conclusion

Cet article a comporté une présentation des résultats d'une étude en laboratoire de l'influence des méthodes de reconstitution des échantillons sur le comportement d'un sable de Chlef. L'étude a comporté des essais triaxiaux non drainés qui ont été réalisés à des indices de densité de 0.29 et 0.80 pour des contraintes de confinement de 50, 100 et 200 kPa.

Les essais réalisés ont permis d'identifier deux structures sableuses bien différenciées, caractéristiques des modes de déposition, l'une stable et l'autre instable. La première méthode appelée pluviation à sec (PS) donne des échantillons plus stables (dilatants), la deuxième méthode dénommée placement humide (PH) favorise la contractance donc l'instabilité des échantillons. La différence de ces comportements peut être expliquée par le fait que la méthode (PH) donne des échantillons contenant des macropores facilement compressibles favorisant une réponse volumique contractante.

## 6. Bibliographie

- Benahmed N., Canou J., Dupla J.C., « Structure initiale et propriétés de liquéfaction statique d'un sable », Comptes Rendus Mécanique 332, 2004, p. 887-894.
- Canou J., « 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, 1989.
- Lade P.V., Duncan J.M., « Cubical triaxial tests on cohesionless soil », Journal Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, vol. 99, n° SM10, 1973, p. 793-812.
- Mulilis J.P., Seed H.B., Chan C.K., Mitchell J.K., Arulanadan K., « Effects of sample preparation on sand liquefaction », Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol.103, GT2, 1977, p. 91-108.
- Vaid Y.P., Sivathayalan S., Stedman D., « Influence of specimen reconstituting method on the undrained response of sand », Geotechnical Testing Journal, vol. 22, n° 3, 1999, p.187-195.
- Zlatovic S., Ishihara K., « Normalized behavior of very loose non-plastic soils: effects of fabric », Soils and Foundations, vol. 37, n° 4, 1997, p.47-56.