

CARACTERISTIQUES DE RUPTURE D'UN SOL GROSSIER A MATRICE

FAILURE CHARACTERISTICS OF A MATRIX TYPE COARSE GRAINED SOIL

Bassel SEIF EL DINE^{1,2}, Jean-Claude DUPLA¹, Jean CANOU¹, Youssam KAZAN²

1 CERMES (Institut Navier, ENPC/LCPC), Paris

2 Université Libanaise, Beyrouth

RÉSUMÉ – On s'intéresse, dans cette communication, 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 presents the results of a triaxial testing programme aimed at studying failure characteristics of a reference matrix type coarse grained soil. After a description of the experimental set-up and soil tested, 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 spécifique, assez largement répandu et dont une caractéristique 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 (moraines glacières). Ces sols ont déjà fait l'objet de différents travaux, tant en France qu'au plan international, mais il n'existe pas encore vraiment de consensus et de méthodologie d'approche vraiment éprouvée pour aborder ces sols et des recherches doivent encore être poursuivies pour mieux les appréhender. On pourra se reporter, en particulier, aux travaux de Holtz et Gibbs (1956), Laréal et al. (1973), Jain et Gupta (1974), Donaghe et Torrey (1979), Bourdeau (1997), Shirdam et al. (1998), Lin et al. (2000), Gomes Correia et al. (2001) et Vallé (2001) pour davantage d'information sur ces sols. Certains de ces sols peuvent être constitués d'une classe 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, qui a déjà fait l'objet de travaux récents (Pedro, 2004 ; Pedro et al., 2005a ; Pedro et al., 2005b).

Le comportement mécanique des sols grossiers en général et des sols grossiers à matrice en particulier, est encore relativement mal connu, et ceci, pour partie, en raison de la difficulté de réaliser des essais de laboratoire sur des volumes élémentaires représentatifs. L'utilisation de dispositifs expérimentaux de dimension conventionnelle est limitée par la présence d'inclusions de grande taille et la réalisation d'essais au moyen de dispositifs de grande taille constitue une alternative souvent difficile à mettre en œuvre et onéreuse.

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.

2. Dispositif d'essai, sol étudié

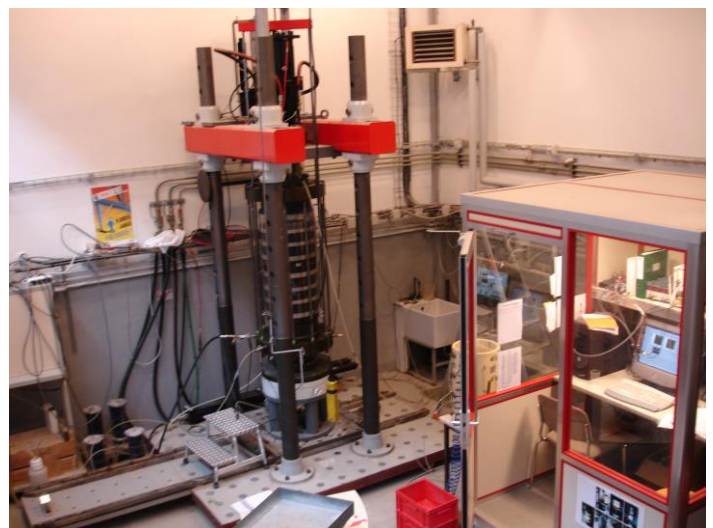
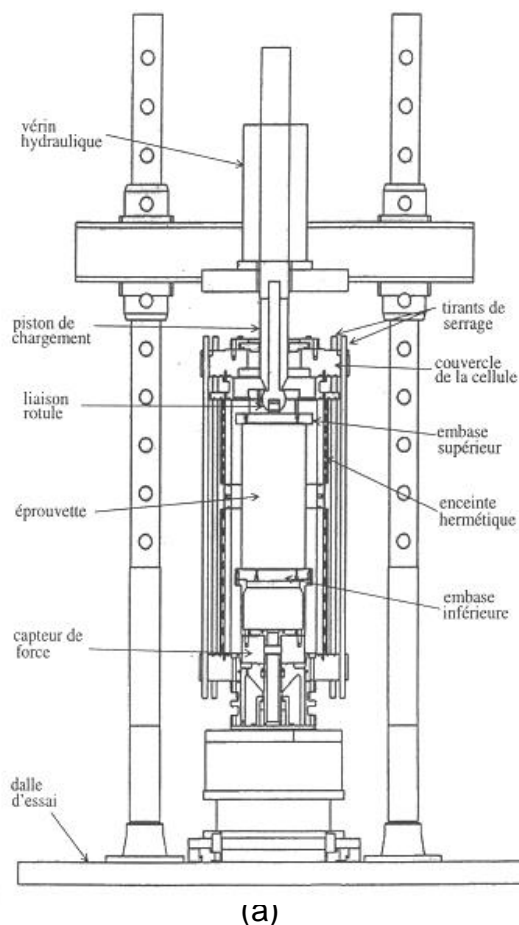
2.1 Dispositif d'essai

²Le dispositif d'essai utilisé est un dispositif triaxial permettant de cisailer des éprouvettes de 300 mm de diamètre et 600 mm de hauteur. La **figure 1.a** présente un schéma de principe de la cellule triaxiale équipée de son bâti de chargement. Les chargements verticaux sont appliqués à l'éprouvette grâce à un servovérin 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, 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 servovérin, 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 LVDT incorporé au servovérin 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 rentre 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.

La **figure 1.b** présente une vue d'ensemble du dispositif d'essai, y compris la cabine de contrôle et de pilotage.



(b)

Figure 1. (a) Schéma simplifié du dispositif d'essai ; (b) Vue d'ensemble du dispositif d'essai

2.2 Sols utilisés

Les sols utilisés sont des sols de références, 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 fraction volumique des inclusions, caractéristiques granulométriques des inclusions, indice de densité de la matrice, ...), le matériau pouvant être progressivement complexifié en rajoutant des coupures granulométriques, jusqu'à des particules fines (limon, argile, ...).

Le matériau est mis en œuvre, pour fabriquer l'éprouvette, par compactage de couches successives, après humidification du mélange et homogénéisation, ce qui permet d'obtenir une bonne répétabilité de fabrication. La **figure 2** présente des inclusions typiques utilisées **(a)**, ainsi que le mélange sable inclusions avant humidification **(b)**.



Figure 2. (a) Inclusions typiques utilisées ; (b) Mélange sable-inclusions avant humidification

3. Résultat typique, répétabilité

On présente dans cette partie un résultat d'essai typique obtenu sur un sol composé d'une matrice de sable de Fontainebleau à un indice de densité moyen de 0,70, et comportant une fraction volumique de 12% d'inclusions de taille comprise entre 10 et 20 mm, cisailé à partir d'une contrainte de consolidation de 100 kPa.

La **figure 3.a** montre la courbe de cisaillement obtenue. Elle présente la particularité de présenter un maximum de déviateur, correspondant à la rupture initiale du matériau, 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 initiale, suivie d'une importante phase de dilatance, dont le taux, initialement important, diminue progressivement avec la déformation.

La figure 3 montre donc 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 « modifié » par la présence des inclusions.

Il est important de tester la répétabilité de l'essai pour s'assurer, en particulier, que l'on a une bonne répétabilité de reconstitution du matériau, condition nécessaire pour pouvoir, ensuite, étudier l'influence de différents paramètres d'état sur les comportements observés.

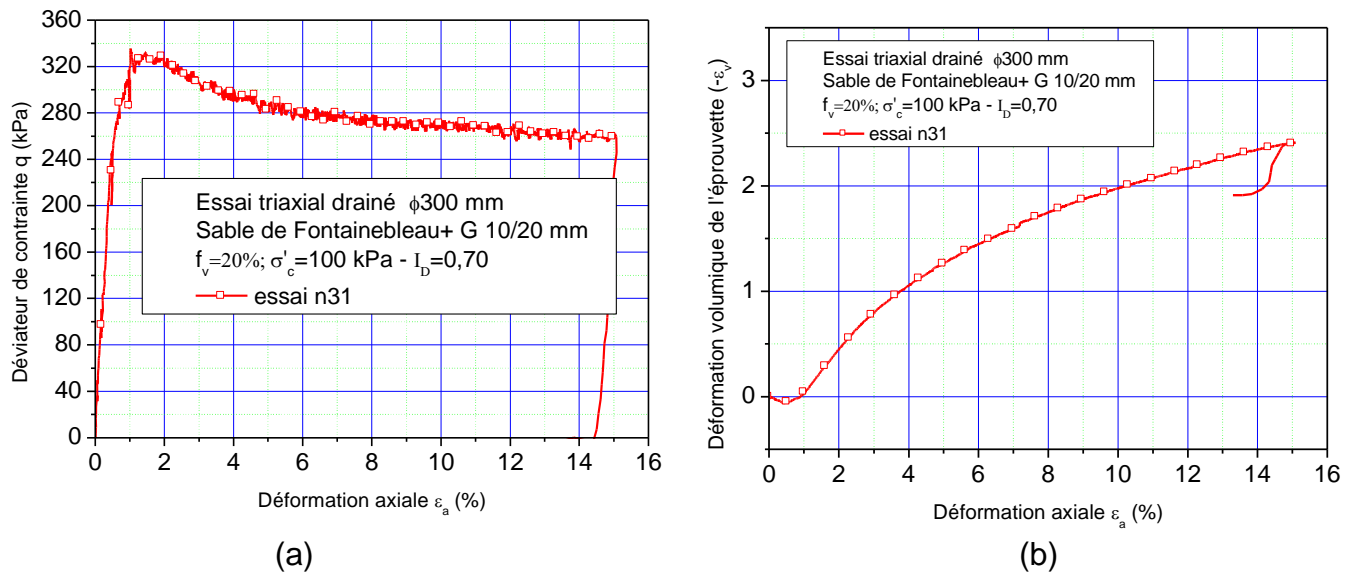


Figure 3 Résultat d'essai typique : (a) courbe de cisaillement ; (b) courbe de déformation volumique

La figure 4 présente une évaluation de la répétabilité de l'essai, réalisée pour un sol constitué d'une matrice à un indice de densité moyen de 0,70, et une fraction volumique de 20% d'inclusions de taille 10/20 mm. Trois essais de répétabilité ont été réalisés, permettant de mettre en évidence une bonne répétabilité de l'essai, validant ainsi l'ensemble de la procédure.

4. 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 f_v . La figure 5 présente les résultats obtenus en terme des courbes de cisaillement et des courbes de déformation volumique. Sur ces figures ont aussi été représentées les courbes correspondant à la matrice seule.

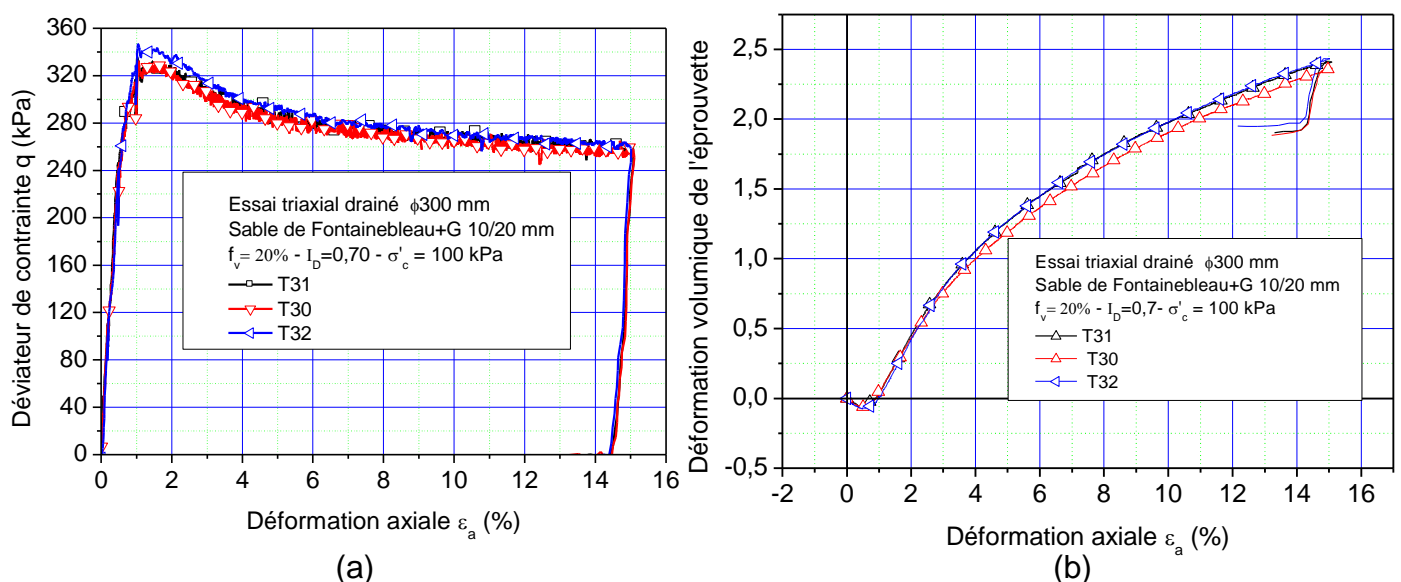


Figure 4 Essais de répétabilité pour une composition de mélange donnée

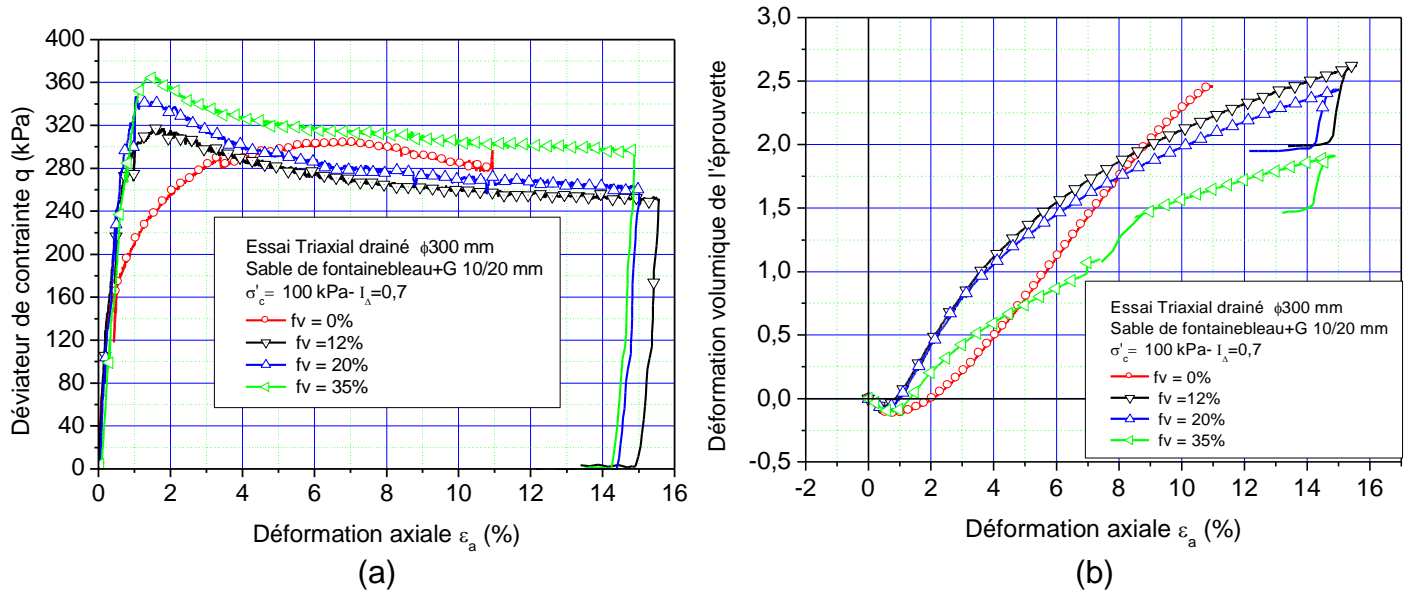


Figure 5 Influence de la fraction volumique des inclusions sur les comportements observés

En terme de résistance au cisaillement du matériau, la **figure 5.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 caractéristique mécanique du sol, en particulier en terme 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 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 du type « fragile » pour le sol composite, **le caractère fragile, avec un maximum de résistance obtenu pour une déformation faible (inférieure à 2% dans tous les cas) et 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, montrant que c'est alors essentiellement la matrice qui contrôle les mécanismes de déformation.

En termes de déformations volumiques, la réponse de la matrice seule se différencie sensiblement de celle des mélanges, avec une phase de 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 on a une courbe assez différenciée et moins régulière.

5. 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, $I_d \text{ mat} = 0,70$). Les résultats obtenus sont présentés sur la **figure 6** en termes des courbes de cisaillement (**Fig. 6.a**) et des courbes de déformation volumique (**Fig. 6.b**).

On met en particulier en évidence un point important à savoir que la taille des inclusions en tant que telle, n'a pas d'influence significative sur les comportements observés en termes de courbe de cisaillement (**Fig. 6.a**), les deux courbes obtenues étant très proches l'une de l'autre et se différenciant clairement de la matrice.

En termes de déformations volumiques (Fig. 6.b), les courbes sont très proches jusqu'à 3% environ de déformation axiale, puis se séparent avec un caractère dilatatant moins marqué dans le cas des plus grosses inclusions.

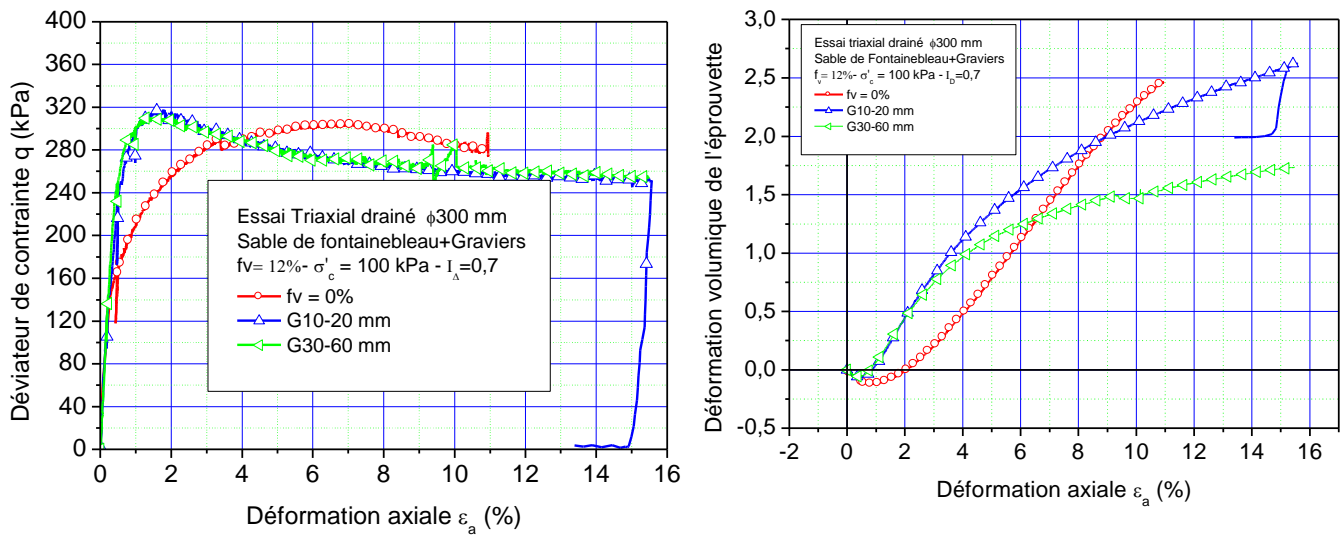


Figure 6

6. 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 phases inclusionnaires caractérisées par différents étalements granulométriques (8/10, 10/20, 30/60, 10/60, 4/60 mm), tous autres paramètres égaux par ailleurs ($f_v=20\%$, $\sigma'_c = 100$ kPa, $I_d=0,70$).

La **figure 7** montre les courbes de cisaillement correspondantes obtenues. On met clairement en évidence une diminution des caractéristiques mécaniques du matériau avec une augmentation de l'étalement granulométrique des inclusions. En particulier, en terme de résistance maximale mobilisable (q_{max}), on met en évidence, 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 plus marqué pour la granulométrie la plus étroite et un comportement plus « ductile » pour la granulométrie la plus étalée..

Compléter ...

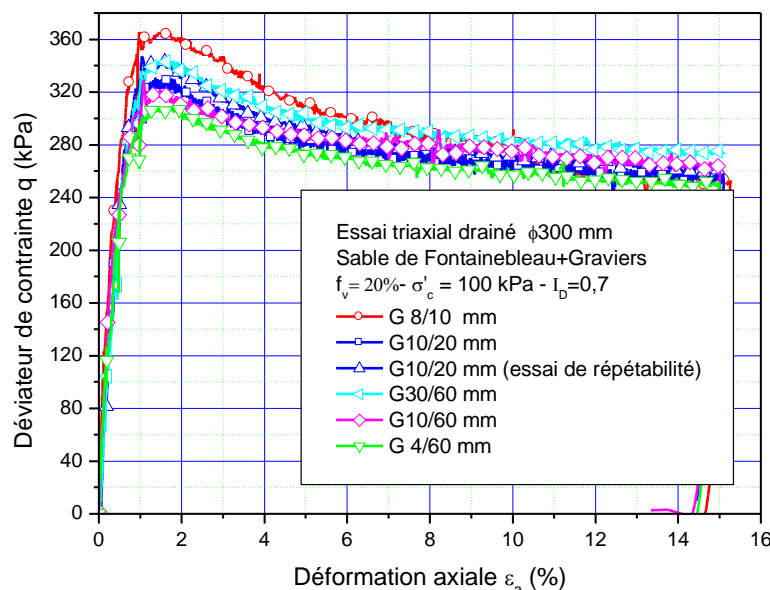


Figure 7

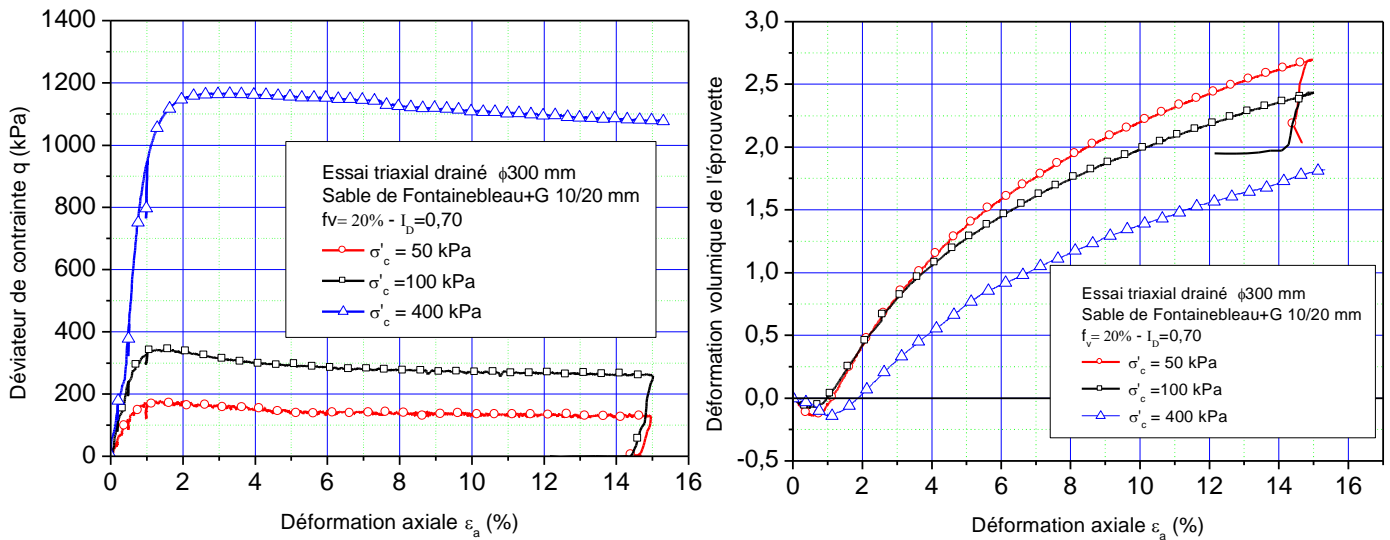


Figure 8

7. Influence de la contrainte de consolidation isotrope

En vue de mettre en évidence l'influence de la contrainte de consolidation isotrope σ'_c sur les résultats obtenus (**et d'évaluer le critère de rupture du matériau**), on a réalisé des essais pour des valeurs de σ'_c de 50, 100 et 400 kPa. La **figure 8** 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 terme des 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 modifiées par la présence des inclusions.

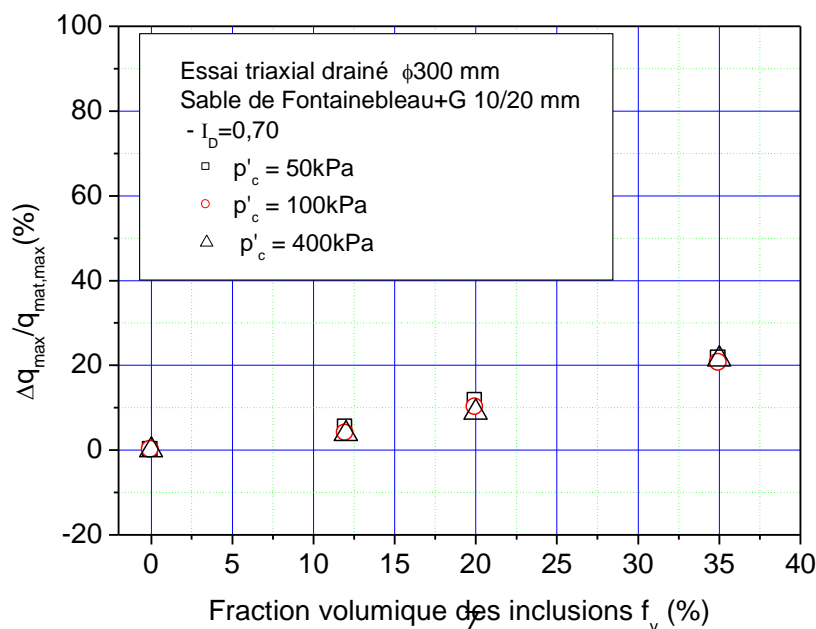


Figure 9

La **figure 9** présente l'accroissement relatif de résistance au cisaillement (valeur q_{max}) du mélange, normalisé par celle de la matrice seule, en fonction de la fraction volumique d'inclusions mises en œuvre, et paramétrée par la contrainte de consolidation. ON retrouve bien l'augmentation de résistance du mélange par rapport à la matrice, avec l'augmentation de la fraction volumique des inclusions. Par contre, cette augmentation relative ne dépend pas de la contrainte de consolidation, confirmant la proportionnalité des courbes de cisaillement par rapport à la contrainte de consolidation.

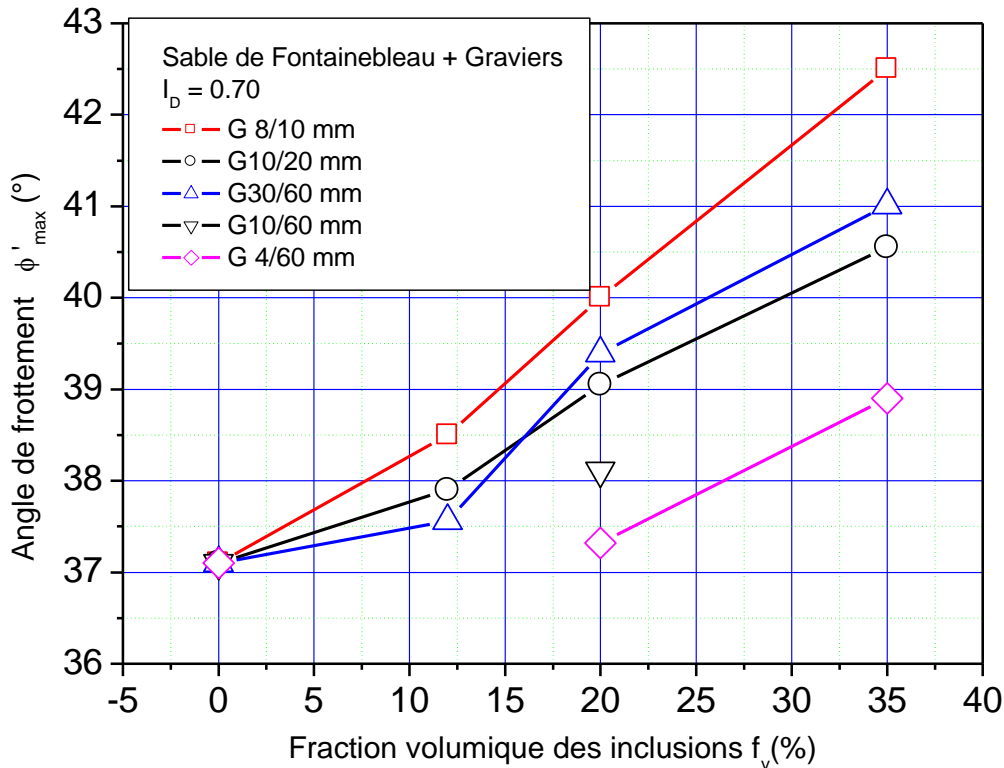


Figure 10

7. Critère de rupture – Angle de frottement interne

A 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 dans le plan de Mohr (τ , σ') ou le plan de Cambridge 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 terme 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.

Les valeurs d'angle de frottement interne évalué au pic de résistance (q_{max}) ont été reportées sur le graphe synthétique de la **figure 10**. Cette figure permet de retrouver/synthétiser, en terme d'angle de frottement interne, les influences des différents paramètres étudiés présentées dans les parties précédentes.

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 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° 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 des inclusions n'a pas d'influence significative sur la valeur de ϕ_{max} , les évolutions de ϕ_{max} pour les inclusions 10/20 mm et 30/60 mm étant très proches.

On retrouve finalement que l'étalement granulométrique de la phase inclusionnaire (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.

8. Conclusion

On a présenté 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 terme de rupture et de critère de rupture. 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 « complexifier » les sols étudiés pour se rapprocher des sols naturels en rajoutant différentes classes de 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 augmente 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