

ÉVALUATION DES PARAMÈTRES DE RUPTURE DE SOLS GROSSIERS À MATRICE

DETERMINATION OF THE FAILURE PARAMETERS OF A MATRIX TYPE COARSE GRAINED SOIL

Youssam KAZAN¹, Bassel SEIF EL DINE¹, Jean-Claude DUPLA², Jean CANOU².

¹ Université Libanaise, Faculté de Génie, Roumieh, Liban

² CERMES, École Nationale des Ponts et Chaussées, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée, France

RÉSUMÉ – Cette communication complète une série d'essais réalisés sur un sol grossier typique. On s'intéresse aux caractéristiques de rupture d'un sol grossier à matrice de référence. Après avoir décrit le dispositif triaxial utilisé, le matériau testé et la procédure expérimentale, on met en évidence les spécificités de comportement du sol grossier par rapport à la matrice de référence. On met, en particulier, en évidence l'influence de différents paramètres d'état caractérisant le sol sur l'angle de frottement interne du matériau.

ABSTRACT – This paper complete the results of a triaxial testing programme aimed at studying the failure characteristics of a reference matrix type coarse grained soil. After a description of the experimental set-up and of the tested soil, the specificities of the coarse grained soil behaviour, with respect to its constitutive matrix, are shown. The influence of parameters such as volumetric fraction, size and size distribution of inclusions, on failure characteristics of the soil, is shown.

1. Introduction

Les sols grossiers constituent une classe de sols particuliers, assez largement répandus et dont une spécificité est que les éléments constitutifs peuvent présenter une grande hétérogénéité de taille et de nature. Ces sols peuvent, en effet, être constitués d'éléments ayant la taille de particules argileuses, limoneuses ou sableuses mélangés à des éléments de la taille de graviers, de cailloux, voire de blocs rocheux. Ces sols ont déjà fait l'objet de travaux importants Afriani (2003), Pedro (2004), Pedro et al. (2005) tant en France que dans d'autres pays, mais il n'existe pas encore de consensus et de méthodologie vraiment éprouvée pour les prendre en compte, au plan mécanique, de manière vraiment rationnelle et fiable. Certains de ces sols peuvent être constitués d'une famille bien différenciée d'« inclusions » de grande taille, « noyées » au sein d'une « matrice » dont les éléments ont une taille moyenne beaucoup plus faible. On peut alors les qualifier de sols grossiers à « matrice ». C'est à cette classe de sols grossiers que l'on s'intéresse ici.

Dans ce contexte, on présente, dans cette communication, les résultats de travaux visant à mettre en évidence, sur des sols grossiers de référence, reconstitués en laboratoire, l'influence de paramètres d'état caractérisant le sol, sur les comportements observés, et, en particulier, sur les caractéristiques de rupture de ces sols. Après avoir présenté le dispositif d'essai, les sols étudiés et quelques essais typiques, on présente l'influence de paramètres d'état importants sur les comportements observés et les caractéristiques de rupture de ces sols.

Ce sujet a déjà fait l'objet d'une communication (Seif El Dine et al., 2006) qui a exposé certains résultats expérimentaux. La présente communication complète la campagne expérimentale et les interprétations correspondantes.

2. Dispositif d'essai, sol étudié

Le dispositif d'essai utilisé est un dispositif triaxial permettant de cisailer des éprouvettes de 300 mm de diamètre et 600 mm de hauteur. Les chargements verticaux sont appliqués à l'éprouvette grâce à un servo-vérin d'une capacité de 500 kN, permettant de solliciter l'éprouvette à déplacement ou à force contrôlée, en monotone ou cyclique. Dans la gamme cyclique, le dispositif

permet de monter jusqu'à des fréquences de sollicitations de plusieurs dizaines de hertz, en fonction de l'amplitude demandée en déplacement.

La pression de confinement est appliquée soit par l'intermédiaire d'un détendeur simple et d'une interface air-eau, soit à partir d'un dispositif de contrôle dynamique de pression, piloté par un servo-vérin, permettant alors un pilotage du dispositif en mode « biaxial » permettant de réaliser des chemins de contraintes variés dans le plan (q , p'). Le système d'asservissement est digital, un logiciel de pilotage permettant de contrôler le fonctionnement du dispositif et de piloter un essai suivant le programme de chargement spécifié.

Un capteur LVDT incorporé au servo-vérin permet de mesurer le déplacement du piston et de calculer la déformation verticale globale de l'éprouvette. Dans le cas de sols saturés, la déformation volumique des éprouvettes est calculée sur la base de la mesure de la masse d'eau qui sort ou qui entre dans l'éprouvette, grâce à une balance de précision. L'effort de cisaillement est mesuré grâce à un capteur immergé situé à la base de l'éprouvette, permettant de s'affranchir de tout frottement parasite.

Les sols utilisés sont dits de référence, reconstitués au laboratoire, du type sol grossier à matrice. En vue d'avoir une structure de matériau suffisamment simple, permettant de mettre en évidence de manière claire l'influence des inclusions sur les comportements observés, on a retenu une matrice formée de sable de Fontainebleau, les inclusions étant constituées par des graviers anguleux de différentes tailles. Ce type de matériau, relativement simple par rapport à des sols grossiers naturels souvent plus complexes, doit permettre de mettre en évidence l'influence de paramètres d'état de base sur les comportements observés (tels que la fraction volumique des inclusions, les caractéristiques granulométriques des inclusions, l'indice de densité de la matrice, ...), le matériau pouvant être progressivement plus complexe en rajoutant des coupes granulométriques, jusqu'à des particules fines (limon, argile, ...).

Pour fabriquer l'éprouvette, le matériau est mis en œuvre par compactage de couches successives, après humidification du mélange et homogénéisation, ce qui permet d'obtenir une bonne répétabilité de fabrication. La figure 1 présente des inclusions typiques utilisées (a), ainsi que le mélange sable inclusions avant humidification (b).

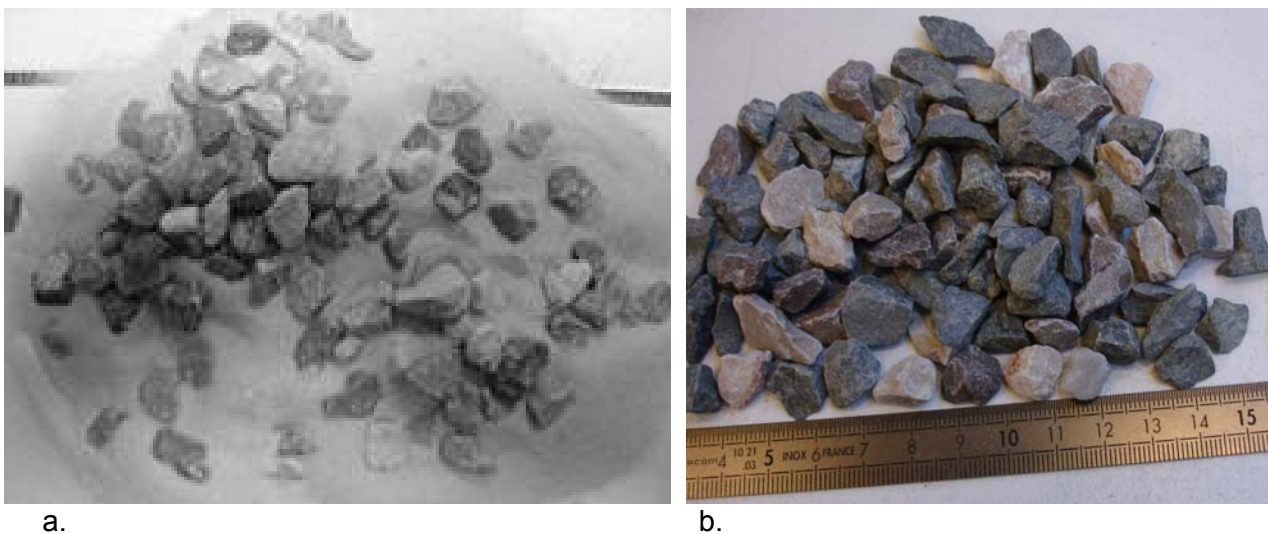


Figure 1. (a) Inclusions typiques utilisées ; (b) Mélange sable-inclusions avant humidification

3. Influence de la fraction volumique des inclusions sur la résistance au cisaillement

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 sur les comportements observés. L'influence de ce paramètre est étudiée en réalisant des essais sur des éprouvettes reconstituées à différentes valeurs de la fraction volumique f_v d'inclusions de taille 30/60 mm. La figure 2 présente les résultats obtenus en termes de courbes de cisaillement et de courbes de déformation volumique. Sur ces figures ont aussi été représentées les courbes correspondant à la matrice seule.

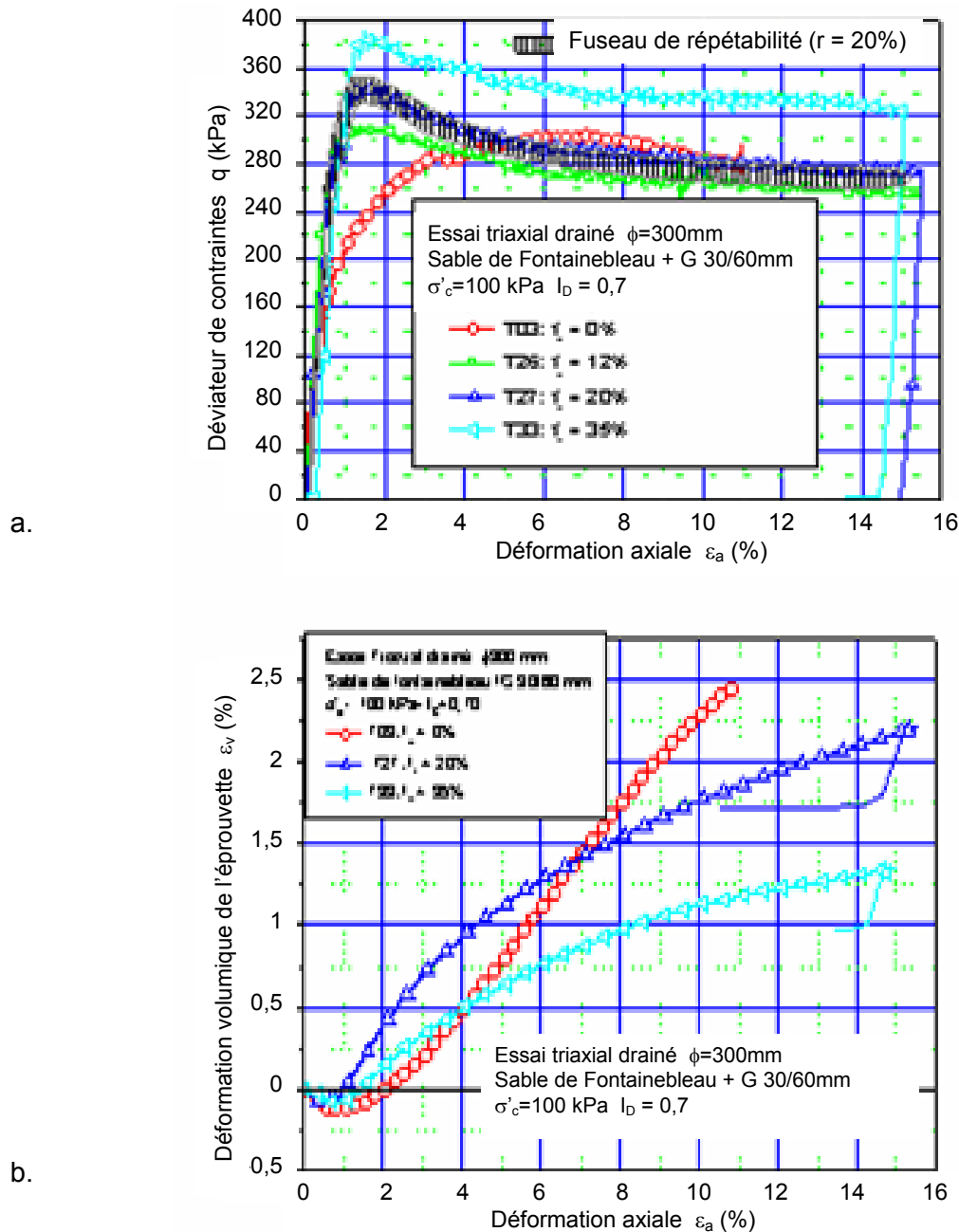


Figure 2. Influence de la fraction volumique des inclusions sur les comportements observés

En termes de résistance au cisaillement du matériau, la figure 2.a permet de mettre en évidence une influence claire de la fraction volumique des inclusions sur la résistance au cisaillement du sol, avec une augmentation des caractéristiques mécaniques du sol, en particulier en termes de déviateur à la rupture q_{\max} , avec l'augmentation de f_v . Il est intéressant de remarquer que, par rapport au comportement de la matrice seule, l'ajout d'inclusions change la rhéologie du matériau et que l'on passe d'un comportement de type « ductile » pour la matrice (rupture à q_{\max} obtenue pour une déformation axiale de l'ordre de 7%) à un comportement de type « fragile » pour le sol composite, avec un maximum de résistance obtenu pour une déformation faible (inférieure à 2% dans tous les cas), le radoucissement étant d'autant plus prononcé que la fraction d'inclusions est élevée.

Il est aussi intéressant d'observer que, pour les grandes déformations, on atteint des valeurs ultimes de résistance comparables pour la matrice et pour le sol grossier, ce qui montre que c'est alors la matrice qui contrôle essentiellement les mécanismes de déformation.

En termes de déformations volumiques, la réponse de la matrice seule se différencie sensiblement de celle des mélanges, avec une contractance initiale plus importante pour la matrice. Les taux de dilatance maximaux observés sur les courbes ne sont cependant pas très

différents entre la matrice et les mélanges, sauf pour le matériau correspondant à $f_v = 35\%$, pour lequel la courbe est assez différente et moins régulière.

4. Influence de la taille des inclusions

Il est important de pouvoir évaluer l'influence de la taille des inclusions sur les comportements observés, pour un étalement granulométrique donné de ces inclusions (translation des courbes granulométriques). Pour ce faire, on a réalisé des essais sur des éprouvettes comportant une même fraction volumique d'inclusions 10/20 mm et 30/60 mm, tous autres paramètres égaux par ailleurs ($f_v = 12\%$, $\sigma'_c = 100$ kPa, $I_{D,mat} = 0,70$). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3 sous forme de courbes de cisaillement et de courbes de déformation volumique.

La figure 3a montre que les deux courbes de cisaillement obtenues s'insèrent dans le fuseau de répétabilité et se différencient clairement de celle de la matrice. Cela semble indiquer que la résistance est indépendante de la taille des inclusions.

En termes de déformations volumiques (Fig. 3.b), les courbes sont très proches jusqu'à 3% environ de déformation axiale, puis se séparent avec un caractère dilatant moins marqué dans le cas des plus grosses inclusions.

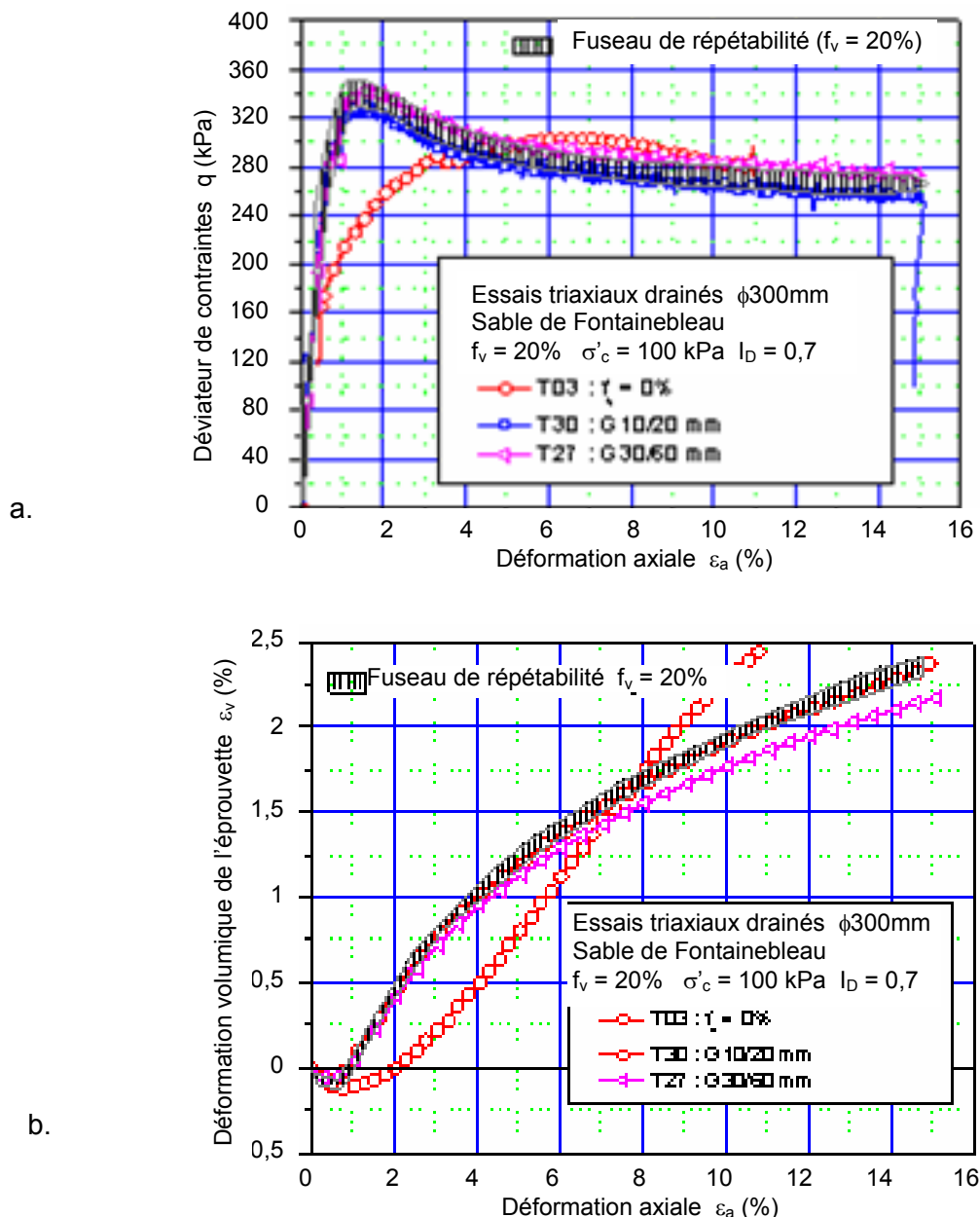


Figure 3. Influence de la taille des inclusions

5. Influence de l'étalement granulométrique des inclusions

L'étalement granulométrique constitue un autre paramètre dont il est important de quantifier l'influence. Pour ce faire, on a testé différentes éprouvettes comportant des inclusions caractérisées par différents étalements granulométriques (8/10, 10/20, 30/60, 10/60, 4/60 mm), tous les autres paramètres étant égaux par ailleurs ($f_v=12\%$, $\sigma'_c=100$ kPa, $I_{D,mat}=0,70$). Pour savoir si l'étalement de la courbe granulométrique a une influence sur le comportement du sol grossier, nous avons comparé les essais réalisés par rapport au fuseau de référence. Les résultats sont présentés sur la figure 4.

La figure 4a met en évidence une diminution des caractéristiques mécaniques du matériau avec l'augmentation de l'étalement granulométrique des inclusions. En particulier, en termes de résistance maximale mobilisable (q_{max}), on observe, pour une même fraction volumique d'inclusions, une diminution significative de q_{max} quand 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 plus marqué pour la granulométrie la plus étroite et un comportement plus « ductile » pour la granulométrie la plus étalée.

D'autre part, sur la figure 4b, on remarque que, lors de la phase de contractance, l'étalement de la courbe granulométrique n'a pas d'influence significative sur les déformations volumiques ; par contre, en dilatance, on trouve que le sol est d'autant moins dilatant que la courbe granulométrique des inclusions est étalée.

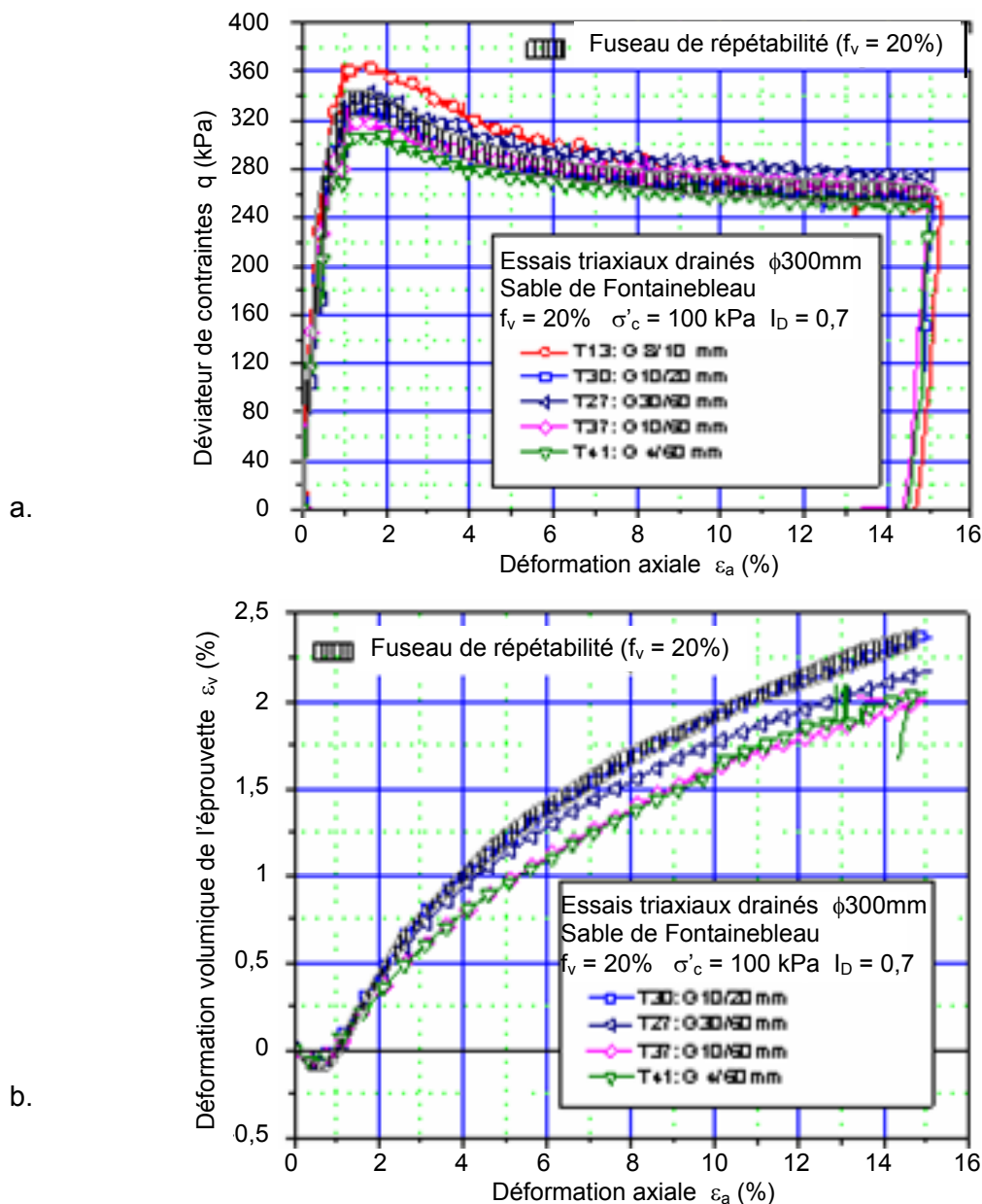


Figure 4. Influence de l'étalement granulométrique des granulats

4. Influence de la contrainte de consolidation isotrope

En vue de mettre en évidence l'influence de la contrainte de consolidation isotrope sur les résultats obtenus et d'évaluer le critère de rupture du matériau, on a réalisé des essais pour des valeurs de contrainte isotrope initiale de 50, 100 et 400 kPa. La figure 5 montre les résultats obtenus dans le cas d'une fraction volumique de 20% d'inclusions 10/20 mm. On retrouve une quasi proportionnalité des niveaux de cisaillement atteints par rapport à la contrainte de consolidation, similaire au comportement observé de manière classique sur des sables, avec une atténuation du pic de résistance lorsque la contrainte de consolidation augmente. En termes de déformations volumiques, on constate que le caractère contractant du sol augmente avec la contrainte de consolidation, résultat observé aussi de manière classique dans les sables. On retrouve donc là des comportements qualitativement similaires à ceux observés pour les sables, éventuellement modifiés par la présence des inclusions.

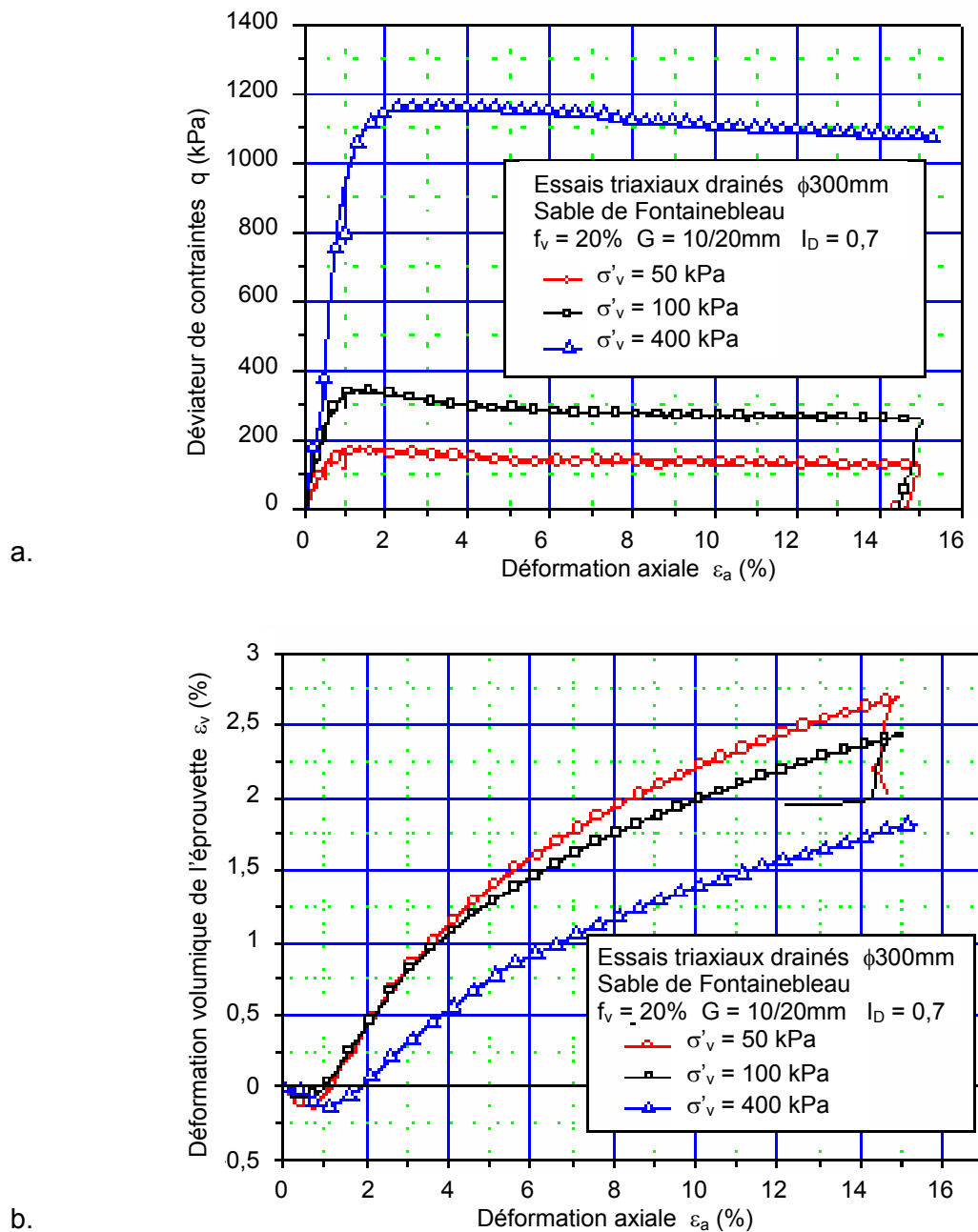


Figure 5. Influence de la contrainte de consolidation

7. Critère de rupture – Angle de frottement interne

À partir des essais réalisés, on a cherché à évaluer les caractéristiques de rupture initiale des sols testés, au maximum de résistance au cisaillement. La représentation classique des états de rupture du sol permet de vérifier que l'on va avoir affaire à un critère de Mohr-Coulomb (critère linéaire) passant par l'origine des axes (pas de cohésion c'), confirmant que l'on retrouve un critère de sol pulvérulent analogue à celui de la matrice seule (le mélange reste en effet pulvérulent), modifié par la présence des inclusions.

La figure 6 résulte de l'interprétation des résultats et montre la valeur de l'angle de frottement résultant des essais. L'analyse des courbes permettra de formuler les conclusions finales de cette campagne d'essai.

On retrouve tout d'abord l'effet de renforcement du matériau apporté par les inclusions, avec un angle de frottement interne qui augmente de manière significative avec l'augmentation de la fraction volumique d'inclusions, dans tous les cas. L'augmentation la plus significative avec f_v est trouvée dans le cas des inclusions uniformes 8/10 mm, où l'on passe d'un angle de frottement de 37 degrés pour la matrice seule à un angle de frottement de l'ordre de 42,5 degrés pour le mélange.

On retrouve aussi le fait que, pour un même étalement granulométrique des inclusions, la taille des inclusions n'a pas d'influence significative sur la valeur de l'angle de frottement, les évolutions de ce paramètre pour les inclusions 10/20 mm et 30/60 mm étant très proches.

On retrouve finalement que l'étalement granulométrique des graviers (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.

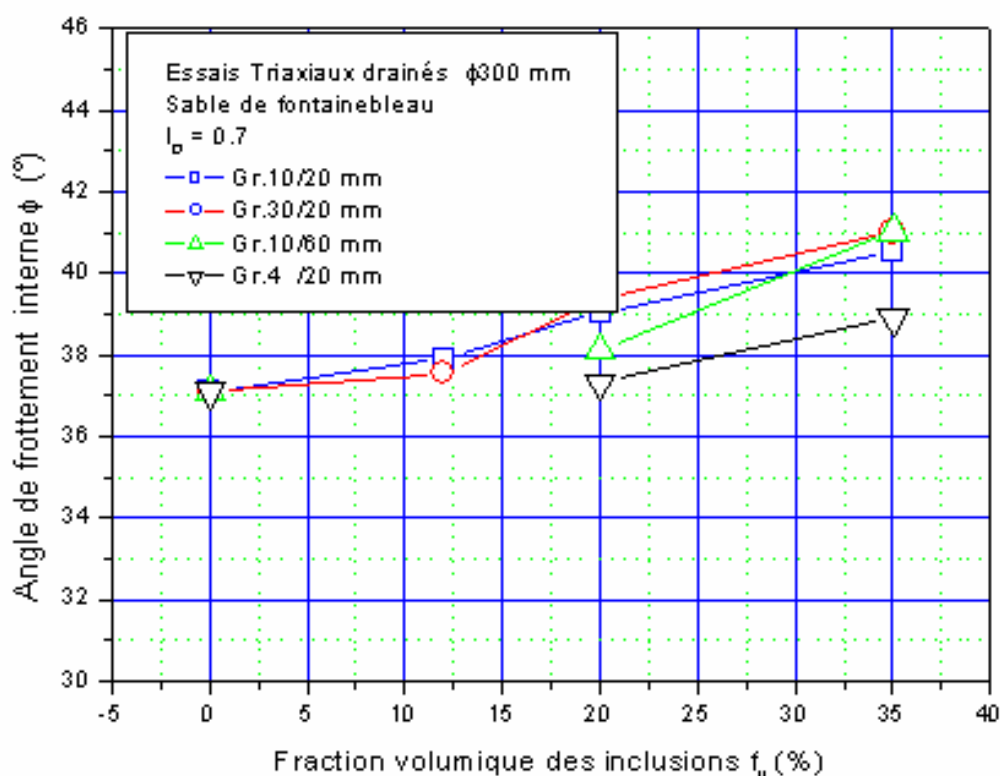


Figure 6. Évolution de l'angle de frottement interne en fonction de la fraction volumique

8. Conclusion

On a présenté et complété dans cette communication les résultats d'un programme d'essais triaxiaux destinés à étudier le comportement mécanique de sols grossiers à matrice de référence en termes de rupture et de critère de résistance. L'intérêt d'utiliser de tels sols de référence, « simplifiés » par rapport à des sols grossiers naturels souvent plus complexes, est de pouvoir mettre en évidence de manière claire l'influence de paramètres d'état de base sur les

comportements étudiés. Il est ensuite possible de rendre plus complexes les sols étudiés pour se rapprocher des sols naturels en rajoutant différentes classes granulométriques de matériaux.

Les résultats obtenus sur ces sols de référence montrent 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 des ruptures avec pic observées pour les mélanges à 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 observés concernent la taille des inclusions qui ne paraît pas avoir d'influence significative sur les caractéristiques mécaniques du matériau, et l'étalement granulométrique des inclusions qui a, lui, une influence significative avec un effet de renforcement plus important pour les inclusions à granulométrie serrée.

9. Références bibliographiques

- Afriani L. (2003). *Essais de cisaillement direct des sols grossiers : Incidences des procédures d'essai et effets d'échelle*. Thèse de doctorat, Université de Caen.
- Pedro L. (2004). *Étude du comportement mécanique de sols hétérogènes modèles à son application au cas des sols naturels*. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Pedro L.S., Canou J., Dupla J.-C., Dormieux L., Kazan Y. (2005). Caractéristiques de rupture d'un sol hétérogène de référence. *C.R. 16ème Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique, Osaka*, pp. 567-570.
- Seif El Dine B., Dupla J.C., Canou J., Kazan Y. (2006). *Caractéristiques de rupture d'un sol grossier à matrice*. Symposium International sur les états limites en géotechnique (ELU-ULS 2006), ENPC/LCPC, Paris, vol. 1, pp. 137-146.