

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Comportement mécanique de sols grossiers à matrice

Mechanical behaviour of matrix-type coarse-grained soils

B. Seif El Dine, J. Canou, J.-C. Dupla

Universtité Paris-Est, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, UR Navier-CERMES, Marne-la-Vallée, France

Y. Kazan

Université Libanaise, Beyrouth, Liban

RÉSUMÉ

On présente dans cette communication les résultats d'un programme d'essais triaxiaux sur éprouvettes de 300 mm de diamètre, destiné à étudier le comportement mécanique d'un sol grossier à matrice de référence, composé d'une matrice sableuse et d'inclusions anguleuses, en termes des caractéristiques de rupture du matériau. On met en évidence l'influence de la fraction volumique des inclusions, de leur taille et de leur distribution granulométrique sur les comportements observés et sur les caractéristiques de rupture du matériau, quantifiées par l'angle de frottement interne.

ABSTRACT

This communication presents the results of an experimental program carried out on a large size triaxial testing set up (300mm diameter specimens) designed to study the mechanical behaviour of a matrix-type coarse-grained soil, composed of a sandy matrix and angular inclusions, in terms of failure characteristics. The influence of volumetric fraction of inclusions is shown, as well as the influence of their size and grain size distribution, on observed behaviours and on their failure characteristics, quantified by the internal friction angle.

Keywords : triaxial test, coarse-grained soil, failure characteristics, inclusion, rheology, mechanical behaviour

1 INTRODUCTION

Les sols grossiers constituent une classe de sols particuliers, caractérisés par une forte hétérogénéité de taille des éléments constitutifs, comportant, en particulier, de gros éléments pouvant aller de quelques centimètres dans des sols alluvionnaires jusqu'à des tailles décimétriques, voire métriques, dans certains éboulis et moraines glacières. De par l'existence des gros éléments, il est très difficile d'étudier expérimentalement le comportement mécanique de ces sols sur des volumes représentatifs (il faut, pour cela, des dispositifs de très grande taille, assez rarement disponibles) et il n'y a pas encore de méthodes vraiment fiable pour évaluer les caractéristiques mécaniques de ce type de sols (déformabilité, caractéristiques de rupture) à prendre en compte dans les calculs et le dimensionnement des ouvrages géotechniques. On pourra, en particulier, se reporter aux travaux de Holtz et Gibbs (1956), Jain et Gupta (1974), Donaghe et Torrey (1979), Bourdeau (1997), Shirdam et al. (1998), Lin et al. (2000) et Vallé (2001) sur ces sols spécifiques.

Dans ce cadre, on présente ici les résultats de recherches réalisées sur une classe particulière de sols grossiers, appelés sols grossiers à matrice, c'est à dire des sols dans lesquels on peut distinguer une phase "matricielle" au sein de laquelle se trouvent des éléments de grande taille, appelés dans la suite « inclusions », bien différenciés de la partie matrice (Pedro, 2004 ; Pedro et al., 2005). Après avoir présenté le dispositif expérimental utilisé et la méthode de reconstitution des sols à matrice de référence utilisés, on décrit les comportements typiques observés à l'appareil triaxial. On présente ensuite l'influence de paramètres importants caractérisant le sol grossier, à savoir la fraction volumique des inclusions, leur taille et leur distribution granulométrique sur les comportements observés. On présente finalement les caractéristiques de rupture du matériau en terme d'angle de frottement interne montrant

l'influence des paramètres étudiés sur la valeur de cette grandeur.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MATERIAU ETUDIE

Le dispositif d'essai se compose d'une cellule triaxiale de grandes dimensions, permettant de reconstituer et tester des éprouvettes de 300 mm de diamètre et 600 mm de hauteur. La figure 1 présente une vue d'ensemble du dispositif. La cellule est incorporée à un bâti de chargement à quatre colonnes équipé en tête d'un servovérin de 500 kN, permettant d'appliquer les chargements axiaux (force déviatorique). Le confinement peut être appliqué soit à l'aide d'un détendeur classique pour les essais classiques à confinement constant, soit à partir d'un système de contrôle dynamique de pression servo-hydraulique pour les essais spécifiques dans lesquels la pression de confinement évolue en fonction du déviateur des contraintes pour réaliser des trajets de chargement spécifiques dans le plan des contraintes (q, p). La cellule triaxiale est solidaire d'un socle, mobile en translation et rotation, permettant de reconstituer l'éprouvette à l'extérieur du bâti de chargement, puis de déplacer et d'assembler la cellule sous le bâti de chargement. Le contrôle de l'essai est réalisé grâce à un logiciel de pilotage permettant de réaliser des programmes de chargement variés sous sollicitations monotones et cycliques, permettant d'aller, dans le domaine cyclique, jusqu'à des fréquences de plusieurs dizaines de hertz, fonction des amplitudes de déplacement demandées. L'acquisition des données est réalisée sous Labview, grâce à un dispositif d'acquisition rapide, nécessaire dans le régime dynamique. Dans le cadre des travaux présentés dans cette communication, le dispositif a été utilisé uniquement sous chargement monotone, dans le domaine quasi-statique. Le sol grossier utilisé est un sol grossier à matrice, composé d'une matrice



Figure 1. Vue générale du dispositif d'essai

sableuse (sable de Fontainebleau) au sein de laquelle se trouvent des inclusions (graviers anguleux de différentes tailles). Ce type de mélange, dont on peut faire varier de manière relativement simple les paramètres constitutifs, doit permettre de mettre en évidence l'influence de paramètres représentatifs sur les comportements observés, en vue de mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement du mélange. La figure 2 présente le mélange sable-inclusion utilisé, avant humidification pour la reconstitution de l'éprouvette par compactage. L'éprouvette est reconstituée par compactage de couches successives (10 couches), après humidification du mélange, dont les fractions volumiques respectives de sable et d'inclusions sont bien contrôlées, ce qui permet d'obtenir un matériau suffisamment uniforme.

3 RESULTATS TYPIQUES, REPETABILITE

La figure 3 présente les résultats obtenus pour trois essais réalisés sur un mélange constitué de sable de Fontainebleau à un indice de densité de 0,70 et d'inclusions formées de gravier 10/20 mm correspondant à une fraction volumique de 20%. Les éprouvettes sont consolidées sous 100 kPa de confinement. Les courbes de cisaillement (Fig. 3.a) se caractérisent par un maximum de déviateur, correspondant à la rupture initiale du matériau, obtenu pour une déformation axiale relativement faible, de l'ordre de 1,8%, suivi d'un radoucissement significatif. En termes de déformation volumique (Fig. 3.b), on observe une petite phase de contractance initiale, jusqu'à environ 0,6% de déformation axiale, suivie d'une importante phase de dilatance, dont le taux, initialement important, diminue progressivement avec la déformation. La figure 3 montre que l'on obtient, pour le mélange sable-inclusions, un comportement qualitativement analogue à celui d'un sable dense, représentatif de la matrice seule, éventuellement « perturbé » par la présence des inclusions.

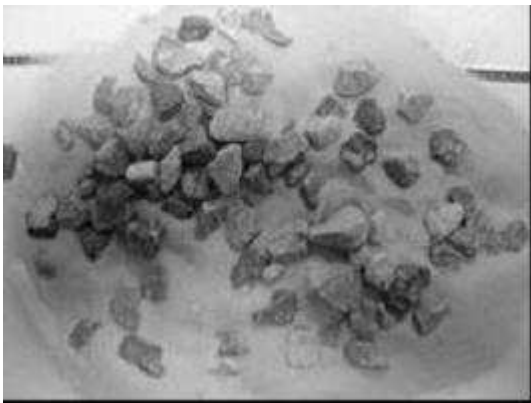


Figure 2. Mélange sable-inclusions utilisé pour la reconstitution du sol grossier à matrice, avant humidification du mélange

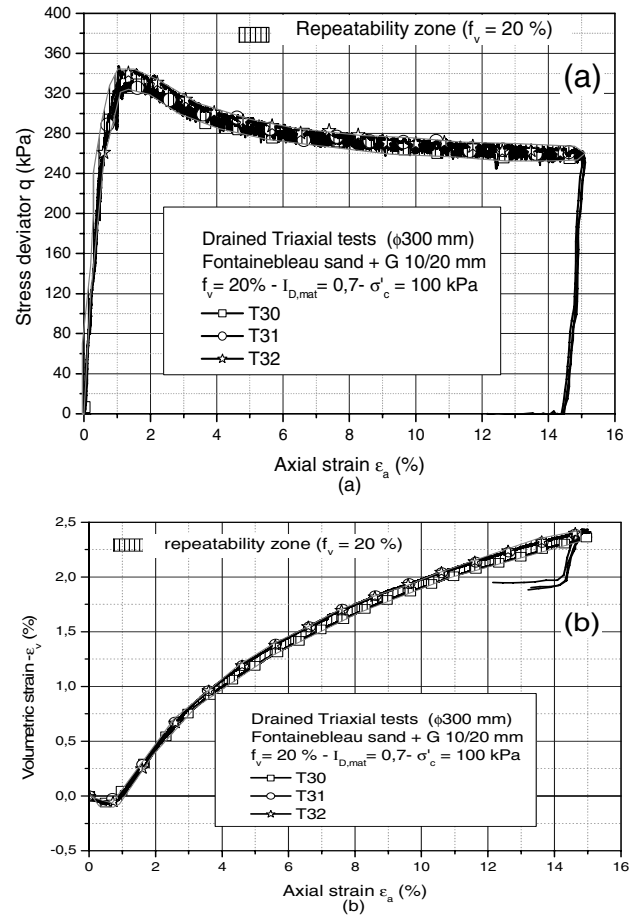


Figure 3. Résultats typiques de cisaillement obtenus sur un mélange représentatif - Evaluation de la répétabilité

La figure 3 permet aussi de mettre en évidence la bonne répétabilité de comportement observé, ce qui constitue un point important vis à vis du mode de reconstitution du matériau.

4 INFLUENCE DE LA FRACTION VOLUMIQUE DES INCLUSIONS SUR LES COMPORTEMENTS

La fraction volumique des inclusions présentes au sein de la matrice, f_v , (rapport du volume des inclusions au volume total du sol) constitue un paramètre fondamental dont il est important d'évaluer l'influence. La figure 4 présente les courbes de cisaillement obtenues pour trois fractions volumiques d'inclusions 10/20 mm (12, 20 et 35%) et une matrice sableuse d'indice de densité 0,70. La courbe de cisaillement correspondant à la matrice seule est aussi représentée sur cette figure. On met en évidence une influence claire de la fraction volumique des inclusions, avec une augmentation des caractéristiques mécaniques du matériau et en particulier, de la résistance au cisaillement maximale, avec l'augmentation de f_v . Par rapport à la matrice seule, l'ajout d'inclusions change la rhéologie du sol et l'on passe d'un comportement de type « ductile » pour la matrice seule (maximum de résistance obtenu pour une déformation axiale de l'ordre de 7%) à un comportement du type « fragile » pour le sol composite, le caractère fragile (pic de résistance obtenu pour une déformation axiale faible, inférieure à 2% dans tous les cas, suivi d'un radoucissement significatif) étant d'autant plus prononcé que la fraction volumique des inclusions est forte. Aux grandes déformations, on atteint des valeurs ultimes de résistance comparables pour la matrice seule et pour le sol grossier, montrant que c'est alors essentiellement la matrice qui contrôle les mécanismes de déformation.

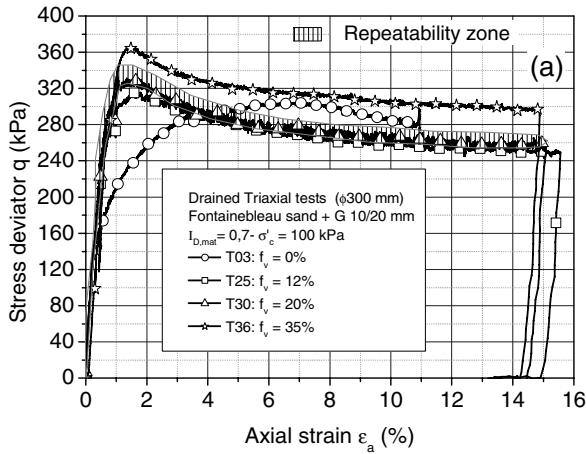


Figure 4. Influence de la fraction volumique des inclusions sur les comportements observés

5 INFLUENCE DE LA TAILLE DES INCLUSIONS

La taille des inclusions constitue un paramètre important caractérisant le sol grossier, dont il est important d'évaluer l'influence. Pour ce faire, il suffit de réaliser des éprouvettes à partir de mélanges comportant des tailles d'inclusions différentes, tous autres paramètres étant maintenus constants et de comparer les réponses mécaniques de ces éprouvettes. La figure 5 présente les résultats de deux essais réalisés sur des éprouvettes reconstituées à partir d'inclusions de 10/20 mm et de 30/60 mm, soit trois fois plus grosses, les autres paramètres étant maintenus constants ($f_v = 12\%$, $\sigma'_c = 100$ kPa et $I_{D,mat} = 0,70$). On a aussi représenté sur la figure 5 les courbes correspondant à la matrice seule. L'observation principale est que les comportements observés pour les deux tailles d'inclusions, en termes des courbes de cisaillement, sont pratiquement les mêmes, montrant que la taille des inclusions en temps que telle, n'a pas d'influence significative sur le comportement du matériau. Comme mentionné précédemment, on retrouve une rhéologie très différente de celle de la matrice seule, avec un comportement de type « fragile » caractérisé par un maximum marqué à faible déformation, suivi d'un radoucissement progressif. Il est, là aussi, intéressant de remarquer que, pour les déformations importantes, les résistances ultimes mobilisées se rapprochent de celle de la matrice seule, mettant en évidence, pour les grandes déformations, la prédominance de celle-ci.

En termes des déformations volumiques, les courbes obtenues sont aussi très similaires pour les deux tailles d'inclusions jusqu'à une déformation axiale de l'ordre de 3% ; Ensuite on constate un aplatissement de la courbe, avec diminution de la dilatance, plus important dans le cas des grosses inclusions. Cet aplatissement rend compte d'un phénomène de localisation qui apparaît et se développe progressivement. Le phénomène de localisation serait donc plus accentué dans le cas des grosses inclusions que dans le cas des petites inclusions, ce qui paraît cohérent.

6 GRANULOMETRIE DES INCLUSIONS

La répartition granulométrique des inclusions constitue aussi un paramètre dont il est important d'évaluer l'influence sur le comportement du sol grossier. Avec cet objectif, on a reconstitué et testé des mélanges comportant des phases inclusionnaires caractérisées par différents étalements granulométriques (8/10 mm, 10/20 mm, 30/60 mm, 10/60 mm, 4/60 mm), les autres paramètres étant maintenus constants, par ailleurs ($f_v = 20\%$, $\sigma'_c = 100$ kPa, $I_{D,mat} = 0,70$).

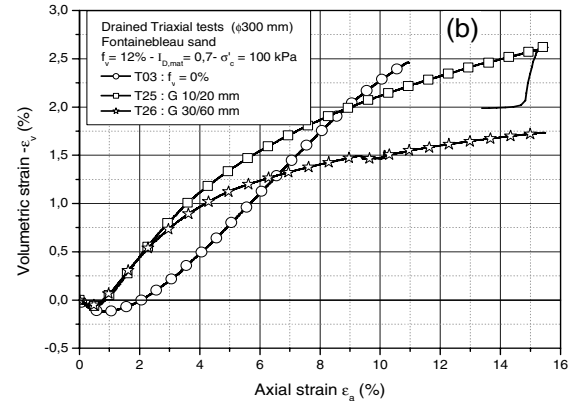
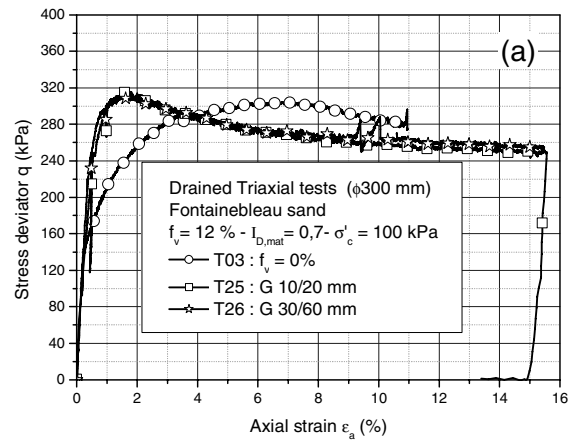


Figure 5. Influence de la taille des inclusions sur les comportements observés

La figure 6 présente les courbes de cisaillement obtenues pour les cinq éprouvettes correspondantes, permettant de mettre en évidence une diminution des caractéristiques mécaniques du matériau avec l'augmentation de l'étalement granulométrique des inclusions. En particulier, en terme de résistance maximale mobilisable q_{max} , on observe, pour une même fraction volumique d'inclusions, une diminution significative de q_{max} lorsque l'on passe de la granulométrie la plus étroite (graviers 8/10 mm) à la granulométrie la plus étalée (graviers 4/60 mm), avec un comportement plus « fragile » et un pic de résistance plus marqué pour la granulométrie la plus étroite et un comportement plus « ductile » pour la granulométrie la plus étalée.

7 CARACTERISTIQUES DE RUPTURE – ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE

Sur la base des essais réalisés, on a cherché à évaluer les caractéristiques de rupture initiale des sols testés, correspondant au maximum de résistance au cisaillement mobilisé. La représentation classique des états de rupture du sol dans le plan de Mohr (τ , σ') ou dans le plan de Cambridge (q , p') permet de vérifier que l'on a affaire à un critère de Mohr-Coulomb (critère linéaire), passant par l'origine des axes (pas de terme de cohésion c'), montrant que l'on retrouve un critère de sol pulvérulent, analogue à celui de la matrice seule

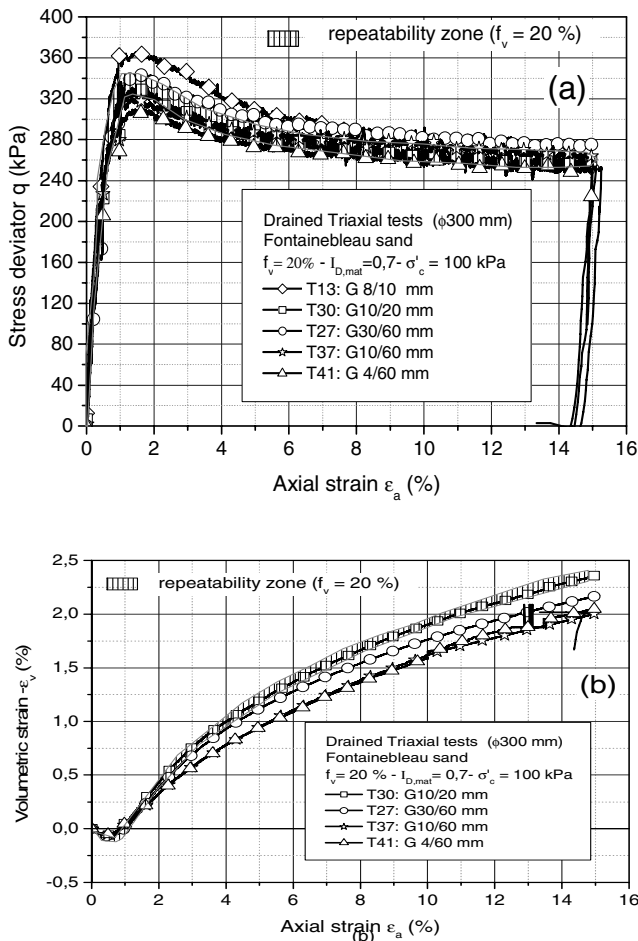


Figure 6. Influence de la répartition granulométrique des inclusions sur les comportements observés

(le mélange reste en effet pulvérulent), modifié par la présence des inclusions. Les valeurs d'angle de frottement interne évaluées au pic de résistance (q_{max}) sont présentées sur le graphe synthétique de la figure 7. Cette figure permet de retrouver, en termes d'angle de frottement interne, l'influence des différents paramètres étudiés, présentée dans les paragraphes précédents. On retrouve tout d'abord l'effet de renforcement du matériau apporté par les inclusions, avec un angle de frottement interne Φ'_{max} qui augmente de manière significative avec l'augmentation de la fraction volumique d'inclusions, dans tous les cas. L'augmentation la plus significative en fonction de f_v correspond au cas des inclusions uniformes 8/10 mm, pour lesquelles on passe d'un angle de frottement de l'ordre de 37° pour la matrice seule à un angle de frottement de l'ordre de $42,5^\circ$ pour le mélange.

On retrouve aussi le fait que, pour un même étalement granulométrique des inclusions, la taille de celles-ci n'a pas d'influence significative sur la valeur de Φ'_{max} , les évolutions de ce paramètre correspondant aux inclusions 10/20 mm et 30/60 mm étant très proches.

On retrouve finalement que l'étalement granulométrique de la phase inclusionnaire (gravier 10/60 mm et 4/60 mm) a pour effet d'atténuer l'effet de renforcement de manière significative par rapport aux inclusions de taille uniforme.

8 CONCLUSION

Cette communication a permis de présenter les comportements mécaniques de sols grossiers de référence, composés d'une matrice sableuse contenant des inclusions formées de graviers

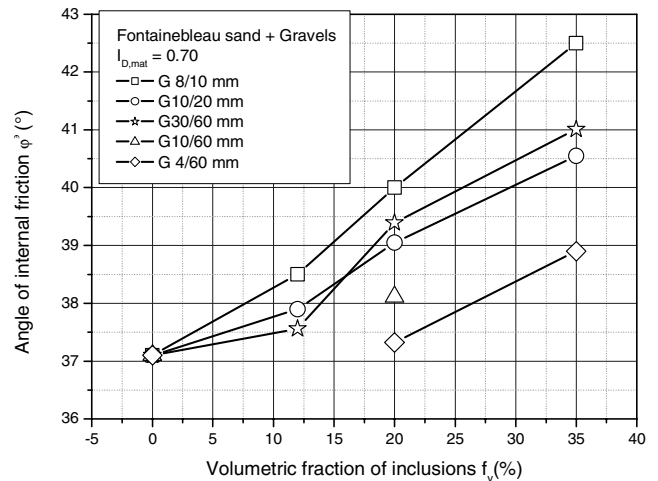


Figure 7. Synthèse des angles de frottement obtenus (rupture au maximum de résistance) anguleux. Les résultats obtenus montrent clairement l'effet de renforcement apporté par les inclusions, avec des angles de frottement interne qui augmentent de manière significative avec la fraction volumique des inclusions. Il est important de souligner que la présence des inclusions change la rhéologie du matériau, avec un comportement plus « fragile » du mélange par rapport à la matrice seule et l'observation de ruptures présentant un pic de résistance marqué pour des déformations axiales inférieures à 2% alors que la rupture apparaît pour des déformations de l'ordre de 6 à 7% pour la matrice seule.

Deux points importants mis en évidence concernent la taille des inclusions qui ne paraît pas avoir d'influence significative sur les caractéristiques mécaniques du sol grossier, et l'étalement granulométrique qui a, lui, une influence significative avec un effet de renforcement plus important pour les inclusions à granulométrie serrée.

Les résultats obtenus sont encourageants et fournissent des pistes de recherche *a priori* intéressantes. Ces résultats devront encore être approfondis et confirmés par des essais complémentaires, l'objectif étant de se rapprocher progressivement de la réalité du terrain en reconstituant et en testant des sols de plus en plus complexes.

REFERENCES

- Bourdeau, Y. 1997. Le comportement des alluvions du Rhône dans une grande boîte de cisaillement direct. *Revue Française de Géotechnique*, n°79 : 45-57.
- Donaghe, R.T. & Torrey, V.H. 1979. Scalping and replacement effect on strength parameters of earth rock mixtures. *Design parameters in geotechnical engineering*, London, vol.2, 29-34.
- Holtz, W.G. & Gibbs, H.J. 1956. Triaxial shear tests on pervious gravelly soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div.*, ASCE, vol.82, 1-9.
- Jain, S.P. & Gupta, R.C. 1974. In situ shear tests for rock fills. *Journal of Geotechnical Eng. Div.*, vol.100 (GT9), 1031-1050.
- Lin, S.Y., Lin, P.S., Luo, H.S., Juang, C.H. 2000. Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits. *Canadian Geotech. J.*, n°37: 638-651.
- Pedro, L. 2004. De l'étude du comportement mécanique de sols hétérogènes modèles à son application au cas des sols naturels. *Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris.
- Pedro, L., Dupla, J.-C., Canou, J., Dormieux, L. & Kazan, Y. 2005. Comportement mécanique d'un sol grossier à matrice sous cisaillement monotone. *Revue Française de Géotechnique*, n°112 :35-42.
- Shirdam, R., Faure, R.-M. & Magnan, J.-P. 1998. Caractéristiques des éboulis de pente à l'aide d'une boîte de cisaillement. *The Geotechnics of Hard Soils and Soft Rocks*, Rotterdam, pp.869-880.
- Vallé, N. 2001. Propriétés mécaniques d'un sol grossier d'une terrasse alluvionnaire de la Seine. *Thèse de doctorat, Université de Caen*, France.