

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.

Caractéristiques de rupture d'un sol hétérogène de référence

Failure characteristics of an heterogenous soil

L.S. Pedro, J. Canou & J.-C. Dupla

Centre d'enseignement et de recherche en mécanique des sols (CERMES), ENPC-LCPC, France

L. Dormieux

Laboratoire de Matériaux et des Structures pour le Génie Civil (LMSGC), ENPC-LCPC, France

Y. Kazan

Université libanaise, Faculté de Génie (LMRS), Liban

RÉSUMÉ

On présente dans cette communication les résultats d'une recherche réalisée sur des sols grossiers de référence (sols grossiers à matrice) destinée à mettre en évidence l'influence de paramètres caractérisant l'état initial de ces matériaux sur leur comportement mécanique étudié à l'appareil triaxial. On s'intéresse en particulier aux caractéristiques de rupture du sol et l'on met en évidence l'influence des paramètres caractérisant les inclusions (forme, rugosité, taille, fraction volumique) sur le critère de rupture du matériau.

ABSTRACT

This paper presents the results of a research work carried out on reference coarse-grained soils (rigid inclusions embedded in a fine-grained matrix) aimed at studying the influence of parameters characterizing the initial state of these soils on their mechanical behaviour as investigated in the triaxial apparatus. We are specifically interested in the failure characteristics of the soil and the influence of parameters characterizing the inclusions (shape, roughness, size, volumetric fraction) on the failure criterion of the material, is presented.

1 INTRODUCTION

Les sols grossiers sont des matériaux naturels dont la granulométrie présente une grande hétérogénéité de taille et de nature. En effet, ces sols peuvent être constitués d'éléments ayant la taille de particules argileuses, limoneuses ou sableuses auxquelles sont mélangés des éléments de la taille de graviers ou de blocs rocheux. Certains de ces sols peuvent présenter un fort contraste de taille et peuvent être assimilés à des sols hétérogènes constitués par des éléments de grande taille appelés « inclusions », entourés par une « matrice » sableuse, argileuse ou limoneuse. Il s'agit de sols grossiers à matrice.

Le comportement mécanique de ce type de sol est assez mal connu, ceci en raison de la difficulté de réaliser des essais de laboratoire sur des volumes représentatifs. L'utilisation de dispositifs expérimentaux de dimensions conventionnelles est limitée par la présence d'inclusions de grande taille et la réalisation d'essais au moyen de dispositifs de taille élevée est une alternative onéreuse et difficile à mettre en œuvre.

Les résultats présentés ici s'intègrent dans une recherche qui vise à mettre en évidence et à comprendre l'influence des propriétés des inclusions ainsi que celle de la matrice sur le comportement des sols grossiers à matrice (Pedro, 2004). L'objectif est de développer une méthode permettant de caractériser ce type de sols en prenant en compte leur caractère hétérogène.

L'effet de la proportion d'inclusions a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, citons par exemple les travaux de Holtz et Gibbs (1956), Jain et Gupta (1974), Donaghe et Torrey (1979), Lin et al. (2000) et Vallé (2001). Ces études ont porté sur des sols naturels qui se différencient par les propriétés des inclusions ainsi que celles de la matrice. De ce fait, les résultats sont difficilement comparables et conclusifs.

L'influence de la granulométrie et de la morphologie des inclusions, ainsi que l'influence des propriétés de la matrice (proportion de fine, granulométrie) n'ont fait l'objet que de peu de travaux.

Dans le cadre de cette communication, on présente des résultats portant sur l'influence de la proportion et de la taille des inclusions sur les paramètres de rupture. Afin que les résultats issus de ce travail puissent être comparés à des travaux ultérieurs, le sol étudié est constitué de matériaux de référence.

Après avoir présenté les dispositifs expérimentaux développés dans le cadre de cette étude, on présente les méthodes de fabrication et de caractérisation des éprouvettes hétérogènes. L'étude paramétrique est précédée d'une étude de répétabilité afin de pouvoir juger du caractère significatif des effets observés.

2 MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

2.1 Les dispositifs expérimentaux

Il s'agit de deux dispositifs triaxiaux, l'un permet de tester des éprouvettes de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur, et l'autre permet de réaliser des essais sur des éprouvettes de 300 mm de diamètre et 600 mm de hauteur.

Le premier dispositif est une cellule triaxial classique Whickeham, de taille conventionnelle. Le second dispositif est un prototype développé au CERMES pour étudier le comportement de sols à forte granulométrie sous chargement monotone ou cyclique. Le bâti de chargement est constitué de quatre montants de 5 m de haut et de deux traverses sur lesquelles repose un servovérin d'une capacité de 500 kN (Fig. 1). Celui-ci est commandé par un programme d'asservissement, qui permet de réaliser des essais de chargements à déplacement contrôlé ou à force contrôlée. Dans le cas des essais à déplacement contrôlé, la déformation axiale de l'éprouvette est déterminée en mesurant le déplacement du piston du vérin. Un capteur de force, placé sous l'embase inférieure de la cellule, permet de déterminer l'effort de chargement vertical.



Figure 1. Dispositif triaxial de grande taille

2.2 Matériaux

Les éprouvettes de sol hétérogène sont constituées d'un mélange de sable de Fontainebleau et de graviers anguleux (Fig. 2). Le choix d'une matrice ne contenant que des éléments de même nature (grains de sable), permet de mettre en évidence, de façon claire, l'influence des propriétés des inclusions.

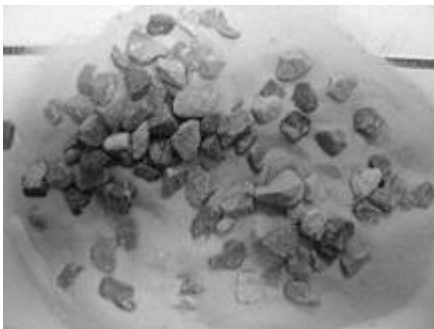


Figure 2. Vue du sol hétérogène de référence

2.3 Fabrication et caractérisation des éprouvettes

La masse volumique initiale de la matrice sableuse est la même pour tous les essais : elle vaut $1,58 \text{ g/cm}^3$, soit un indice de densité $I_{D,mat.} = 0,70$. Seule la proportion volumique de gravier, notée f_v , varie de 0 à 60%. Ce paramètre correspond au rapport entre le volume d'inclusions et le volume total de l'éprouvette. Le dernier paramètre qui permet de caractériser les éprouvettes est le diamètre moyen des inclusions ; il varie entre 5 et 20 mm.

Les éprouvettes sont fabriquées en compactant 10 couches de sol, de hauteur identique. Chaque couche est constituée d'un mélange de sable et d'une proportion f_v de graviers. Le mélange est malaxé et humidifié à une teneur en eau de 5% de façon à prévenir tout phénomène de ségrégation granulaire lors de son introduction dans le moule de préformage. On s'assure ainsi d'une répartition homogène des graviers au sein de la matrice sableuse.

2.4 Répétabilité et validation du dispositif prototype

Afin de pouvoir conclure à un effet significatif des propriétés des graviers, il est nécessaire d'évaluer le degré de répétabilité de fabrication des éprouvettes. Dans ce but, on a réalisé sur les deux dispositifs, des essais triaxiaux sur des éprouvettes contenant une proportion de graviers de 20%, le diamètre moyen des graviers vaut 10 mm. La figure 3 illustre les résultats obtenus sur le dispositif de taille conventionnelle (diamètre 100 mm, hauteur 200 mm). Sur tous les essais, le degré de répétabilité est inférieur à 8%.

Pour valider le dispositif prototype, on a réalisé des essais comparatifs sur des éprouvettes de sable. Les deux dispositifs donnent des résultats similaires aussi bien en terme d'effort de résistance au cisaillement, qu'en terme de variation de volume.

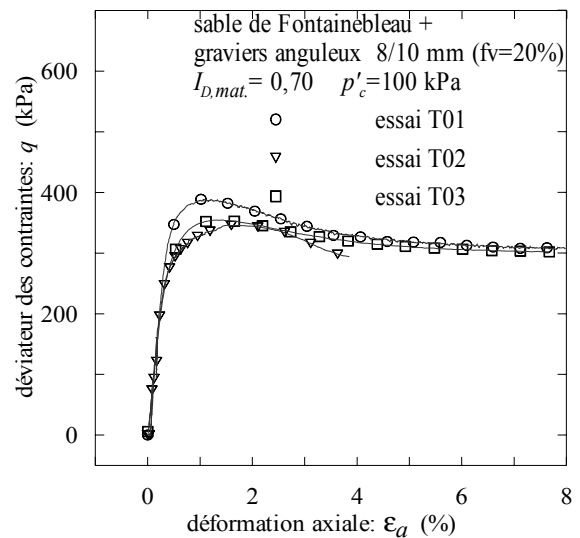


Figure 3. Essais de répétabilité

3 INFLUENCE DE LA PROPORTION DE GRAVIERS

Le programme expérimental consiste à réaliser des essais triaxiaux sur des éprouvettes contenant une proportion de graviers qui varie de 0 à 60%. Les courbes granulométriques des mélanges ainsi obtenus sont présentées sur la figure 4. Pour tous les essais, les conditions initiales sont identiques : $I_{D,mat.} = 0,70$ et la pression de consolidation isotrope p'_c vaut 100 kPa.

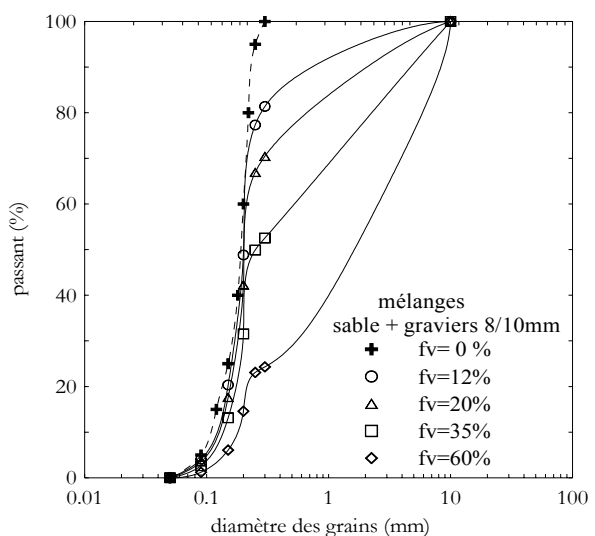


Figure 4. Courbes granulométriques des mélanges étudiés

3.1 Essais sur le dispositif de taille conventionnelle

Lorsque la proportion de graviers augmente, on constate que la valeur du déviateur au pic de résistance s'accroît (Fig. 5). Au-delà du pic, le déviateur de contrainte évolue sur un palier dont la valeur augmente avec la proportion de graviers. On peut noter que pour $f_v = 60\%$, cette évolution post-pic se fait en dent de scie. Compte tenu du degré de répétabilité des essais, ces effets sont significatifs, autrement dit, ils ne peuvent pas être attribués aux incertitudes expérimentales.

Jusqu'à une proportion $f_v = 35\%$, l'effet observé correspond à un effet de renfort de la matrice sableuse par les inclusions rigides. Par le biais de leur rugosité et de leur angularité, les graviers adhèrent à la matrice sableuse par frottement et participent à la résistance globale de l'éprouvette.

Par contre, pour une proportion $f_v = 60\%$, la résistance au cisaillement dépend fortement des contacts entre les graviers. L'analyse granulométrique du sol après essais montre, à juste titre, que les graviers se sont cassés pendant le cisaillement. L'existence de ces cassures explique l'évolution en dent de scie observée sur la courbe de cisaillement.

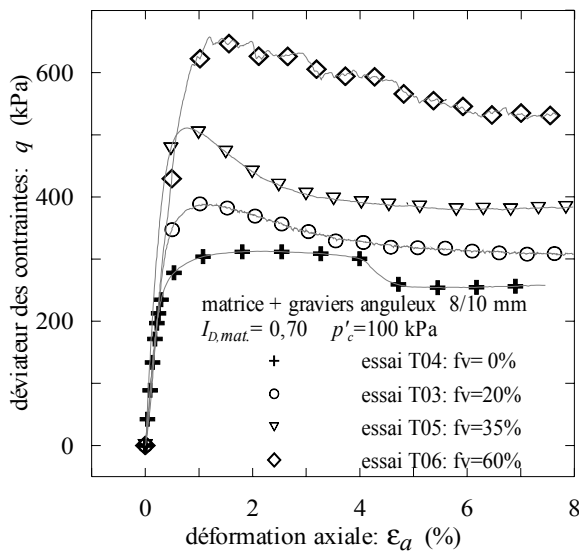


Figure 5. Influence de la fraction volumique de graviers sur la résistance au cisaillement.

3.2 Essais sur le dispositif de grande taille

Afin de s'assurer que l'effet d'accroissement observé ci-dessus ne correspond pas à un effet d'échelle qui se manifesterait si le diamètre de l'éprouvette de 100 mm était trop petit par rapport à la taille des inclusions. On réalise donc des essais sur le dispositif triaxial de grande taille. Le matériau testé est un mélange de sable et de 20% de graviers, et les conditions initiales d'essais sont les mêmes.

Comme le montre la figure 6, on observe également un accroissement du déviateur au pic de la courbe de cisaillement. Donc, l'effet d'accroissement observé correspond bien à un effet de renfort de la matrice par les graviers.

3.3 Influence sur le critère de rupture

Sur le dispositif de taille conventionnelle, on a réalisé des essais triaxiaux à différents états de consolidation isotrope : $p'_c = 50, 100$ et 200 kPa. Pour analyser l'évolution du critère de rupture en fonction de la fraction volumique de gravier, un jeu d'essais a été réalisé pour $f_v = 0, 12, 20$ et 35% .

Pour différentes valeurs de f_v , on présente, dans le plan des invariants du tenseur des contraintes (q, p'), les chemins de

contraintes suivis ainsi que les droites de rupture obtenues (Fig. 7). On constate que la présence de graviers dans le sol n'a pas d'influence sur le caractère linéaire du critère de rupture. En effet, comme c'est le cas pour la matrice sableuse, le sol hétérogène a un critère de rupture de type Mohr-Coulomb : le paramètre qui correspond à la cohésion du sol reste nul, et l'angle de frottement augmente avec la proportion d'inclusions (tableau 1).

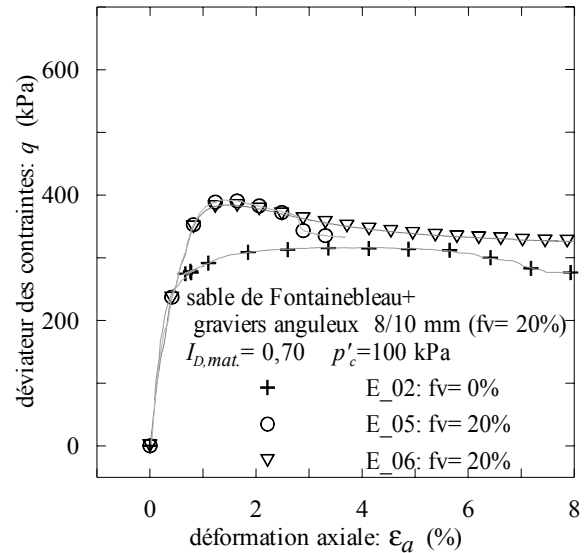


Figure 6. Influence de la fraction volumique de graviers sur la résistance au cisaillement. Essais sur le dispositif triaxial de grande taille

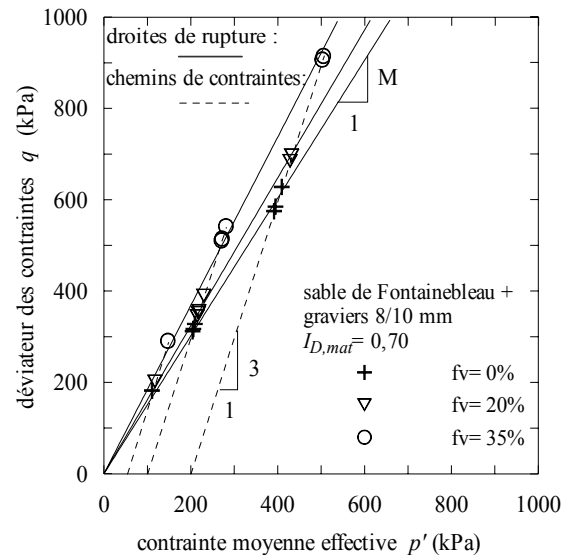


Figure 7. Influence de la fraction volumique de graviers sur le critère de rupture.

Tableau 1 : Influence de la fraction volumique d'inclusions sur les paramètres de rupture.

| f_v (%) | 0 | 12 | 20 | 35 |
|----------------------|------|------|------|------|
| M | 1,50 | 1,57 | 1,62 | 1,87 |
| ϕ° (deg) | 37 | 38,5 | 40 | 46 |

4 INFLUENCE DE LA TAILLE DES GRAVIERS

Le programme expérimental consiste à réaliser avec le triaxial de dimension conventionnelle, des essais triaxiaux sur des mé-

langes de sable et de graviers. La proportion de gravier f_v est maintenue constante ($f_v=20\%$) mais la taille des graviers varie. On dispose de trois tailles de gravier : 5 mm, 10 mm et 20 mm. Les courbes granulométriques des trois types de mélanges ainsi obtenus sont présentées sur la figure 8. Pour tous les essais l'état initial est le même : $I_{D,mat}=0,70$; $p'_c=100$ kPa.

Comme l'illustre la figure 9, la taille des graviers n'a pas d'influence sur la résistance au cisaillement. En effet, toutes les courbes de cisaillement s'insèrent dans le fuseau constitué par les courbes de cisaillement du mélange sable avec des graviers de 10 mm.

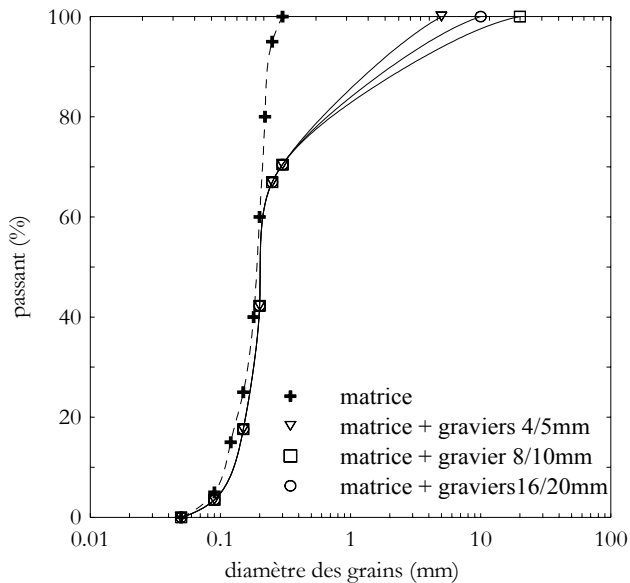


Figure 8. Courbes granulométriques des mélanges étudiés.

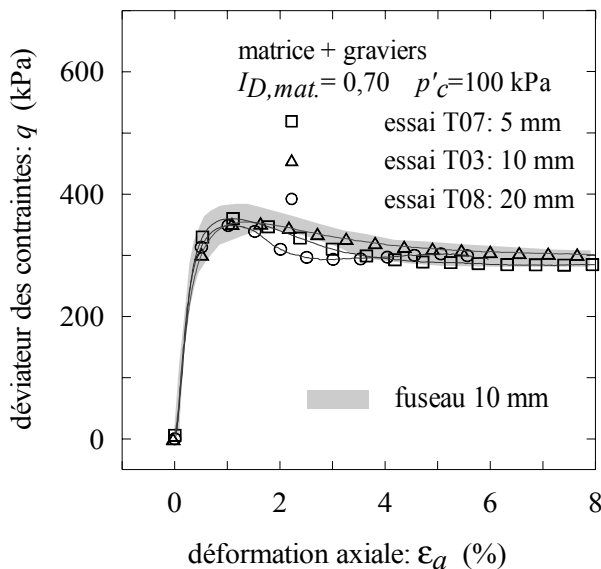


Figure 9. Influence de la taille des graviers sur la résistance au cisaillement ($f_v=20\%$).

5 CONCLUSIONS

Les résultats présentés dans cette communication mettent en évidence l'influence de deux importantes propriétés des inclusions : leur proportion et leur taille. La présence d'inclusions provoque un effet de renfort du sol qui se traduit par une augmentation de la résistance au cisaillement. On a montré par ail-

leurs que la taille des inclusions ne modifiait pas les propriétés mécaniques du sol étudié.

Ces résultats apportent des éclaircissements quant à l'utilisation des méthodes de reconstitutions granulométriques pour déterminer en laboratoire, à l'aide de dispositif de taille conventionnelle, les propriétés mécaniques des sols grossiers à matrice. En effet, les résultats portant sur l'effet de la proportion d'inclusion permettent de voir que la méthode d'écrêtement qui consiste à enlever les inclusions et à ne tester que la matrice, conduit à une sous-estimation des caractéristiques mécaniques du sol. Par contre, les résultats concernant l'influence de la taille des graviers laissent penser que la méthode de substitution, qui consiste à enlever les inclusions et à les remplacer par des inclusions de taille plus petite, permet de déterminer directement les caractéristiques mécaniques du sol.

La conservation de la forme du critère de rupture est également un résultat important, car il montre que la présence d'inclusions dans le sol ne modifiera pas la forme des lois de comportement. On peut donc penser *a priori*, que les paramètres de ces lois pourront être reliés aux propriétés de la matrice ainsi que celles des inclusions. Il serait donc possible d'estimer de façon théorique les paramètres mécaniques du sol grossier à partir des caractéristiques du sol écrêté.

Les résultats présentés dans cette communication ne sont valables que dans le cas des sols étudiés. Cependant, puisque les éprouvettes sont constituées par des matériaux de référence, une complexification de la composition granulométrique du sol est faisable. Cela permettrait de définir de façon précise, les limites à l'intérieur desquelles ces résultats sont valables.

L'étude de l'influence d'autres propriétés telles que la forme des inclusions, la nature et la granulométrie de la matrice sont également des perspectives intéressantes. Enfin, une comparaison entre les résultats obtenus sur ces sols reconstitués et ceux qu'on obtiendrait sur des sols naturels pourrait également être faite.

RÉFÉRENCES

- Holtz W.G. and Gibbs H.J. 1956. Triaxial shear test on previous gravelly soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation of the ASCE*, vol 82, pp.1-9.
- Jain S.P. and Gupta R.C. 1974. *In situ* shear test for rock fills. *Journal of Geotechnical Engineering division*, vol. 100 (GT9), pp. 1031-1050.
- Donaghe R.T. and Torrey V.H. 1979. Scalping and replacement effect on strength parameters of earth rock mixtures. *Design parameters in geotechnical engineering*, London, vol. 2, pp. 29-34.
- Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B. and Daily W.D. 1998. Shear Modulus and Damping relationships for gravels. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, No.5, 396-405.
- Lin S.Y., Lin P.S., Luo H.S. and Juang C.H. 2000. Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, No 37, 638-651.
- Vallé N. 2001. *Propriétés mécaniques d'un sol grossier d'une terrasse alluvionnaire de la Saine*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, France
- Pedro L.S. 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, France.