

# Comportement en petites déformations d'un sol traité à la chaux

## Small strain behavior of a lime-treated soil

Hibouche A., Taibi S.

Laboratoire LOMC, CNRS UMR 6294, Université du Havre, 76600 Le Havre, France

Fleureau J.-M.

Laboratoire MSS-Mat, CNRS UMR 8579, Ecole Centrale Paris, 92295 Châtenay-Malabry, France

Herrier G.

Lhoist Recherche et Développement s.a., 1400 Nivelles, Belgique

**RÉSUMÉ :** L'étude des sols en petites déformations ( $\varepsilon \sim 10^{-5}$ ) nécessite des mesures locales du champ de déformation. Dans le cas des sols traités aux liants, leur comportement en petites déformations dépend de l'état initial, du degré de saturation et de l'âge du matériau traité. L'article présente une étude expérimentale sur des matériaux naturels traités aux liants et compactés. Le dispositif expérimental est composé d'une cellule triaxiale équipée de deux types de capteurs de proximité pour mesurer les déformations locales: des jauges de déformations et des capteurs à Effet Hall. Une étude comparative de ces deux systèmes de mesure est réalisée. Les modules élastiques déduits des cycles dans le domaine des déformations inférieures à  $10^{-4}$  ont été comparés avec ceux déduits des mesures des vitesses d'ondes élastiques. Des relations entre les modules, les niveaux de déformation et l'âge du matériau traité sont ainsi établies. Les domaines d'application concernent les ouvrages de terrassements d'infrastructure en sols traités à la chaux.

**ABSTRACT:** The study of soils in small strains ( $\varepsilon \sim 10^{-5}$ ) requires local measurements of the strain field. In the case of soils treated with binders, their behavior depends on the initial state, the degree of saturation and the hardening time. The paper presents an experimental study on natural materials treated with binders and compacted. The experimental device consists of a triaxial cell equipped with two types of proximity sensors to measure local strains: strain gauges and Hall Effect sensors. A comparative study of the two systems is performed. The elastic moduli derived from cycles in the strain field less than  $10^{-4}$  were compared with those deduced from the elastic wave speed. Relations between the modules, the strain levels and the hardening time are thus established. Applications include lime-treated infrastructure earthwork.

**Mots-clés:** Sols traités, chaux, petites déformations, non saturation, triaxial, effet Hall

**Keywords:** Treated soils, lime, small strains, unsaturation, triaxial, Hall effect

### 1 INTRODUCTION

La technique du traitement des sols à la chaux est connue, principalement dans les domaines routiers et ferroviaires, pour améliorer la maniabilité des sols, faciliter leur mise en oeuvre et leur conférer, après compactage, des performances mécaniques répondant aux exigences des ouvrages. La compréhension du comportement des matériaux en petites déformations est nécessaire du point de vue pratique. En effet, les déformations de service dans la plupart des ouvrages restent généralement très faibles (typiquement inférieures à  $10^{-4}$  dans les routes et  $10^{-3}$  dans les fondations). La littérature souffre d'un manque de données expérimentales sur la rigidité des sols dans ce domaine, en particulier des sols non saturés (Brull 1980, Wu et al. 1989, Quin et al. 1991, Kheirbek-Saoud 1994, Gomes Correia et al. 1987). Aussi, une analyse plus rationnelle basée sur le comportement mécanique des sols, en particulier en ce qui concerne les changements dans la succion matricielle (ou pression capillaire) est nécessaire (Fleureau et al., 2001, 2002, Taibi et al. 2008).

Différentes techniques de mesures des petites déformations ont été développées depuis une trentaine d'années. On distingue essentiellement deux techniques (Dufour-Laridan 2001): les méthodes quasi-statiques et les méthodes dynamiques. Concernant les techniques quasi-statiques, différents types de capteurs ont été développés. Jardine et al. (1984) ont développé un montage de précision en compression se basant sur des inclinomètres « electrolevel ». Cuccovilo & Coop 1997, cités par Cabarkapa et al., 1999 proposent l'utilisation de LVDT (Linear Variable Differential Transformer), qui sont des capteurs inductifs linéaires de déplacement miniatures submersibles pour mesurer les déformations axiales et radiales

locales jusqu'à  $10^{-6}$ . Plusieurs auteurs choisissent d'utiliser les capteurs de proximité pour mesurer la déformation des échantillons. Ces capteurs de proximité fonctionnent sur le principe d'induire un courant dans une cible conductrice par un champ électromagnétique et de mesurer le champ électromagnétique induit par ce courant. La mesure se fait sans contact (Santucci de Magistris et al., 1999, Hoque et al., 1997).

Clayton & Khatrush (1986), ont développé un capteur de déplacement basé sur l'effet Hall pour mesurer des petites déformations, de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-5}$ , directement sur les échantillons. Les LDT (Local Deformation Transducer), développés par Goto et al. (1991), utilisent comme composant de mesure des jauges de déformations locales de l'ordre de  $10^{-6}$ . Araujo et Gomes Correia (2009) ont adapté ces capteurs LDT pour la mesure des déformations axiales et diamétrales sur des chemins triaxiaux isotropes et déviatoriques.

Contrairement aux méthodes quasi-statiques, les méthodes dynamiques mettent en jeu des variations de vitesse de déformation suffisamment élevées pour que les forces d'inertie soient non-négligeables dans la relation fondamentale de la dynamique. Elles font intervenir des propagations d'ondes stationnaires ou non: Géophones (Modoni et al., 1999), bender elements (Dyvik & Madshus, 1985; Kuwano et al., 1999; Fioravante, 2000), colonne résonante (Cascante & Santamarina 1997, Tatsuoka et al., 1997, Tatsuoka et al., 1999).

Dans cet article, les résultats d'une étude expérimentale de la mesure des modules élastiques en petites déformations sur un limon traité à la chaux compacté sont présentés. Le but de cette étude est d'évaluer la possibilité d'utiliser un capteur de proximité composée d'une jauge de déformation collée à même l'échantillon. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus à l'aide d'un capteur à effet Hall.

## 2 MATÉRIAUX ET MÉTHODE

### 2.1. Matériaux

Il s'agit d'un limon traité à la chaux provenant d'un remblai expérimental compacté in situ.

La chaux utilisée est une chaux vive calcique CL 90-Q fournie par Lhoist, conforme à la norme EN 459-1.

Les caractéristiques physico-chimiques du matériau sont résumées dans le tableau 1.

### 2.2. Méthodes

Pour la mesure du comportement du matériau en petites déformations, deux techniques expérimentales ont été testées:

La première technique est basée sur l'utilisation de capteurs à effet Hall, composés d'une plaque dans laquelle on fait circuler un courant électrique tout en mesurant la différence de potentiel sur une ligne transversale à la circulation du courant (Figure 1). Si un champ magnétique normal à la plaque est appliqué, les électrons du courant seront déviés vers l'un ou l'autre des points dont on mesure le potentiel, créant ainsi une accumulation de charges en ce point et donc une tension mesurable (Dufour-Laridan 2001).

La seconde technique est basée sur l'utilisation de jauges de déformation. Il s'agit de composants électroniques ayant une résistance variable en fonction de leur élongation dans la direction de mesure. L'originalité de cette technique est que les jauges sont collées à même le matériau. Le problème posé habituellement avec les géomatériaux dont la nature granulaire ne permet souvent pas de collage direct a été résolu en réalisant à la surface du matériau une interface très souple dans la zone de mesure sur laquelle vient se coller la jauge. L'interface est composée d'un mastic étalé dans une rainure préalablement taillée dans le matériau. La figure 2 présente un schéma de principe de cette technique.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du limon naturel et traité à la chaux

<b>Limon naturel</b>	
Passants à 80 µm (%)	98
Valeur de bleu de méthylène (g/100g)	2.50
Indice de plasticité (%)	7 à 8
Teneur en eau à l'échantillonnage (%)	17.9
<b>Limon traité à 2.5% de chaux</b>	
Teneur en eau finale (%)	19.5
Densité sèche après compactage (g/cm <sup>3</sup> )	1.68
Taux de compactage (% $\gamma_{d,OPN}$ )	97

## 3 COMPARAISON DES DEUX TECHNIQUES

Des essais ont été réalisés sur un échantillon prélevé depuis un remblai expérimental constitué de limon traité à la chaux compacté et âgé de 180 jours (Tableau 1). L'échantillon de 80 mm de diamètre et 160 mm de hauteur, est équipé des deux capteurs de proximité pour la mesure locale de la déformation axiale : deux capteurs à effet Hall et deux jauges de déformation diamétralement opposées. Pris séparément, les deux capteurs à effet Hall et les deux jauges donnent des réponses quasi identiques. En revanche, on constate une différence de réponse entre les capteurs à effet Hall et les jauges de déformation.

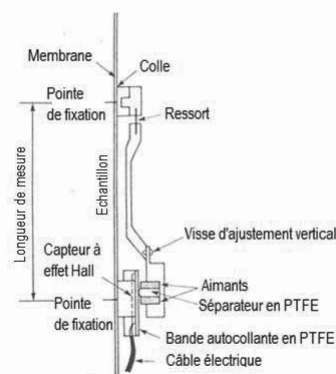


Figure 1. Principe de fixation d'un capteur à effet Hall sur l'échantillon

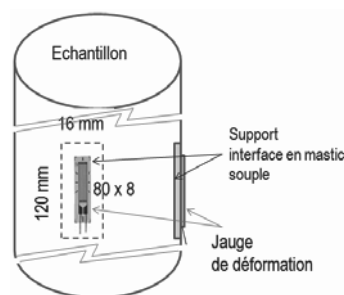


Figure 2. Principe de fixation d'une jauge de déformation sur l'échantillon

Les résultats comparatifs entre la jauge et le capteur à effet Hall sont représentés dans les plans [temps ; déplacement axial] et [déformation axiale ; déviateur de contrainte], et ce, pour deux contraintes de confinement différentes (Figure 3).

On constate pour les deux contraintes de confinement que le capteur à effet Hall mesure des amplitudes de déformation plus importantes que la jauge. Par ailleurs, on remarque que la réponse de la jauge est quasi instantanée lors des cycles de décharge-recharge, alors que le capteur à effet Hall affiche un retard dans sa réponse matérialisé par des pics légèrement arrondis dans le plan [temps ; déformation axiale], contrairement aux pics vifs des jauges. L'interprétation de ces résultats dans le plan [déformation axiale ; module d'Young] (Figure 4) montre que les modules élastiques donnés par la jauge sont nettement supérieurs (environ trois fois) à ceux donnés par le capteur à effet Hall. Par ailleurs, la mesure des vitesses de propagation des ondes sonores sous confinement nul donne un module du même ordre de grandeur que celui donné par la jauge.

Ce constat permet de remettre en cause le bon fonctionnement du capteur à effet Hall. En effet, la fixation de ce capteur est basée sur l'introduction d'épingles métalliques dans un matériau compacté et rigidifié après 180 jours par le traitement à la chaux. Cette opération est délicate et génère généralement des trous de diamètre légèrement supérieur à celui des épingles, ce qui se traduit par un léger jeu des points de fixation qui peut avoir des conséquences importantes sur la réponse du capteur.

Dans ce qui suit, nous avons sélectionné et retenu le capteur basé sur les jauges de déformation et qui semble plus fiable et conforme aux mesures des vitesses des ondes sonores.

## 4 RÉSULTATS

Ces résultats concernent des essais triaxiaux en petites déformations à teneur en eau constante sur des échantillons non saturés. Les contraintes de confinement varient de 0 à 300 kPa. Pour chaque contrainte de confinement, des chargements cycliques sous des déviateurs de plus en plus importants avec

mesure locale des déformations axiales sont effectués. Le tableau 2 résume les contraintes appliquées et les chemins déviatoires suivis. La teneur en eau initiale moyenne du matériau est de 20%.

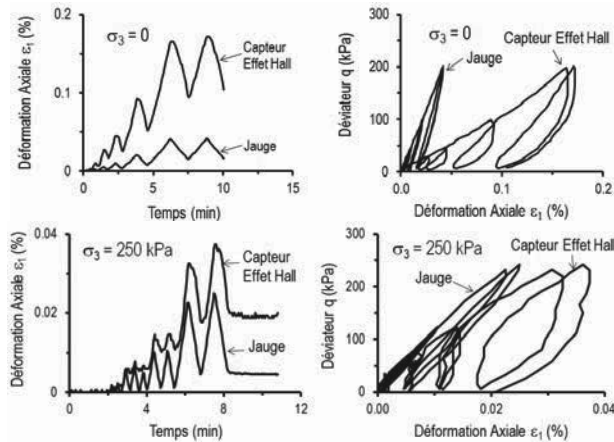


Figure 3. Comparaison des réponses des deux capteurs lors de chargement en petites déformations pour deux contraintes de confinement.

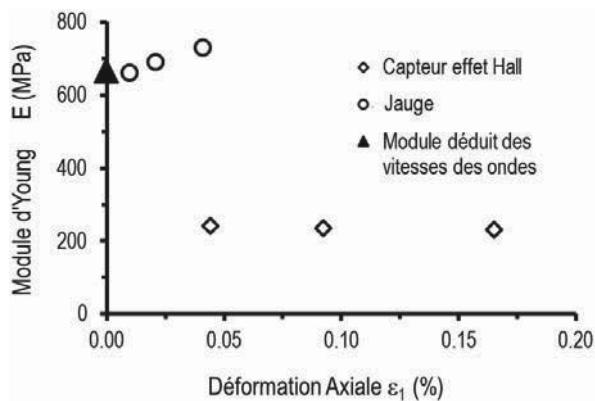


Figure 4. Variation du module élastique en fonction de la déformation axiale et comparaison avec les mesures déduites des vitesses des ondes sonores, dans le cas d'une contrainte de confinement nulle.

Tableau 2- Chemins déviatoires suivis

Contrainte de confinement totale $\sigma_3$ (kPa)	Cycles sous déviateur $q$ (kPa) pour chaque valeur de $\sigma_3$
0 $\rightarrow$ 300 par increment de 50 kPa	Cycle 1- 0 $\rightarrow$ 50 $\rightarrow$ 0 (2 cycles) Cycle 2- 0 $\rightarrow$ 100 $\rightarrow$ 0 (2 cycles) Cycle 3- 0 $\rightarrow$ 200 $\rightarrow$ 0 (2 cycles)

Les figures 5 et 6 présentent les chemins de chargement déviatoire des matériaux âgés respectivement de 28 et 180 jours. Les résultats concernent à titre d'exemple les essais réalisés sous une contrainte de confinement égale à 150 kPa.

Pour chacun des cycles réalisés à un niveau de déviateur donné, le module élastique est mesuré en considérant la pente moyenne du cycle déchargement-rechargement.

Pour interpréter ces essais, les figures 7 et 8 présentent pour les deux échéances, la variation du module élastique en fonction respectivement de la contrainte totale de confinement et de la déformation axiale pour différentes valeurs de confinement et différents déviateurs. Sur ces courbes, la valeur du module initial déduite des mesures des vitesses de propagation des ondes est représentée sur l'axe des ordonnées. On remarque qu'il y a un bon accord avec les valeurs déduites de l'essai

triaxial. Par ailleurs, pour les niveaux des déviateurs testés, où les déformations  $\varepsilon_1$  résultants n'excèdent pas 0,045% (Figure 8), le module baisse légèrement avec le niveau de déformation pour une contrainte de confinement donnée sauf dans le cas où la contrainte de confinement est nulle, on remarque que le module reste quasi-constant et égal à la valeur déduite des vitesses de propagation des ondes. Ces observations sont valables dans le plan  $[q, E]$  (Figure 9). En revanche, le module augmente globalement avec la contrainte de confinement, évoluant de 0,68 GPa pour une contrainte nulle à 1,34 GPa pour un confinement de 300 kPa.

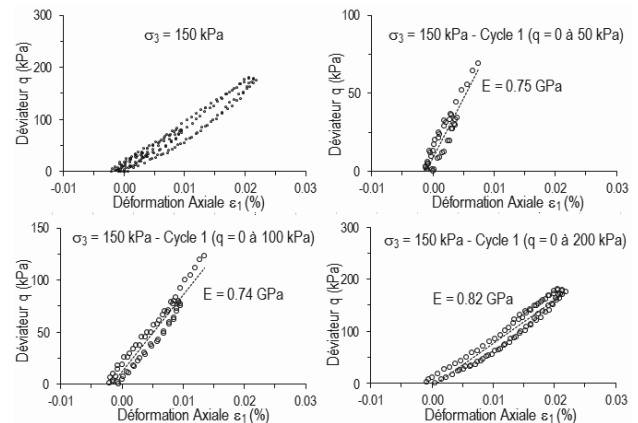


Figure 5. Evolution du module en fonction du déviateur de contrainte à 28 jours d'âge, pour une contrainte de confinement de 150 kPa

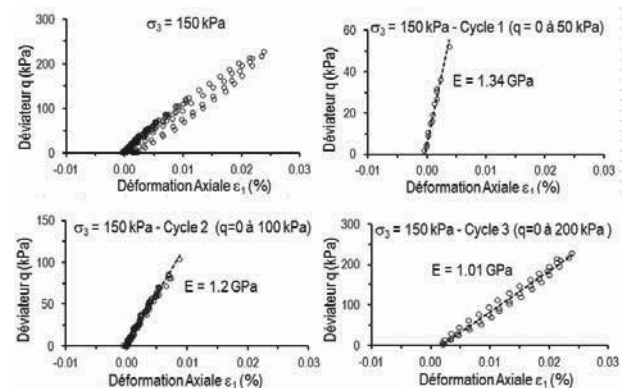


Figure 6. Evolution du module en fonction du déviateur de contrainte à 180 jours d'âge, pour une contrainte de confinement de 150 kPa.

## 5 CONCLUSION

La mesure des modules élastiques en petites déformations dans les sols traités reste une opération complexe et délicate, liée aux conditions aux limites géométriques de fixation des capteurs sur un sol rigidifié.

Les résultats présentés ont consisté d'abord en une comparaison de trois techniques de mesure différentes, qui a mis en évidence les limites des capteurs à effet Hall lorsqu'il s'agit de les fixer sur un sol traité et donc rigidifié.

La technique de mesure mise au point, basée sur les jauges de déformation collées à même l'échantillon via une interface élastique, semble cohérente avec les mesures indirectes basées sur les vitesses de propagation des ondes sonores.

Les résultats obtenus sur un limon traité à la chaux ont montré que le module augmente avec la contrainte de confinement et l'âge du matériau. En revanche, il varie très peu avec le niveau de déformation dans le domaine de contraintes testées.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le FEDER (Fonds européen de développement régional) et le groupe Lhoist pour leur soutien et leurs encouragements.

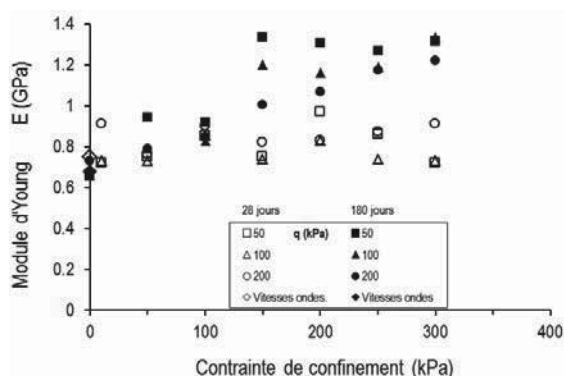


Figure 7. Evolution du module en fonction de la contrainte totale de confinement pour différentes valeurs du déviateur de contrainte.

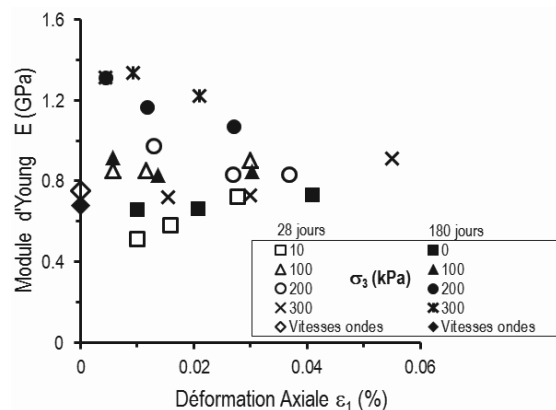


Figure 8. Evolution du module en fonction de la déformation axiale pour différentes valeurs de contrainte de confinement.

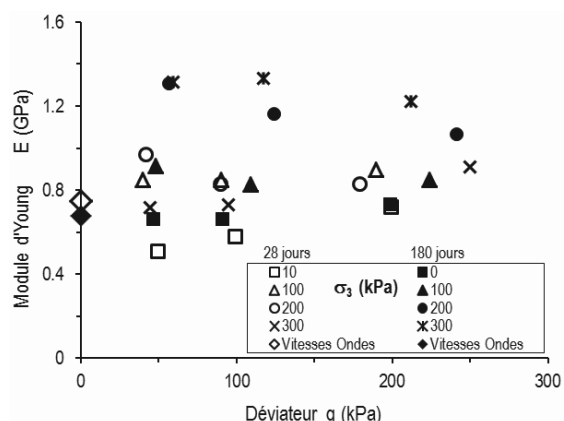


Figure 9. Evolution du module en fonction du déviateur de contrainte pour différentes valeurs de contrainte de confinement.

7 RÉFÉRENCES

Araújo N. and Gomes Correia A. 2009. Precision triaxial equipment for the evaluation of the elastic behaviour of soils. *Proceedings of the 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields. Taylor & Francis Group.* 125-134.  
 Brull A. 1980. Caractéristiques mécaniques des sols de fondation de chaussées en fonction de leur état d'humidité et de compacité.

*Compte-rendus du Colloque International sur le Compactage, Paris, Presses des Ponts & Chaussées,* (1), 113-118  
 Cabarkapa Z., Cuccovillo T. and Gunn M. 1999. Some aspects of pre-failure behavior of unsaturated soil. *Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials,* 159-165.  
 Cascante G. and Santamaria C. 1997. Low Strain Measurements Using Random Noise Excitation. *Geotechnical Testing Journal* 20 (1), 29-39.  
 Clayton C. and Khatrush S.A. 1986. A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens. *Géotechnique* 36 (4), 593-597.  
 Dufour-Laridan Emmanuel, 2001. Propriétés mécaniques des sols en petites déformations ; étude expérimentale d'un sable silteux. *Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, France*  
 Dyvik R. and Madshus C. 1985. Laboratory measurements of Gmax using bender elements. *Advances in the engineering, NGI publication* (161), 117-137.  
 Fioravante V. 2000. Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing. *Soils and Foundations* 40 (4), 129-142.  
 Fleureau J.M., Dufour-Laridan E. and Gomes Correia A. 2001. Influence of compaction and loading conditions on the dynamic properties of a silty sand. *Proceedings of the 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, CA, Edited by S. Prakash, Paper 1.30*  
 Fleureau J.M., Hadiwardoyo S., Dufour-Laridan E., Langlois V. and Gomes Correia A. 2002. Influence of suction and loading conditions on the dynamic properties of a silty sand. *Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, Recife (Brasil), Edited by J. Juca, T. de Campos and F. Marinho, Lisse, Balkema, Vol. 2,* 463-472.  
 Gomes Correia A., Livet M. and Guillin J. 1987. The influence of hydric state on the mechanical behaviour of a sand under cyclic loading. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris,* 152  
 Goto S. Tatsuoka F., Shibuya S., Kim Y.S. and Sato T. 1991. A simple gauge for local small strain measurements in laboratory. *Soils and Foundations* 31 (1), 169-180.  
 Hoque E., Sato T. and Tatsuoka F. 1997. Performance evaluation of LDTs for use in triaxial tests. *Geotechnical Testing Journal* 20 (2), 149-167.  
 Jardine R.S., Symes M.J. and Burland J.B. 1984. The measurement of Soil stiffness in the triaxial apparatus. *Géotechnique* 34 (3), 323-340.  
 Kheirbek-Saoud S.1994. Comportement mécanique du ballast et de la couche de fondation d'une voie ferrée. *PhD Thesis, Ecole Centrale Paris, France*  
 Kuwano R., Connolly T.M. and Kuwano J. 1999. Shear stiffness anisotropy measured by multi-directional bender element transducers. *Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials,* Rotterdam : Balkema, 205-212.  
 Modoni G., Flora A., Mancuso C., Anh Dan L. Q., Koseki J., Balakrishnaiyer K. and Tatsuoka F. 1999. A simple experimental procedure for the complete characterization of small strain stiffness of gravels. *Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials,* Rotterdam : Balkema, 123-130.  
 Quin X., Gray D.H. and Woods R.D. 1991. Resonant column tests on partially saturated sands. *Geotechnical Testing Journal, ASCE,* 14(3), 266-275  
 Santucci de Magistris F., Koseki J., Amaya M., Hamaya S., Sato T. and Tatsuoka F. 1999. A triaxial testing system to evaluate stress-strain behavior of soils for a wide range of strain and strain rate. *Geotechnical Testing Journal* 22, 44-60.  
 Taibi,S., Fleureau, J.M, Hadiwardoyo and Kheirbek-Saoud, S. 2008. Small and large strain behaviour of an unsaturated compacted silt. *European Journal of Environmental and Civil Engineering.* 12(3) 203-228  
 Tatsuoka F., Jardine R.J., Lo Presti D., Di Benedetto H. and Kodaka T. 1997. Characterising the pre-failure deformation properties of geomaterials. *XIV ICSMFE in Hamburg,* 1-36.  
 Tatsuoka F., Modoni G., Jiang G.L., Anh Dan L.Q., Flora A., Marsushita M. and Koseki J. 1999. Stress-strain behavior at small strains of unbounded granular materials and its measurements in laboratory. *Modelling and advanced testing for unbonded granular materials in Lisboa,* 1-34.  
 Wu S., Gray D.H. and Richart F.E. 1989. Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE,* 110(9), 1188-1203.