
Caractérisation de l'anisotropie du sable d'Hostun résultant de différents modes de fabrication par les Bender Elements

Mohamed ARIS – Nadia Benahmed – Stéphane Bonelli

Cemagref – 3275 Route de Cézanne – CS 40061 – 13182 Aix-en-Provence Cedex 5 – France.

Mohamed.aris@cemagref.fr

RÉSUMÉ. Nous présentons dans cette communication les résultats expérimentaux d'une étude réalisée sur du sable d'Hostun HN31. A partir de différents mode de reconstitution des échantillons, à savoir le damage humide, la pluviation à sec et la pluviation sous eau, on met en évidence l'influence du mode de préparation sur l'architecture microstructurale des échantillons. Dans cette étude, des capteurs piézoélectriques transmettant des ondes de cisaillement ont été placés sur la cellule triaxiale et sur le pourtour latéral de l'éprouvette d'essai dans différentes directions (HH, HV et VH) afin de caractériser l'anisotropie initiale et induite par chaque mode de déposition.

ABSTRACT. We present in this communication, the results of laboratory experimental tests on Hostun HN31 sand. Different methods for the reconstitution of the samples are used: wet tamping, air pluviation and water pluviation. It highlights the influence of modes of reconstitution of samples on structural architecture of granular materials. In this study, Piezoelectric transducers have been placed into a triaxial cell and on the lateral edges of the sample in different directions (HH, HV and VH) to investigate the inherent and induced anisotropy by measuring shear wave velocities after the samples reconstitution using the different mode of deposition.

MOTS-CLÉS : Anisotropie – damage humide – pluviation à sec – pluviation sous eau – bender éléments.

KEYWORDS: Anisotropy – moist tamping – dry pluviation – water pluviation – bender elements.

1. Introduction

L'anisotropie des sols est une caractéristique importante du comportement mécanique des sols en relation avec les ouvrages de génie civil. Elle est souvent observable dans le cas des sols surconsolidés ou déposés par couches lors du processus géologique de leur formation. Son existence est étroitement liée au mode de formation des sols (sédimentation, dépôts éoliens, remblaiement hydraulique dans le cas d'un dépôt artificiel, etc.) et aux sollicitations auxquelles est soumis le sol durant l'histoire de son chargement. Dans le premier cas, elle est appelée anisotropie inhérente et dans le second cas, il s'agit d'une anisotropie induite.

On présente dans cette communication les résultats expérimentaux d'une étude réalisée sur du sable d'Hostun HN31. A partir de différents mode de fabrication ou de reconstitution des échantillons, à savoir le damage humide, la pluviation à sec et la pluviation sous eau, on met en évidence à l'échelle de la microstructure l'influence du mode de préparation sur l'architecture microstructurale des échantillons. Ceci est réalisé à travers des mesures de propagation d'ondes ultrasonores. Cette technique représente une méthode d'investigation originale et non intrusive des réseaux de contacts au sein des milieux granulaires, le passage de ces ondes ne provoquant aucune modification des contacts entre les grains (Jia et al., 99). Il devient donc possible de caractériser l'anisotropie des matériaux. Un nombre important d'études expérimentales et théoriques utilisant cette technique sur les argiles existe dans la littérature (Pennington, 99 ; Pennington et al., 01), toutefois, les connaissances restent souvent parcellaires sur les sables.

Dans cette étude, des capteurs piézoélectriques transmettant des ondes de compression et de cisaillement ont été placés sur le pourtour latéral de l'éprouvette d'essai dans différentes directions (HH, HV et VH) afin d'étudier l'anisotropie inhérente résultant des différentes méthodes de préparation ainsi que l'anisotropie induite résultant du mode de chargement (Figure 1). Les résultats obtenus viennent confirmer et enrichir les observations faites avec le microscope électronique à balayage (MEB) par Benahmed (2001); Benahmed et al., (2004) à savoir l'existence de microstructures différentes (lacunaires, régulières, irrégulière, etc) résultant de différents modes de déposition.

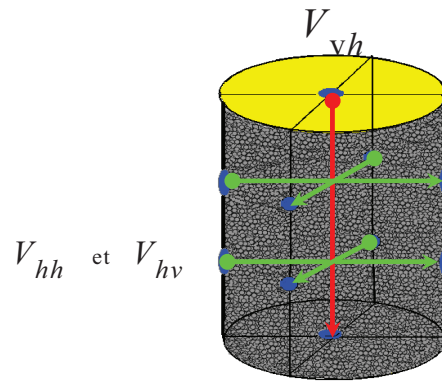


Figure 1. Propagation d'ondes dans différentes directions

2. Dispositifs expérimentaux et matériel utilisé :

L'appareil triaxial est l'un des appareils les plus connus dans la mécanique des sols. Il est constitué essentiellement d'une cellule triaxiale pouvant supporter une pression de confinement maximale de 1700 kPa montée sur une presse mécanique Whykeham Farrance de capacité de 50KN. Cette dernière permet la réalisation d'essais triaxiaux à déformation contrôlée avec des vitesses comprises entre 0.0001mm/mn et 5.9999 mm/mn. L'effort vertical est appliqué par un piston situé à la base qui peut se déplacer verticalement dans les deux sens.. La cellule peut recevoir des éprouvettes de 70 et 100 mm de diamètre et de 140 et 200 mm de hauteur. La Figure 2 montre une vue générale du dispositif expérimental utilisé.



Figure 2. *Vue du dispositif triaxial classique.*

La propagation d'ondes occupe aujourd'hui une place importante dans le domaine de la géotechnique. Cette technique permet de déterminer les propriétés élastiques du sol à partir de la mesure des vitesses de propagation des ondes.

Les premières apparitions des capteurs piézoélectriques utilisés dans la mécanique des sols remonteraient aux années soixante dix. Shirley et Hampton (1978) ont inventé le premier dispositif expérimental appelé « Bender éléments » permettant d'émettre et de recevoir des ondes de cisaillement à travers des échantillons du sol.

La Figure 3 présente une description détaillée du dispositif triaxial équipé du système de bender éléments. Deux de ces capteurs sont installés dans les embases inférieure et supérieure de la cellule triaxiale modifiée pour la propagation des ondes dans le plan vertical. Quatre autres capteurs ont été placés sur le pourtour latéral de l'échantillon pour la propagation d'onde dans le plan horizontal (Figure 4). Ces derniers sont fabriqués sous forme d'un T (Lings et Greening, 2001), permettant ainsi d'émettre et de recevoir des ondes de cisaillement et des ondes de compression dans différentes directions (V_{hh} et V_{hv}), donc une caractérisation plus fine de la

Caractérisation de l'anisotropie du sable d'Hostun

matrice de rigidité des sols, en particulier de l'anisotropie, qui a pu être mise en œuvre par Belotti (1996), Fioravante et Capoferri (2001) et Pennington et al. (2001).

Les capteurs sont protégés par une couche de résine d'époxy pour éviter tout contact entre l'élément piézo-électrique et l'eau. La taille des lamelles est déterminée de sorte à avoir un bon signal (Leong et al. 2009). À l'aide de la fonction génératrice, les impulsions sont envoyées aux capteurs émetteurs qui génèrent des vibrations tangentielles ou longitudinales de ces lamelles de l'ordre de 10^{-6} , correspondant pour les sables à un domaine de comportement de type quasi statique. Une fois que les récepteurs récupèrent les ondes propagées au sein de matériau granulaire, le signal est amplifié via des amplificateurs avant qu'il soit visualisé sur un oscilloscope, puis enregistré sur un ordinateur pour interprétation.

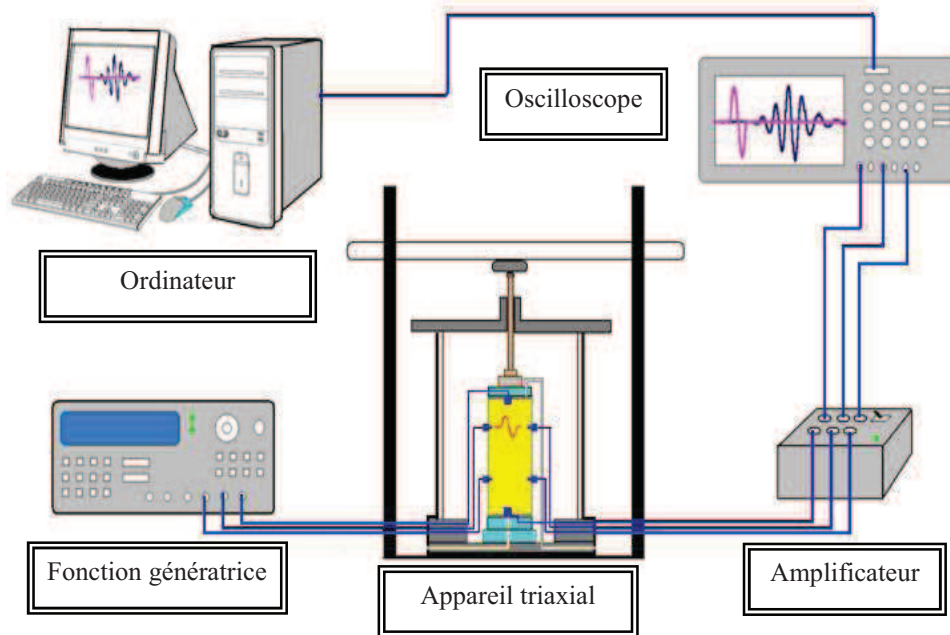


Figure 3. Schéma du dispositif expérimental de Bender éléments.

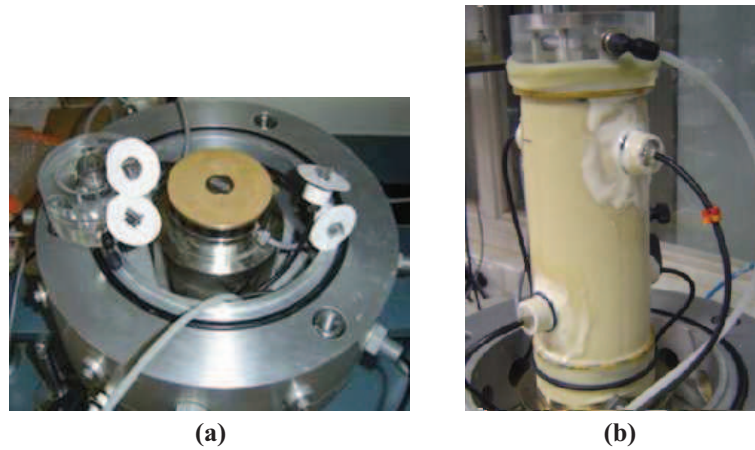


Figure 4. *Dispositif de mesure de la vitesse d'onde, (a) Bender éléments verticaux et horizontaux installés sur la presse triaxiale ; (b) échantillon instrumenté par les bender éléments.*

L'identification du temps de vol des ondes est une phase délicate car, selon les conditions expérimentales, les ondes parasites peuvent altérer la résolution de signal reçu. La mesure du temps de parcours des ondes de compression est relativement facile car ces ondes sont très rapides, contrairement aux ondes de cisaillement, qui sont moins rapides. Le temps de vol d'onde mesuré correspond à l'intervalle qui s'épare l'origine du signal émis et la première déviation du signal reçu (Brignoli et al 1996, Greening et al. 2003).

La distance de propagation d'onde dans l'échantillon correspond au chemin le plus court entre l'émetteur d'onde et le récepteur. De nombreux travaux accumulés ces dernières années montrent que la distance la plus vraisemblable est celle comprise entre les extrémités de la paire des Bender éléments, appelée la distance libre Tip-To-Tip (Dyvik and Madshus. 1985 ; Brignoli et al. 1996 ; Viggiani and Atkinson. 1995 ; Kawagochi et al. 2001).

Caractérisation de l'anisotropie du sable d'Hostun

Le matériau utilisé dans cette étude est le sable d'Hostun HN31, qui est un sable de référence couramment utilisé dans les laboratoires de recherche, C'est un sable fin et uniforme, à grains sub-angulaires à angulaires (Figure 5). Les principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 1. La courbe granulométrique est présentée dans la Figure 6.

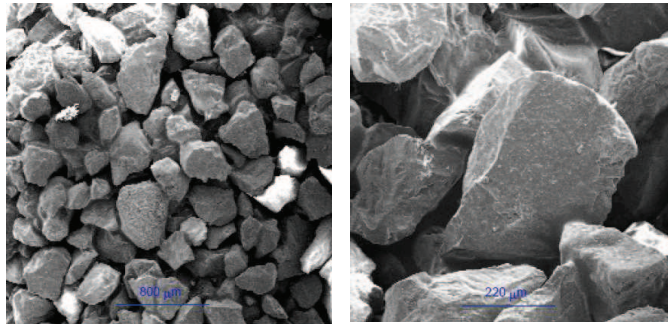


Figure 5. *Vue à l'échelle macroscopique de grains de sable d'Hostun (Benahmed, 2001).*

sand	e-max	e-min	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	ρ_s (g/cm ³)	Cu
HN31	1	0.65	0.25	0.334	0.352	2.65	1.41

Table 1. *Propriétés du sable d'Hostun HN31.*

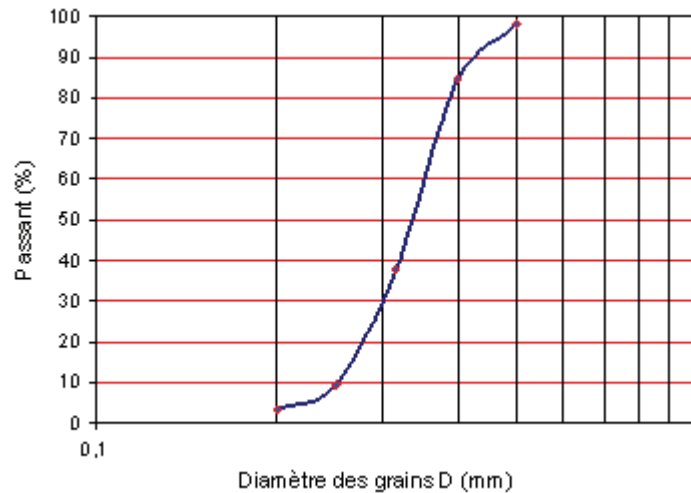


Figure 6. *Courbe granulométrique du sable d'Hostun*

3. Procédure de préparation des échantillons

Les éprouvettes de sable testées ont été fabriquées en utilisant trois méthodes de reconstitution différentes : damage humide, pluviation à sec, pluviation sous eau.

3.1. *Damage humide :*

La méthode de damage humide est la plus utilisée dans l'étude du comportement des sables. Cette technique permet de fabriquer des échantillons très lâches avec des indices de densité très faibles (Kramer et Seed 1988, Been and Jefferies, 1985, Canou, 1989, Canou et al., 1990, Ishihara 1993, Sladen et al., 1985, Verdugo and Ishihara 1996, Zlatovic et Ishihara, 1997; Vaid et al., 1990 ; 1999, Konrad, 1990; Konrad et al., 1991). Le principe consiste à malaxer du sable avec une teneur en eau d'environ 1 à 3 % de manière à obtenir un milieu foisonné grâce à la cohésion capillaire. Le matériau est ensuite déposé dans le moule de fabrication, en sept couches de hauteur égales.

3.2. Pluviation à sec

La pluviation à sec est l'une des techniques de fabrication des éprouvettes du sable qui permet d'obtenir des structures uniforme et homogènes assez proches de dépôt naturel des sols. La technique consiste à remplir le moule de fabrication vide par déversement en pluie du sable sec en utilisant un pluviateur à sable (Benahmed 2001). L'indice de densité des éprouvettes est contrôlé par le débit massique de sable et la hauteur de chute.

3.3. Pluviation sous eau

La pluviation sous eau s'apparente au processus de sédimentation rencontré dans la nature. Le principe de cette méthode est identique à la pluviation à sec présenté ci-dessus sauf que dans ce cas, le déversement du sable se fait au dessus du moule déjà pré rempli d'eau désaérée

4. Résultats et discussion

4. 1. Anisotropie Inhérente

Trois échantillons de densité relative de 3% ont été préparés différemment (Damage humide, Pluviation à sec et pluviation sous eau). Le tableau 2 présente les résultats des mesures de vitesse d'onde de cisaillement enregistrées après la phase de saturation des éprouvettes. L'indice d'anisotropie est caractérisé par le rapport V_{shh}/V_{shv} . Malgré que les trois échantillons aient le même indice de densité ($I_d = 0.03$), les indices d'anisotropie ne sont pas identiques. La technique de damage humide a induit une anisotropie initiale plus importante par rapport à la pluviation à sec et sous eau.

Mode de préparation	Vitesse d'onde de cisaillement (m/s)		V _{hh} /V _{hv}
	V _{hh}	V _{hv}	
Damage humide (W-T)	203.4	190	1.07
Pluviation à sec (D-P)	213.2	217.4	0.98
Pluviation sous eau (W-P)	218.5	220.4	0.99

Table 2. Comparaison des indices d'anisotropie pour chaque mode de préparation.

4.2. Anisotropie Induite

Dans le but de présenter l'évolution de l'anisotropie dans les matériaux granulaires durant le chargement, nous avons réalisé trois essais triaxiaux de compression non drainé, les trois éprouvettes ayant le même indice des vides initiales ($I_d=0.03$), mais préparées avec différents modes de fabrication (Damage humide (W-T), pluviation à sec (D-P) et pluviation sous eau (W-P)).

La Figure 7 illustre l'évolution de l'indice d'anisotropie horizontal (V_{hh}/V_{hv}) observée durant le cisaillement pour les trois échantillons. Nous pouvons voir clairement son évolution en fonction de la déformation axiale. Une augmentation rapide de l'anisotropie au début de l'essai jusqu'au 1% de déformation, correspond au pic de cisaillement, ce comportement est dû à une forte création des nouveaux contacts entre les grains. A l'état critique, les vitesses V_{hh} et V_{hv} ont une tendance d'évolution similaire et l'indice d'anisotropie se stabilise autour de 0,83.

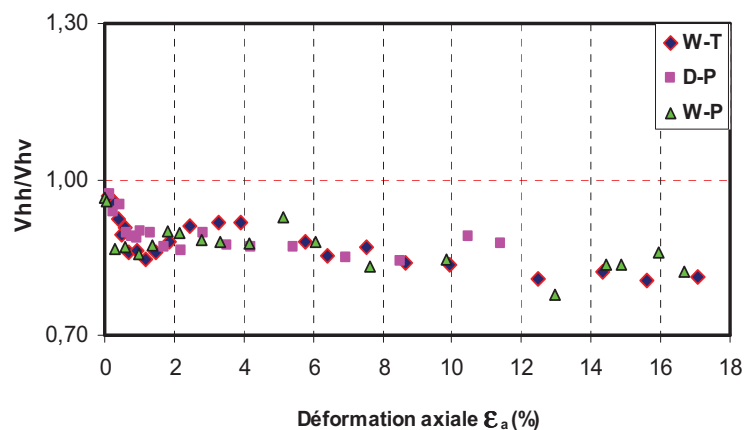


Figure 7. Evolution de l'indice d'anisotropie en fonction de la déformation axiale ($I_d=0.03$).

6. Conclusion

Une étude de la propagation d'ondes de cisaillement avec des Bender éléments réalisée est présentée. Les mesures ont démontrées l'existence de l'anisotropie initiale et induite dans les matériaux granulaires. Pour les mêmes indices des vides ($I_d=0.03$), nous avons vu que le damage humide a présenté une anisotropie initiale plus marquante par rapport à la pluviation à ses et sous eau, et que l'anisotropie initiale est moins importante que l'anisotropie induite par le chargement. Nous avons pu également que l'indice d'anisotropie induit est plus important au début d'essai, qui est probablement lié aux nombres de contact des grains provoqués par le cisaillement.

7. Bibliographie

- Been, K., and Jefferies, M.G., «A state parameter for sands». *Géotechnique*, Vol. 35, No. 2, 1985, p. 99-112.
- Belotti, R., Jamiolkowski, M., Lo Presti, D., and O'Neill, D.A., «Anisotropy of small strain stiffness in Ticino sand». *Géotechnique*, Vol. 46, N. 1, 1996, p. 115-131.
- Benahmed, N., «Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique : Application aux phénomènes de liquéfaction et de mobilité cyclique». *Thèse de doctorat* de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 2001.
- Benahmed N, Canou J, Dupla J C., «Structure initiale et propriétés de liquéfaction statique d'un sable». *C R Mécanique* 332, 2004, p. 887-894.
- Brignoli, E.G.M., Gotti, M. and Stokoe, K. H., «Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers». *Geotechnical Testing Journal*, Vol.19, n° 4, 1996, p. 384-397.
- 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, France, 1989.
- Canou, J., El hachem, M., and Kattan, A., «Propriétés de liquéfaction statique d'un sable lâche». *25° Colloque du Groupe Français de Rhéologie*, Grenoble.
- Dyvik, R., and Madhus, C., «Lab measurements of Gmax using bender elements. Advances in the art of testing soils under cyclic conditions». Khosla, *ASCE, New York*, 186-196.
- Fioravante, V., and Capoferri, R., «On the Use of Multi-directional Piezoelectric Transducers in Triaxial Testing». *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 24, No. 3, 2001, p. 243-255.
- Greening, P.-D., Nash, D.-F., Benahmed, N., Ferreira, C. and Viana da Fonseca, A., «Comparison of shear wave velocity measurements in different materials using time and frequency domain techniques». *Deformation Characteristics of Geomaterials*, Di Benedetto et al., 2003, p.381-386.
- Ishihara, K., «Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics», *Livre*, Oxford, Clarendon Press, 1996.
- Ishihara, K., «Liquefaction and flow failure during earthquakes». *Géotechnique* 43, No. 4, 1993, p. 351-415.
- Jia, X., Caroli, C., and Velicky, B., . «Ultrasound propagation in externally stressed granular media». *Physical Review Letters* 82, 9, 1999, p. 1863-1866.
- Kawagochi, T., Mitachi, T., and Shibuya, S., and Sano, Y., «Evaluation of elastic shear modulus G in laboratory bender element test». *Gakkai Ronbunshu*, No. 694, 2001, p.195-207
- Konrad, J.-K., «Minimum undrained strength of two sands». *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 6, 1990-a, p. 932-947.
- Konrad, J.-K., «Minimum undrained strength versus steady - state strength of sands». *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 6, 1990-b, p. 948-963.

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

- Konrad, J.-M., Flavigny, E., and Meghachou, M., «Comportement non drainé du sable d'Hostun lâche». *Revue Française de Géotechnique*, No. 54, 1991, p. 53-63.
- Kramer, S.-L., and Seed, H.B., «Initiation of soil liquefaction under static loading conditions». *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114. No. 4, 1988, p. 412-430.
- Leong, E.-C., Cahyadi, J., and Rahardjo, H., «Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender-extender elements». *Canadian Geotechnical Testing Journal*, Vol. 46. 2009, p. 792-812.
- Lings, M.-L., and Greening, P.-D., «A novel Bender/extender element for soil testing». *Géotechnique* vol. 51, n°8, 2001, p 713-717.
- Pennington, D.-S., Nash F.-T and Lings, L., «Anisotropy of G₀ shear stiffness in Gault Clay». *Géotechnique* 47, No. 3, 1997, p. 391-398.
- Pennington, D.-S., Nash F.-T., and Lings, L., «Horizontally Mounted Bender Elements for Measuring Anisotropic Shear Moduli in Triaxial Clay Specimens», *Geotechnical testing journal*, Vol. 24, n° 2, 2001, p. 133-144.
- Pennington, D.-S., «The anisotropic small strain stiffness of Cambridge Gault clay. *Thèse de doctorat* de l'université de Bristol, 1999.
- Shirley, D.-J., and Hampton, L.-D., «Shear wave measurement in laboratory sediments, *Journal of Acoustics*, Vol. 63, n° 2, 1978, p. 607-613.
- Sladen, J.-A., Hollander, R.-D., and Krahn, J., (1985). «The liquefaction of sands, a collapse surface approach». *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 22, 1985, p. 564-578.
- Vaid, Y.-P., Chung, E.-K., and Kuerbis, R.-H., «Stress path and steady state». *Canadian Geotechnical, Journal*. Vol. 27, 1999, p. 1-7.
- Verdugo, R., and Ishihara, K., «The steady state of sandy soils». *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 2, 1996, p. 81-91.
- Viggiani, G., and Atkinson, J.-H., «Interpretation of bender element testes». *Géotechnique*, Vol. 45 n 1, 1995-a, p. 149-154.
- Viggiani, G., and Atkinson, J.H., «Stiffness of fine-grained soil at very small strains». *Géotechnique*. Vol. 45. No. 2. 1995-b, p. 249-265.
- Zlatovic, S., and Ishihara, K., «Normalized behaviour of very loose non-plastic soils: effects of fabric». *Soils and Foundations*, Vol. 37, No. 4, 1997, p. 47-56.