

Comportement mécanique d'un sol grossier à matrice sous cisaillement monotone

**L.S. PEDRO, J.C. DUPLA
J. CANOU**

*CERMES (ENPC-LCPC)
6 et 8, avenue Blaise-Pascal
Cité Descartes,
Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée
Cedex 2*

L. DORMIEUX

*LMSGC (ENPC-LCPC)
6 et 8, avenue Blaise-Pascal
Cité Descartes,
Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée
Cedex 2*

Y. KAZAN

*Université libanaise,
Faculté de Génie (LMRS),
Liban*

Résumé

On présente dans cet article les résultats d'une recherche portant sur le comportement mécanique des sols grossiers. Ces matériaux sont caractérisés par une distribution granulométrique très étalée. L'évaluation des caractéristiques mécaniques des sols grossiers est très délicate en raison, en particulier, de la présence des éléments de grande taille. Dans le cadre de cette étude, on se limite au cas des sols grossiers à matrice, il s'agit des sols constitués par de gros éléments entourés par une matrice fine. Le matériau étudié est un sol de référence constitué d'un sable de Fontainebleau auquel sont mélangés des graviers. Après une présentation succincte des dispositifs expérimentaux utilisés dans cette étude, on propose une méthode de fabrication répétable des éprouvettes. Puis on présente des résultats concernant l'influence de la proportion de graviers sur le comportement et sur le critère de rupture du sol hétérogène modèle soumis à un chargement triaxial.

Mots-clés : sol grossier, cisaillement, triaxial, rupture.

Mechanical behavior of a coarse grained soil under monotonic shear

Abstract

We present in this paper the results of a research concerning the mechanical behaviour of coarse grained soils. These materials are characterized by a spread grain size distribution curve. The presence of over sized particles makes difficult the mechanical characterization of these soils. We were more particularly interested in coarse-grained soils composed by rigid inclusions embedded in a fine-grained matrix (heterogenous soil). The studied material is a reference heterogenous soil composed of Fontainebleau sand and gravel. First, we propose a repeatable method of sample fabrication. Then we present some results on the influence of the gravel fraction on the behaviour and on the failure criterion of the soil under a triaxial stress path.

Key words : coarse grained soils, shear, triaxial, failure.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} mars 2006.

Introduction

Les sols grossiers sont des matériaux naturels qui contiennent des éléments de taille très hétérogène. Ils peuvent contenir en effet, des particules de quelques dizaines de microns auxquelles sont mélangés des éléments de plusieurs dizaines de décimètres, voire quelques mètres. On s'intéresse au cas particulier des sols grossiers ayant une granulométrie discontinue, constitués de gros éléments entourés par une matrice d'éléments fins (sable, limon ou argile) : il s'agit des sols grossiers à matrice.

La caractérisation mécanique de ce type de sols peut être réalisée *in situ* en utilisant des essais dits « en vraie grandeur » (Shirdam *et al.*, 1998), des dispositifs expérimentaux de grandes dimensions comme les essais à la plaque (Lin *et al.* ; 2000, Vallé, 2001) et les essais à la boîte de cisaillement direct *in situ* (Laréal *et al.*, 1973 ; Jain et Gupta, 1974). La caractérisation mécanique en laboratoire nécessite, le plus souvent, l'utilisation de dispositifs de grandes dimensions (Bourdeau, 1997 ; Shirdam *et al.*, 1998 ; Vallé, 2001 ; Gomes Correia *et al.*, 2001). En effet, les dispositifs expérimentaux de dimensions plus classiques, requièrent l'écrêtement

des éléments de grande taille contenus dans le sol grossier étudié.

L'influence de l'écrêtement sur les caractéristiques mécaniques des sols grossiers constitue donc un point important dans l'étude du comportement mécanique de ces matériaux. En effet, cette reconstitution granulométrique induit une modification de l'hétérogénéité de taille, car les éléments les plus gros sont enlevés. Elle entraîne également une modification de l'hétérogénéité de nature, car l'écrêtement des éléments grossiers s'accompagne naturellement d'une augmentation de la proportion d'éléments fins qui peuvent être dans certains cas des limons ou de l'argile. Bien que ce paramètre ait été étudié dans le cadre de travaux de recherche portant sur des matériaux grossiers naturels (Holtz et Gibbs, 1956 ; Donaghe et Thorrey, 1979 ; Gomes Correia *et al.*, 2001 ; Vallé, 2001), les résultats obtenus par les différents auteurs sont souvent contradictoires. Ces différences viennent principalement de la variabilité importante des sols grossiers naturels étudiés (nature, taille...).

Afin d'isoler l'effet de l'hétérogénéité de taille, nous étudions un sol hétérogène modèle constitué uniquement d'éléments granulaires. Ce sol est composé d'un mélange de sable fin ne contenant pas d'éléments limoneux ou argileux, et de graviers.

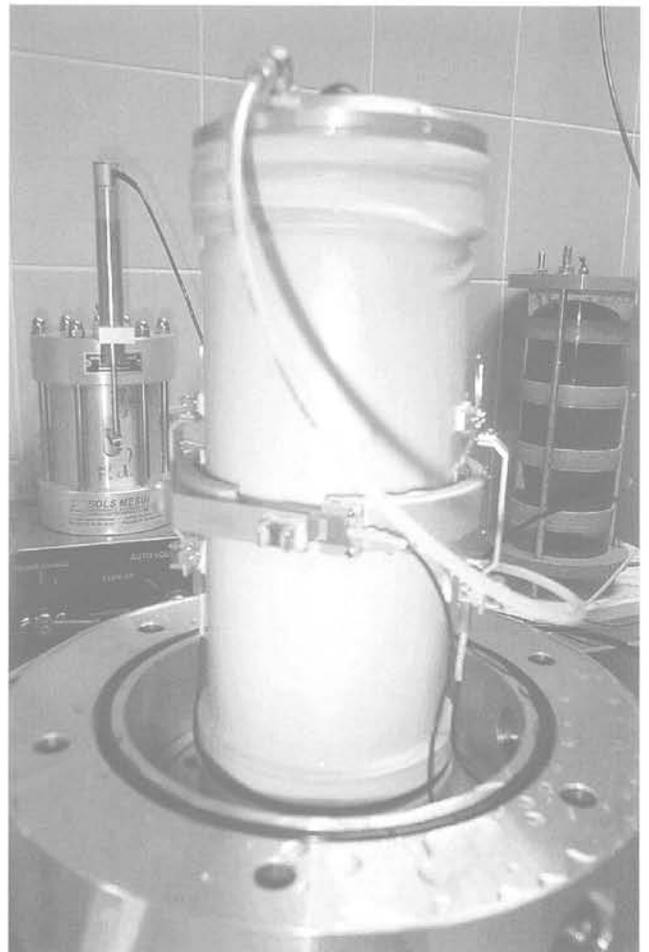


FIG. 1 Dispositif expérimental : vue d'ensemble de la cellule triaxiale (a), système de mesure locale des déformations de l'éprouvette (b).

Experimental device : view of the triaxial apparatus (a), system of sample local strain measurement (b).

Procédures expérimentales

2.1

Dispositifs d'essais

Le dispositif expérimental (Fig. 1) utilisé pour cette étude est constitué d'une cellule triaxiale permettant de solliciter des éprouvettes cylindriques d'un diamètre de 100 mm et d'une hauteur de 200 mm. Cette cellule est placée sur une presse ayant une capacité de 50 kN. Les essais triaxiaux sont réalisés à taux de déformation contrôlé (0,5 % par minute) et en condition drainée.

L'éprouvette peut être instrumentée de capteurs de déplacement à effet Hall afin de mesurer localement ses déformations axiales et radiales (Fig. 1b). Dans le cadre de notre étude, la détermination de la déformation axiale de l'échantillon se fait en mesurant le déplacement de l'embase inférieure à l'aide d'un capteur de déplacement longue course (40 mm, la précision $\pm 0,01$ mm) (Fig. 1a). L'effort axial est mesuré à l'aide d'un capteur de force placé à l'intérieur de la cellule (32 kN, précision de ± 16 N), son positionnement permet de s'affranchir des effets du frottement entre le piston et le couvercle de la cellule. Un volumètre de marque Wykeham et Farrance d'une capacité de 100 cm³ (précision de $\pm 0,05$ cm³) permet de mesurer, au cours du cisaillement, les variations de volume de l'éprouvette.

Un logiciel, développé sous Labview, permet de visualiser, au cours de l'essai, les différentes grandeurs mesurées et de les enregistrer dans un fichier pour un traitement ultérieur.

2.2

Matériaux constitutifs des éprouvettes testées

Les éprouvettes sont constituées d'un mélange de deux matériaux naturels. Le premier composant du mélange est un sable de Fontainebleau (SIFRACO) dont les caractéristiques physiques sont répertoriées dans le tableau I. Ce sable est mélangé en proportion variable à des graviers anguleux (Fig. 2) dont la masse volumique des grains solides est identique à celle du sable ($\rho_s = 2,65$ g/cm³), et dont le diamètre est compris entre 8 et 10 mm. Un rapport de 1/10 entre le diamètre du plus gros élément et celui de l'éprouvette est suffisant pour éviter les effets d'échelle. Le contraste de taille entre les éléments sableux et les graviers est tel que l'on peut clairement dissocier les éléments grossiers des éléments fins. Les graviers peuvent donc être considérés comme des inclusions et le sable comme la matrice.

TABEAU I Caractéristiques physiques du sable de Fontainebleau.
Physical characteristics of Fontainebleau sand.

D ₅₀ (mm)	C _u	e _{min}	e _{max}	r _s (g/cm ³)
0,21	1,52	0,54	0,94	2,65

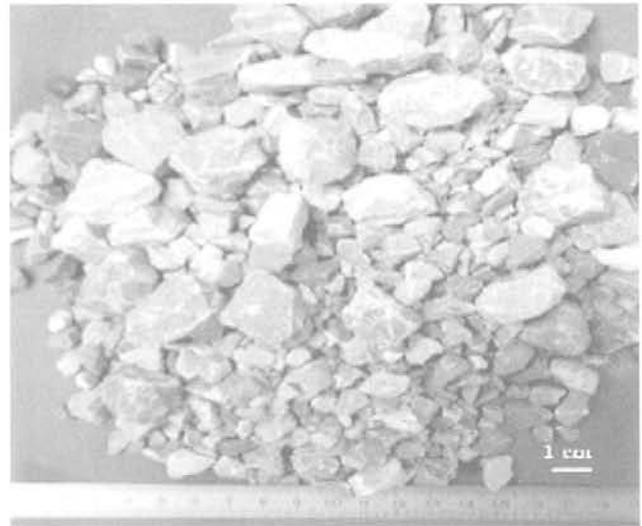


FIG. 2 Vue des graviers constituant les éléments grossiers.
View of the gravel material used as inclusion.

2.3

Caractérisation des éprouvettes et description de la procédure de fabrication

L'état initial de compacité des éprouvettes est défini à partir de la masse volumique moyenne de la matrice sableuse $\rho_{d,mat}$: quelle que soit la quantité de graviers présente dans l'éprouvette, ce paramètre reste égal à 1,58 g/cm³. Cette valeur correspond à un état moyennement dense de la matrice (indice de densité de 0,7). Le second paramètre qui caractérise une éprouvette de sol hétérogène est la proportion de graviers. On définit à cet effet le paramètre fraction massique de graviers, noté f_m , de la façon suivante :

$$f_m = \frac{M_g}{M_g + M_s}$$

avec : M_g : la masse de graviers ;
 M_s : la masse de sable.

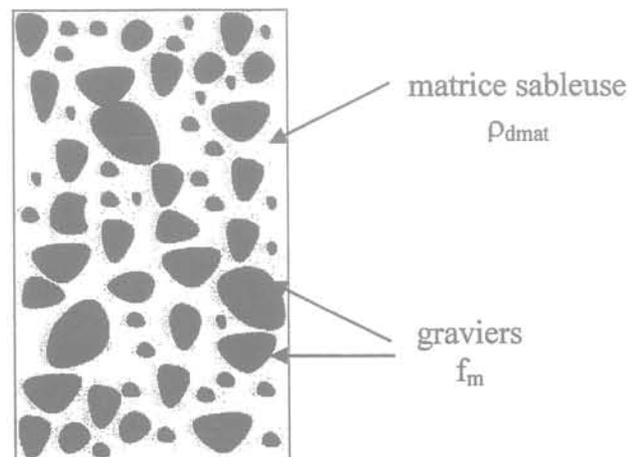


FIG. 3 Caractérisation d'une éprouvette de sol hétérogène.
Characterization of heterogenous soil sample.

Les éprouvettes sont fabriquées en compactant manuellement 10 couches de sol ayant une hauteur de 2 cm. Chaque couche est constituée d'un mélange de sable et d'une proportion de graviers égale à f_m . Avant d'être introduit dans le moule de préformage de l'éprouvette, le mélange des deux matériaux est humidifié et homogénéisé de façon à prévenir tout phénomène de ségrégation granulaire. On s'assure ainsi d'une répartition «homogène» des graviers au sein de la matrice sableuse.

Afin de pouvoir conclure à un effet significatif des caractéristiques des graviers, il est nécessaire d'évaluer au préalable le degré de répétabilité de fabrication des éprouvettes. Dans ce but, nous avons réalisé quatre essais triaxiaux drainés sur des éprouvettes contenant toutes la même proportion de graviers et le même type de graviers. Ces éprouvettes sont toutes fabriquées selon le procédé décrit ci-dessus. La répétabilité obtenue est satisfaisante (Fig. 4) et permet de valider la procédure expérimentale.

3

Résultats expérimentaux

Le programme expérimental consiste à réaliser des essais triaxiaux drainés sur des éprouvettes contenant des proportions variables de graviers. Les valeurs de f_m valent respectivement 0,50, 75 et 100 %. Pour tous les essais, la matrice se trouve à un indice de densité de 0,7 et la contrainte de consolidation isotrope p'_c est égale à 100 kPa. Le tableau II présente les caractéristiques des essais réalisés dans le cadre de cette étude.

TABLEAU II Caractéristiques des essais triaxiaux drainés réalisés.

Characteristics of drained triaxial tests realised.

Test	p'_c (kPa)	Matrice c		Inclusions c	
		Type ⁽¹⁾	ρ_d (g/cm ³)	Type ⁽²⁾	f_m (%)
T43	T43	Fb	1,58	Gr8-10	30
T44	T44	Fb	1,58	Gr8-10	20
T47	T47	Fb	1,58	Gr8-10	50
T76	T76	Fb	1,58	Gr8-10	0
T142	T142	Fb	1,58	Gr8-10	30
T150	T150	Fb	1,58	Gr8-10	30
T153	T153	Fb	1,58	Gr8-10	75
T154	T154	Fb	1,58	Gr8-10	100
T221	T221	Fb	1,58	Gr8-10	30

(1) Fb : sable de Fontainebleau.

(2) Gr8-10 : graviers 8-10 mm.

3.1

Mobilisation du cisaillement

Lorsque la proportion de graviers augmente, on observe (Fig. 5) un accroissement de la valeur du déviateur maximal obtenu au pic q_{pic} . Comme le montre la figure 6, l'évolution du paramètre q_{pic} est non linéaire et semble se stabiliser pour des valeurs élevées de la proportion de graviers (supérieures à 50 %). On constate

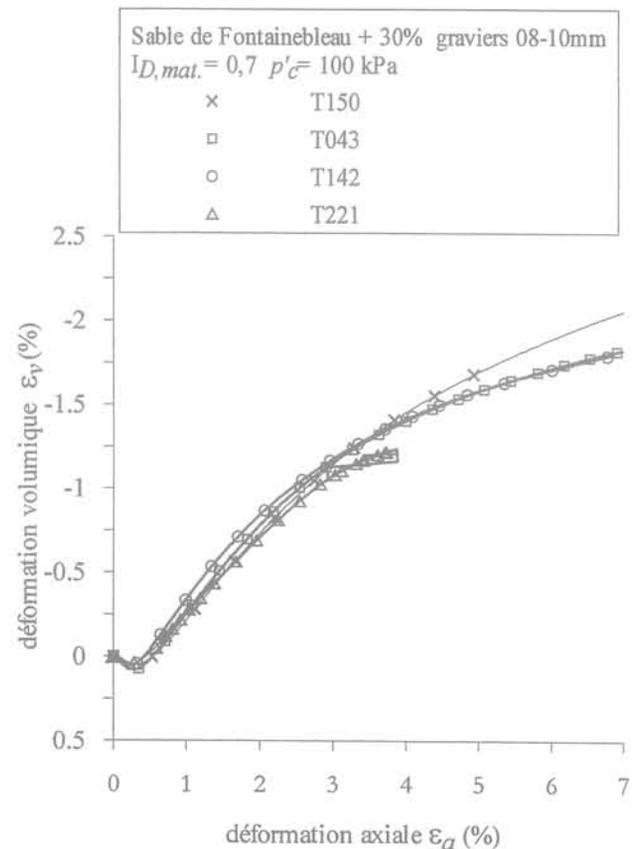
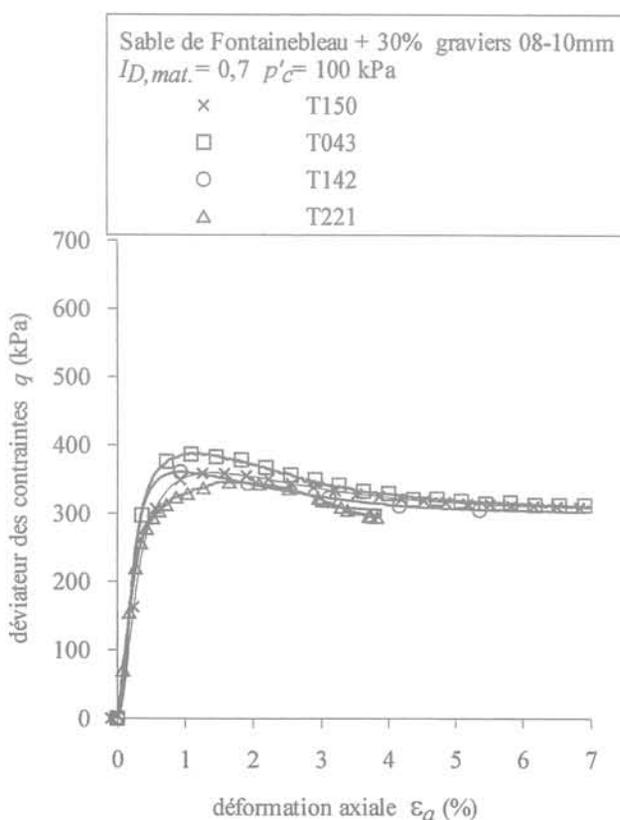


FIG. 4 Essais de répétabilité : courbes de cisaillement et courbes de déformation volumique. Repetability tests: shearing curves and volumic strain curves.

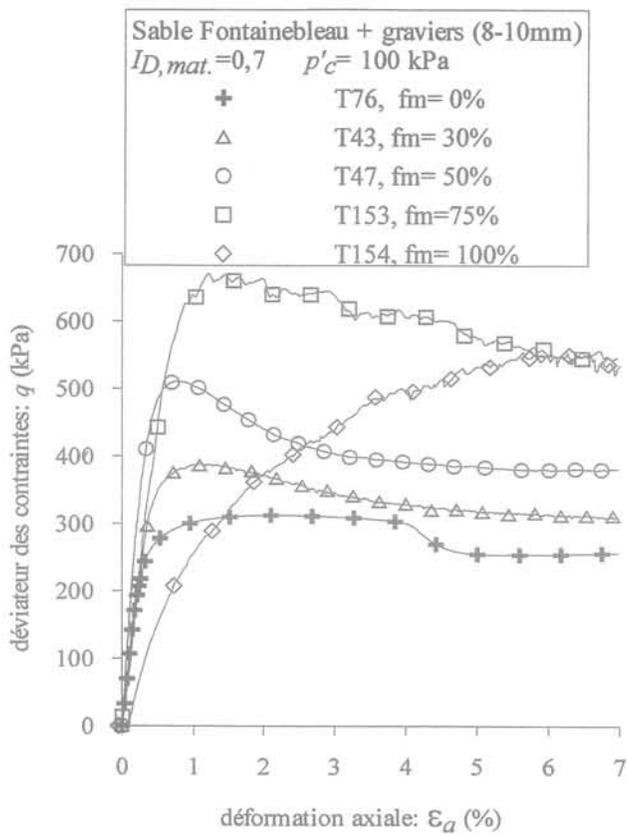


FIG. 5 Influence de la fraction massique de graviers sur les courbes de cisaillement.
 Influence of gravel fraction on the shearing curves.

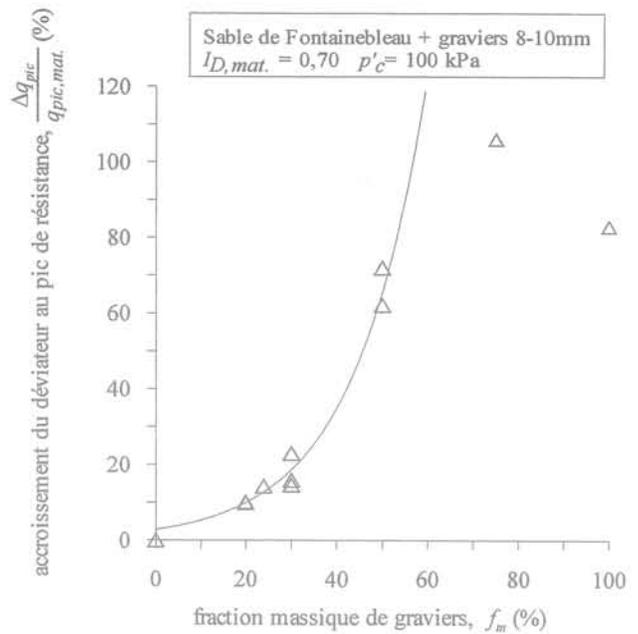


FIG. 6 Influence de la fraction massique de graviers sur le déviateur à la rupture.
 Influence of gravel fraction on the failure deviatoric stress.

également que l'éprouvette contenant 100 % de graviers présente une raideur initiale nettement plus faible que celle des autres éprouvettes.

L'effet de renfort observé est lié à la présence des graviers, qui constituent, au sein de l'éprouvette, des éléments rigides reprenant les efforts de cisaillement. La transmission de ces efforts est possible car les graviers, ayant une surface rugueuse, adhèrent à la matrice sableuse par frottement aux interfaces matrice-graviers.

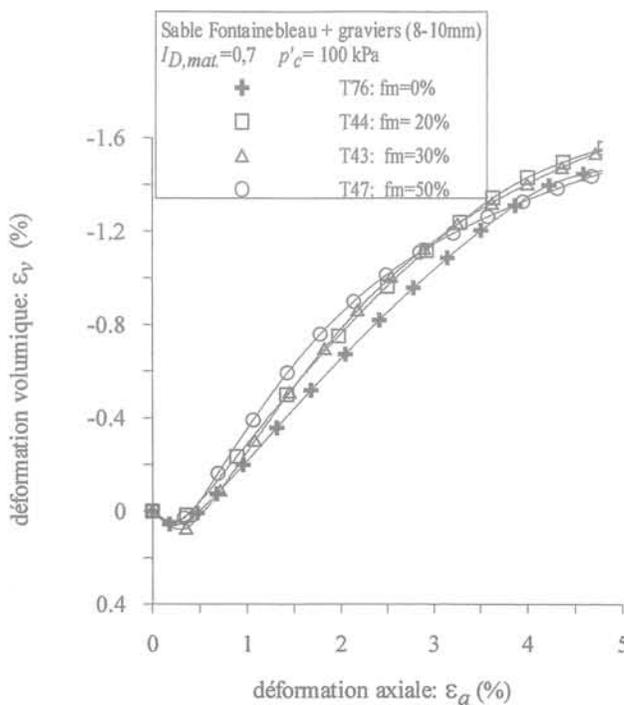
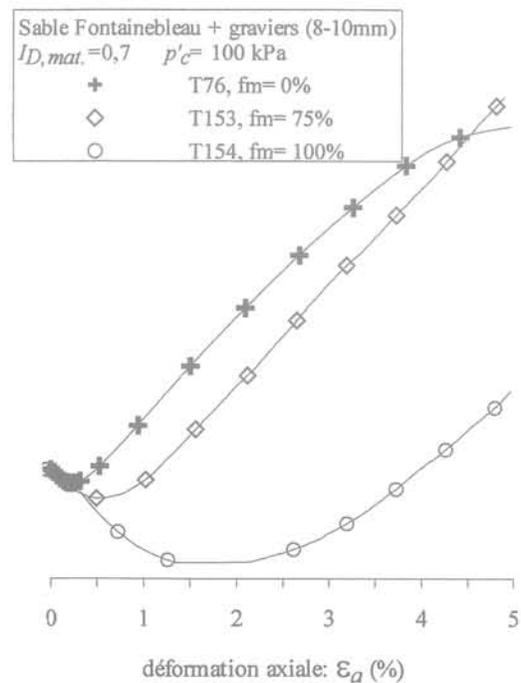


FIG. 7 Influence de la fraction massique de graviers sur la déformation volumique de l'éprouvette.
 Influence of gravel fraction on the sample volumic strain curves.



Dans le cas des proportions d'inclusions élevées (75 % et 100 %), l'effet de renfort semble être dû principalement aux forces de contact entre les graviers. La diminution de la valeur de q_{pic} pour la fraction massique de 100 % s'explique par le fait que, les vides entre les graviers ne contiennent pas de matériau. La résistance au cisaillement de cette éprouvette est exclusivement liée aux propriétés de contact entre les graviers. L'absence de matrice sableuse entre les graviers explique également la diminution de la raideur de l'éprouvette contenant 100 % de graviers.

3.2

Déformations volumiques

La figure 7 montre que plus la proportion de graviers augmente, plus l'éprouvette semble avoir un comportement dilatant. En effet, on peut observer sur la figure 8, que le taux de dilatance $\alpha (d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)$ augmente en fonction de f_m . Il semble que cette variation du paramètre α ne traduise pas une augmentation du potentiel de dilatance de l'éprouvette. Elle traduit plutôt le fait que lorsque la proportion de graviers croît, la fraction de matière déformable (matrice sableuse) diminue. Cette explication est confirmée par le caractère linéaire de la relation entre α et f_m (Fig. 8)

Pour des valeurs plus élevées de la proportion de graviers, on note une brusque chute du taux de dilatance. Pour ces valeurs de f_m , comme nous l'avons évoqué plus haut, la structure granulaire est constituée de graviers en contact entre eux et de sable remplissant plus ou moins les vides entre les graviers. Ainsi, le potentiel de dilatance de l'éprouvette ne dépend plus de celui de la matrice sableuse, mais de celui du squelette granulaire constitué par les graviers.

L'allure des courbes de variation de volume nous renseigne sur l'initiation de la localisation des déformations de l'éprouvette. En comparant par exemple les courbes de variation de volume d'une éprouvette ne contenant aucune inclusion à celle d'une éprouvette qui en contient 30 % (Fig. 9), on note l'existence

d'un changement brusque d'évolution de la courbe pour l'éprouvette sans inclusions. La présence de ce coude correspond à l'occurrence du phénomène de localisation des déformations. Par contre, les courbes des essais réalisés sur les éprouvettes contenant 30 % de graviers ne présentent pas de coude : tout se passe comme si la présence des graviers entravait le développement d'une bande de cisaillement. Les photos d'éprouvettes (Fig. 9) après essais corroborent bien cette interprétation : on voit en effet que l'éprouvette sans graviers s'est rompue en deux blocs, alors qu'il n'existe pas de bande de cisaillement nette sur l'éprouvette contenant des graviers.

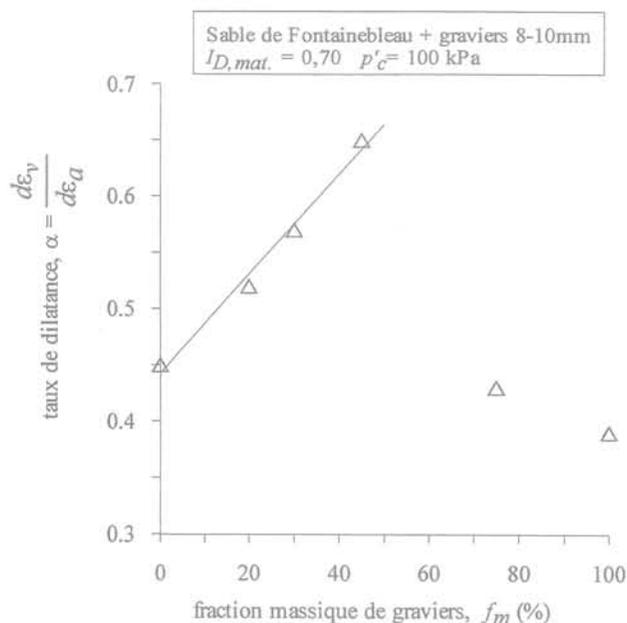


FIG. 8 Influence de la fraction massique de graviers sur le taux de dilatance.
 Influence of gravel fraction on dilatancy ratio.

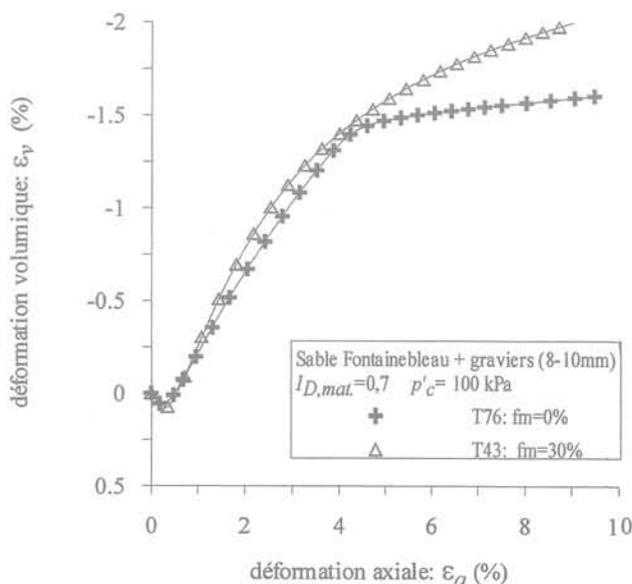


FIG. 9 Influence de la présence des graviers sur le mode de rupture.
 Influence of gravel on failure mode.

$f_m = 0\%$

$f_m = 30\%$



Recherche d'un critère de rupture

Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé des essais triaxiaux à diverses valeurs de la pression de consolidation isotrope : $p'_c = 50, 100$ et 200 kPa. Pour étudier l'évolution du critère en fonction de la proportion de gravier, un jeu d'essais a été réalisé pour différentes proportions de gravier.

Nous avons représenté dans le plan (q, p') les points expérimentaux correspondants aux différents essais (Fig. 10). On constate d'abord, que l'augmentation de la proportion de gravier n'a pas d'influence sur le caractère linéaire du critère de rupture. Ensuite, on remarque qu'en ajoutant des éléments grossiers dans une matrice pulvérulente, le mélange ainsi obtenu est également dénué de cohésion. Finalement, on note que l'angle de frottement des éprouvettes est une fonction croissante de la proportion de graviers (Fig. 11).

Conclusion

Les travaux présentés ont permis d'isoler l'influence de l'hétérogénéité de taille sur les caractéristiques de rupture d'un sol grossier modèle. Ils ont montré l'existence d'un effet d'accroissement de la résistance au cisaillement dû à la présence d'éléments rigides au sein d'une matrice plus fine et moins rigide. Cette recherche a également mis en évidence une modification du comportement du sol hétérogène à partir d'une certaine

valeur de la proportion d'éléments grossiers. En effet, lorsque f_m croît, on passe d'un comportement lié essentiellement aux caractéristiques de la matrice, à un comportement complètement gouverné par les graviers. Ce changement de comportement est notable en termes d'effort mobilisé et de variation de volume.

Ces résultats peuvent être utilisés dans le cadre pratique qui est celui de la déduction des caractéristiques mécaniques d'un sol hétérogène à partir de celles du sol écrêté. Ces travaux démontrent en effet que l'écrêtement des éléments grossiers conduit à une sous-estimation de propriétés mécaniques des sols grossiers hétérogènes ne contenant pas de fines (argiles ou limons). Par ailleurs, il semble que les caractéristiques mécaniques du sol hétérogène peuvent être évaluées à partir des propriétés de la matrice et de la proportion d'éléments grossiers. En effet, nous avons mis en évidence de façon expérimentale, des relations qui relient les caractéristiques mécaniques du sol étudié (q_{pic} , taux de dilatance et angle de frottement) à celles de ces composants (matrice sableuse et éléments grossiers).

L'étude du comportement mécanique d'un sol grossier modèle apporte des éléments d'éclaircissement sur l'influence de l'hétérogénéité de taille qui est une des principales caractéristiques des sols grossiers. L'influence d'autres paramètres significatifs tels que la taille, la forme des éléments grossiers a fait l'objet de récents travaux. L'effet de l'état initial a été également étudié (Pedro, 2004). Néanmoins, il reste à étendre cette étude au cas des mélanges granulaires ayant une granulométrie continue ainsi qu'au cas de matériaux naturels qui ont une composition plus complexe et plus variée que celle du sol modèle.

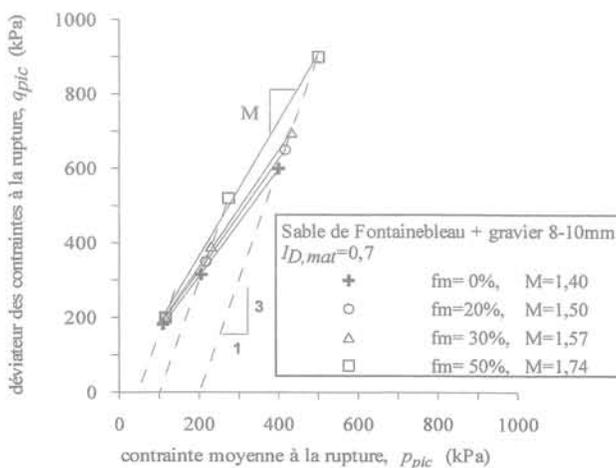


FIG. 10 Influence de la fraction massique de graviers sur la droite de rupture.
Influence of gravel fraction on the failure criterion.

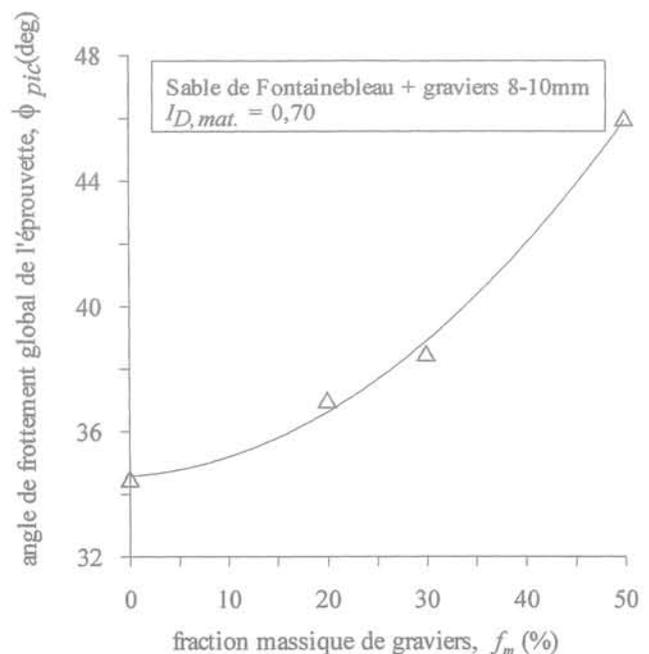


FIG. 11 Influence de la fraction massique de graviers sur l'angle de frottement.
Influence of gravel fraction on internal friction angle.

Bibliographie

- Bourdeau Y. – Le comportement des alluvions du Rhône dans une grande boîte cisaillement direct. *Revue française de géotechnique* n° 79, 1997, p. 45-57.
- Donaghe R.T., Torrey V.H. – Scalping and replacement effects on strengths parameters of earth-rock mixtures. *Design parameters in geotechnical engineering*, London, 1979, vol. 2, p. 29-34.
- Gomes Correia A., Dan L.K., Koseki J., Tatsuoka F. – Small strain stiffness under different isotropic and anisotropic stress conditions of two granular granite materials. *Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials*, 2001, vol. 1, p. 209-215.
- Holtz W.G., Gibbs H.J. – Triaxial shear test on previous gravelly soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation of the ASCE*, vol. 82, 1956, p. 1-9.
- Jain S.P., Gupta R.C. – *In situ* shear test for rockfills. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation of the ASCE*, vol. 100, 1974, p. 1031-1050.
- Laréal P., Bourdeau Y., Lambert P., Cotte-reau C. – Essais de cisaillement *in situ* sur les sols alluvionnaires de la vallée du Rhône. *Travaux*, vol. 55, 1973, p. 52-59.
- Lin S.Y., Lin P.S., Luo H.S., Juang C.H. – Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, 2000, p. 638-651.
- Pedro L.S. – *De l'étude du comportement mécanique de sols hétérogènes modèles à son application au cas des sols naturels*. Thèse de doctorat de l'ENPC, 2004.
- Shirdam R., Faure R.M., Magnan J.-P. – Caractéristiques des éboulis de pente à l'aide d'une boîte de cisaillement. *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks*, Picarelli & Evangelista (eds), Balkema, Rotterdam, 1998, p. 869-880.
- Vallé N. – *Propriétés mécaniques d'un sol grossier d'une terrasse alluvionnaire de la Seine*. Thèse de doctorat de l'université de Caen, 2001.