

# Comportement du sable d'Hostun sous faibles contraintes

L. LANCELOT  
I. SHAHROUR  
M. AL MAHMOUD

Laboratoire de Mécanique  
de Lille - CNRS URA 1441  
École Centrale  
de Lille  
59651 Villeneuve-d'Ascq  
Cedex

## Résumé

Les résultats obtenus pour le sable d'Hostun RF lâche et dense dans des essais triaxiaux avec des confinements compris entre 20 et 100 kPa sont présentés. En plus des essais classiques drainés et non drainés, des essais ont été effectués suivant des chemins en déformations proportionnelles. Les résultats de ces différents essais en contrainte-déformation peuvent servir de chemins de validation pour les modèles de comportement. Un essai particulier de détermination du critère de rupture confirme la non-linéarité de celui-ci dans le domaine des faibles contraintes. L'évolution de l'angle de frottement en fonction du confinement et de la pression moyenne à la rupture est comparée aux principales corrélations ainsi qu'aux résultats disponibles dans la littérature pour différents sables. L'effet du confinement - et de la densité initiale - sur le module de déformation initial et la dilatance est également présenté. Ces résultats montrent qu'il est important d'identifier les paramètres d'un modèle et de le valider dans le domaine de contraintes où ce modèle doit être utilisé.

## Behavior of Hostun sand for small stresses

## Abstract

Triaxial tests on loose and dense Hostun RF sand were carried out for confining pressures ranging between 20 and 100 kPa. Stress-strain curves are presented for drained, undrained and proportionnal strain path tests. They can be used as a tool to identify the constants of constitutive models, and test them on non-conventional paths. A one-test determination of the failure curve is also presented, which shows that the internal angle of friction is very much pressure-dependent in the low stress range. The variations of the angle of friction as a function of confining pressure and mean stress at failure are compared to usual correlations and results found in the literature for others sands. The variations of dilatancy angle and deformation modulus with confining pressure are also presented. These results show that constants of constitutive models should be identified, and models tested, for the range of stress in which models are to be used.

## Introduction

Le comportement des sols sous faibles contraintes est de grande importance pour le dimensionnement d'ouvrages à faible profondeur, ou pour l'étude de massifs de sols susceptibles d'être soumis à des chargements statiques ou cycliques ayant pour effet de diminuer les contraintes effectives. Plus généralement, l'étude des milieux granulaires sous faibles contraintes intéresse les industries chimiques et agroalimentaires qui sont confrontées à des problèmes de stockage et de transport de matériaux pulvérulents (Lancelot et Shahrour, 1994). Il est nécessaire d'identifier le comportement des matériaux granulaires sous faibles contraintes pour vérifier que les principes utilisés dans les modèles sont applicables, puis pour déterminer les paramètres de ces modèles dans cette gamme de contraintes.

Pour les sables, peu de résultats sont disponibles dans la littérature sur ce sujet. On peut citer les travaux de Ponce et Bell (1971), Stroud (1971), Fukushima et Tatsuoka (1984), Tatsuoka *et al.* (1986) et Kong *et al.* (1986).

L'étude présentée dans cet article vient compléter les travaux menés au sein du GRECO Géomatériaux sur le comportement du sable d'Hostun sous faibles contraintes (Lancelot *et al.*, 1993). Elle comporte des résultats d'essais triaxiaux de compression drainée et non drainée sur sable lâche et dense pour des niveaux de consolidation isotrope compris entre 20 et 100 kPa. On présente aussi des essais en déformations proportionnelles, pouvant servir comme base de validation de modèles de comportement. Certains essais particuliers (essais  $K_v$ , essai de détermination du critère de rupture) viennent apporter des informations complémentaires sur la rhéologie du matériau sous faibles contraintes. Le comportement en contrainte-déformation est donc analysé, puis on observe l'évolution de certaines propriétés du sable (module de déformation, angle de frottement interne, angle de dilatance) avec la pression de confinement.

## 2

## Dispositif expérimental

## 2.1

### Appareillage

Les essais ont été conduits sur des échantillons saturés, dans une cellule triaxiale classique, aménagée pour fonctionner dans une gamme de contraintes faibles: capteur de force interne à la cellule fonctionnant dans la gamme 0-250 daN, contrôle de la pression de confinement et de la contre-pression à l'aide de contrôleurs digitaux pression/volume GDS fonctionnant dans une gamme de pression 0-400 kPa.

Les échantillons étudiés ont 70 mm de diamètre et 70 mm de hauteur. Les embases des cellules utilisées sont élargies (85 mm de diamètre) et revêtues d'une feuille de téflon collée, sur laquelle on dispose une fine couche de graisse de silicone et une rondelle de latex de 0,2 mm d'épaisseur. Nous avons constaté que ce dispositif d'antifrettage permet une déformation homogène des échantillons pour des déformations axiales atteignant 15%. Au-delà, la déformation en tonneau de l'échantillon devient nettement perceptible.

Avec l'appareillage utilisé, on a théoriquement une précision de 0,65 kPa sur la mesure du déviateur et 0,5 kPa sur la pression de confinement et la contre-pression. Des manchettes en latex de 0,2 mm d'épaisseur (module d'élasticité 1,3 MPa) ont été utilisées pour les échantillons. Malgré leur faible épaisseur, la rigidité des manchettes entraîne une surcontrainte latérale, qui s'ajoute à la pression de confinement, et qu'il faut prendre en compte dans les essais à faibles contraintes (Lancelot et Shahrour, 1994). Les résultats donnés dans cet article sont corrigés de l'influence de la manchette sur le confinement. Par contre, l'effet de la pesanteur, qui sur une éprouvette de 70 mm de hauteur résulte en une différence d'environ 1 kPa sur le déviateur agissant en haut et en bas de l'échantillon, n'a pas été pris en compte dans les résultats présentés.

## 2.2

### Préparation des échantillons

Les échantillons sont préparés par pluvation à hauteur de chute quasi nulle. Pour les échantillons denses, on compacte à la main par couche de 1 à 2 cm à l'aide d'une dame.

L'échantillon est balayé par un courant de  $CO_2$  à très faible débit pendant une heure, puis par un courant d'eau désaérée également pendant une heure. On augmente alors progressivement et simultanément la pression de cellule et la contre-pression jusqu'aux valeurs voulues pour l'essai. Pour les essais présentés ici, on a utilisé une contre-pression de 300 à 350 kPa. Pour les échantillons ainsi obtenus, on a mesuré des valeurs du paramètre B de Skempton supérieures à 0,96.

## 3

## Matériau étudié

Le matériau étudié est le sable d'Hostun RF. C'est un sable moyen ( $D_{50} = 0,43$  mm) de granulométrie uniforme ( $C_u = 2,3$ ). Les valeurs des indices des vides minimales et maximales déterminées au laboratoire sont respectivement de 0,57 et 0,94, pour une valeur du poids spécifique des grains de 26,5 kN/m<sup>3</sup>. Ces valeurs sont assez proches de celles données par Flavigny *et al.* (1991):  $D_{50} = 0,35$  mm,  $C_u = 1,9$ ,  $e_{min} = 0,62$  et  $e_{max} = 0,96$ .

## 4

## Comportement en contraintes-déformations

## 4.1

### Essais drainés

On présente ici les résultats d'essais triaxiaux de compression drainés menés sur des échantillons lâches (indice de densité moyen  $I_D = 0,14$ ) et denses ( $I_D = 0,88$ ), pour des niveaux de consolidation isotrope de 20, 50 et 100 kPa. Les caractéristiques des essais drainés effectués sont rassemblées dans le tableau I (essais CID1 à CID6). Il faut noter que la variation de densité due à la

**TABEAU I** Caractéristiques des essais effectués.  
Characteristics of triaxial tests on Hostun RF sand.

Non de l'essai	Type d'essai	Consolidation (kPa)	Densité relative	Taux de déformation volumique imposé
CID1	Compression triaxiale drainée	20	0,11	-
CID2		50	0,16	-
CID3		100	0,16	-
CID4		20	0,89	-
CID5		50	0,86	-
CID6		100	0,89	-
CIU1	Compression triaxiale non drainée	20	0,03	0
CIU2		50	0,05	0
CIU3		20	0,86	0
CIU4		50	0,86	0
DP1	Déformations proportionnelles (taux de dilatance imposé)	20	0,02	-0,5
DP2		20	0,02	-0,2
DP3		20	0,02	0,2
DP4		20	0,02	0,5
OEDO1	Essai œdométrique	20	0,08	1
OEDO2	Essai œdométrique	20	0,87	1
SR1	Surface de rupture	200	0,12	-1

saturation est difficile à évaluer. On notera par ailleurs qu'il est plus difficile d'obtenir une densité initiale reproductible pour les échantillons de sable lâche ( $I_D$  moyen 0,07, écart-type 0,05 pour le sable lâche, contre 0,87 et 0,01 respectivement pour le sable dense).

On présente sur les figures 1 et 2 les courbes contraintes-déformations correspondant respectivement aux essais sur sables lâche et dense. On constate que, pour les essais sur sable lâche, il n'y a pas de pic de déviateur, alors que ce pic est marqué pour les essais sur sable dense. Ainsi, si on admet que le pic correspond à l'apparition d'une localisation des déformations dans l'échantillon, celle-ci intervient pour des déformations de l'ordre de 4 à 5 % pour le sable dense. S'il est connu qu'un dispositif d'antifretage efficace et un faible élanement des échantillons retardent et atténuent considérablement l'apparition du pic, il semble que celui-ci subsiste pour les sables denses (voir par exemple Colliat *et al.*, 1986 ; Biarez et Ziani, 1991).

Les courbes de variation d'indice des vides traduisent un comportement connu : la transition contractance/dilatance, la phase de dilatance augmentant avec la densité initiale à confinement constant et diminuant quand le confinement aug-

mente à densité initiale constante. La valeur de l'indice des vides ne tend pas à se stabiliser à 20 % de déformation axiale pour les essais sur sable lâche. Pour le sable dense, une diminution du taux de déformation volumique se dessine pour la courbe obtenue à 100 kPa, sans que l'état critique ou de plasticité parfaite soit atteint dans cette gamme de déformations. On remarque que cette stabilisation correspond à la phase post-pic en contraintes. La diminution du taux de dilatance peut correspondre à la localisation des déformations dans des bandes de cisaillement, à l'intérieur desquelles le matériau tend vers l'état critique. Avec les moyens conventionnels utilisés ici, on mesure un indice des vides moyen dans l'échantillon, ainsi les résultats dans le plan indice des vides - pression moyenne ne permettent pas d'identifier la ligne d'état critique.

Enfin, les résultats dans le plan déviateur - pression moyenne fournissent des indications sur la courbe de rupture. Il apparaît que celle-ci n'est pas une droite dans la gamme de contraintes étudiée. Ce point sera développé dans les paragraphes suivants. Si on trace cependant une droite moyenne de rupture, on obtient des angles de frottement moyens de 37° et 44° respectivement pour les sables lâche et dense.

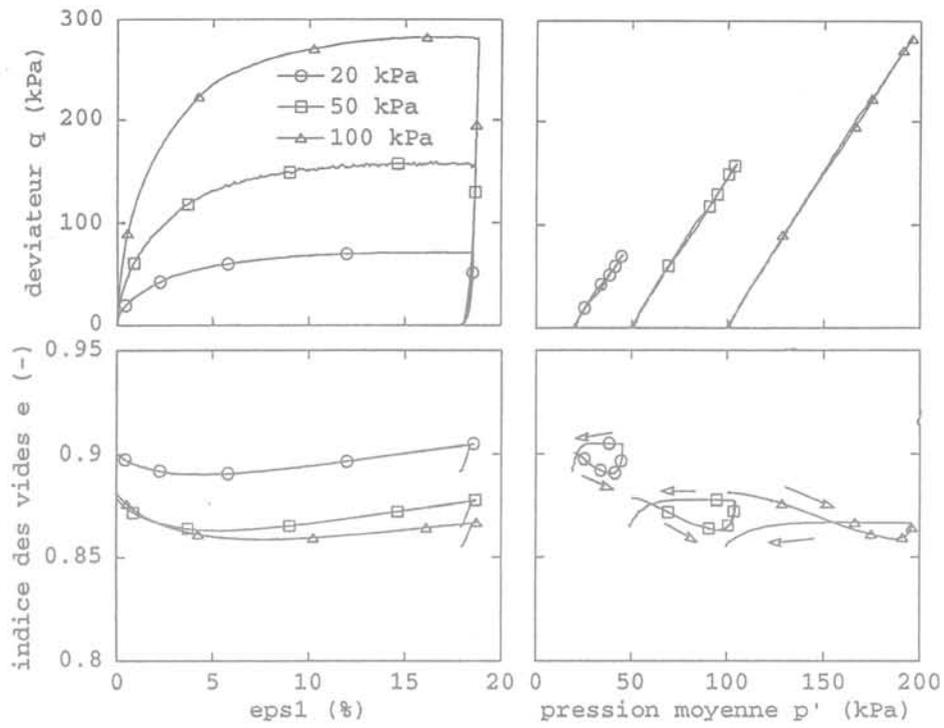


FIG. 1 Essais triaxiaux drainés sur sable de Hostun RF lâche : effet du confinement.  
Stress-strain curves for drained triaxial tests on loose Hostun RF sand.

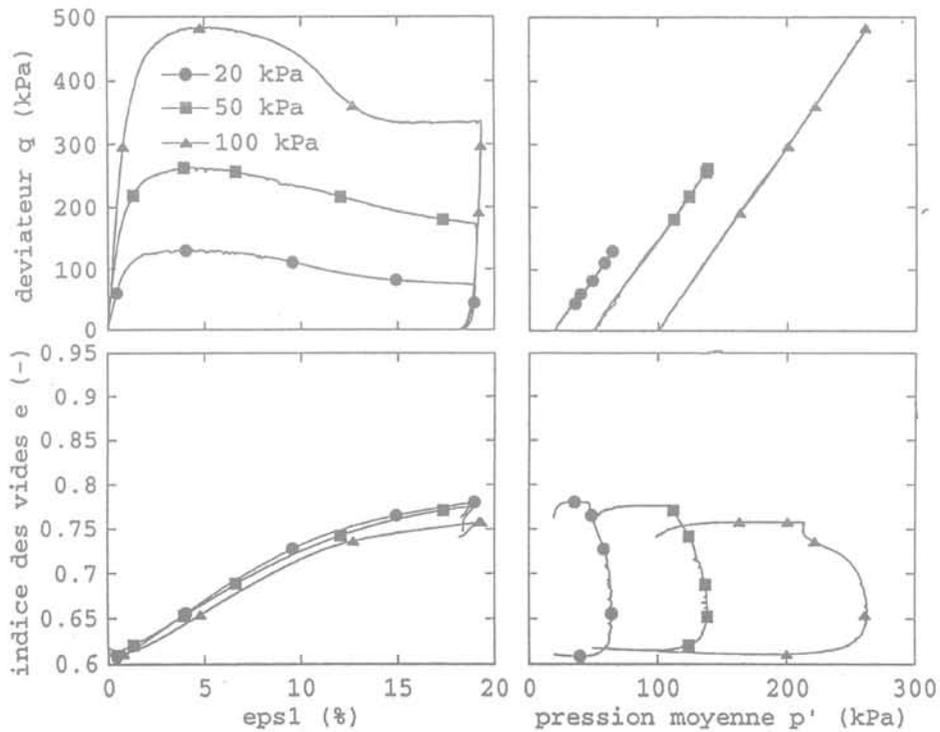


FIG. 2 Essais triaxiaux drainés sur sable de Hostun RF dense : effet du confinement.  
Stress-strain curves for drained triaxial tests on dense Hostun RF sand.

## Essais non drainés

Des essais triaxiaux de compression non drainée ont été menés sur des échantillons lâches et denses pour des niveaux de consolidation isotrope de 20 et 50 kPa (essais CIU1 à CIU 4, tableau I).

On présente sur les figures 3 et 4 les courbes contraintes-déformations correspondant respectivement aux essais sur sable lâche et dense. Les essais sur sable lâche se caractérisent par une augmentation importante et rapide de la pression interstitielle en début d'essai, puis une diminution progressive de celle-ci. Il n'y a pas de tendance à la stabilisation de la pression interstitielle dans la gamme de déformations étu-

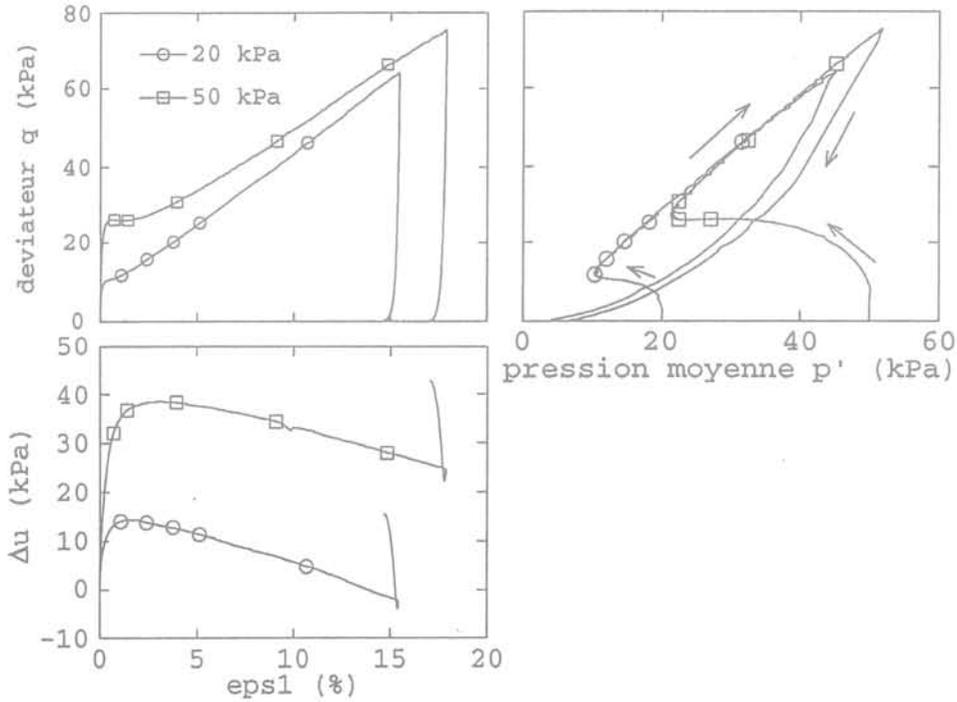


FIG. 3 Essais triaxiaux non drainés sur sable de Hostun RF lâche : effet du confinement.  
Stress-strain curves for undrained triaxial tests on loose Hostun RF sand.

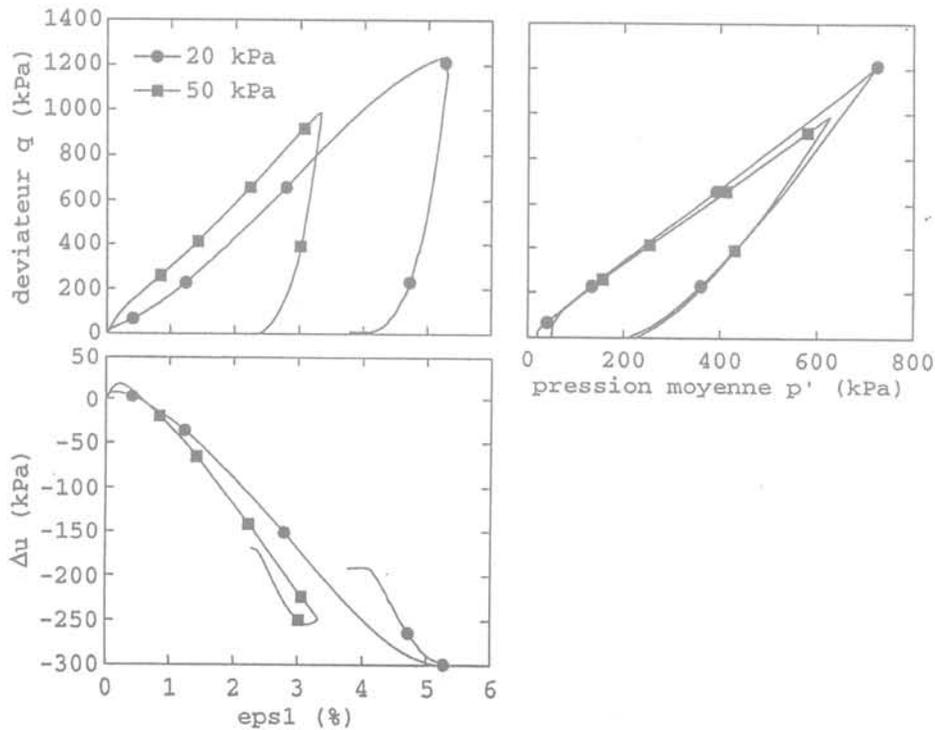


FIG. 4 Essais triaxiaux non drainés sur sable de Hostun RF dense : effet du confinement.  
Stress-strain curves for undrained triaxial tests on dense Hostun RF sand.

## Essais en déformations proportionnelles

Ces essais permettent de suivre la réponse d'un échantillon à une sollicitation triaxiale pour laquelle on impose un taux de déformation volumique par rapport

à la déformation axiale  $\epsilon_1, \zeta = \frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_1}$  constant (Chu *et al.*,

1992). Il faut noter que les essais non drainés sont un cas particulier avec  $\zeta = 0$ .

D'une manière générale, ils apportent des informations sur le comportement rhéologique des matériaux et peuvent servir à valider des modèles de comportement sur des chemins de sollicitation non conventionnels.

### 4.3.1

#### Aspects généraux des essais en déformations proportionnelles

On présente dans la figure 5 les résultats des essais sur sable lâche, pour une pression de consolidation isotrope de 20 kPa (essais DP1 à DP4 du tableau I). On constate que, si on impose un taux de déformation volumique  $\zeta$  négatif (figure 5a), on génère des surpressions interstitielles, donc on provoque une diminution de la pression moyenne effective : on peut ainsi créer un chemin de sollicitation pour lequel l'échantillon reste contractant et donc atteint la liquéfaction statique, observée seulement pour des échantillons très lâches en conditions non drainées. A l'inverse, un taux de déformation volumique  $\zeta$  positif (figure 5b), entraîne une augmentation de la pression moyenne effective et un accroissement du déviateur. On vérifie bien que, plus le taux de déformation volumique imposé est grand, plus l'échantillon s'approche d'un état isotrope.

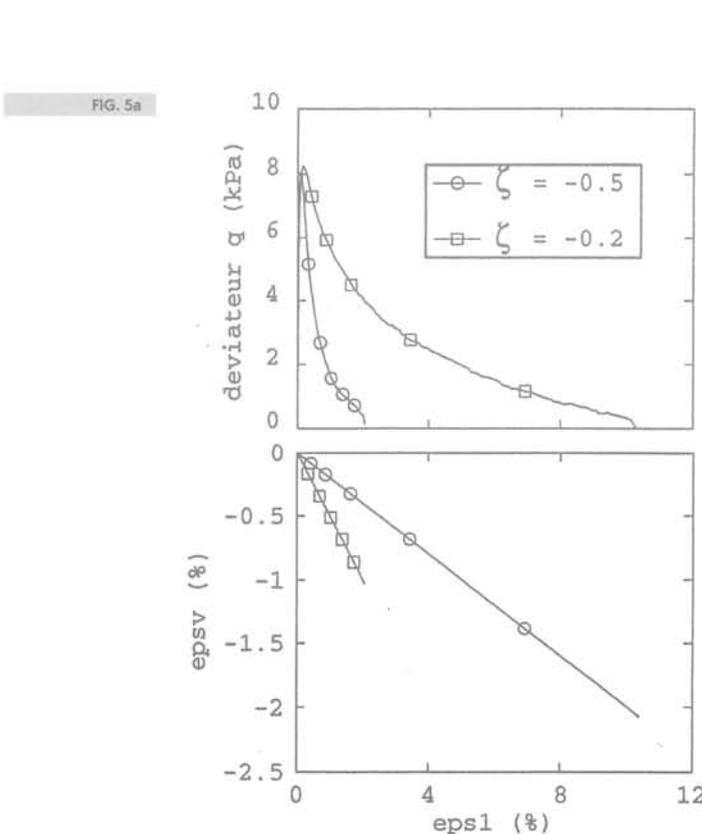


FIG. 5b

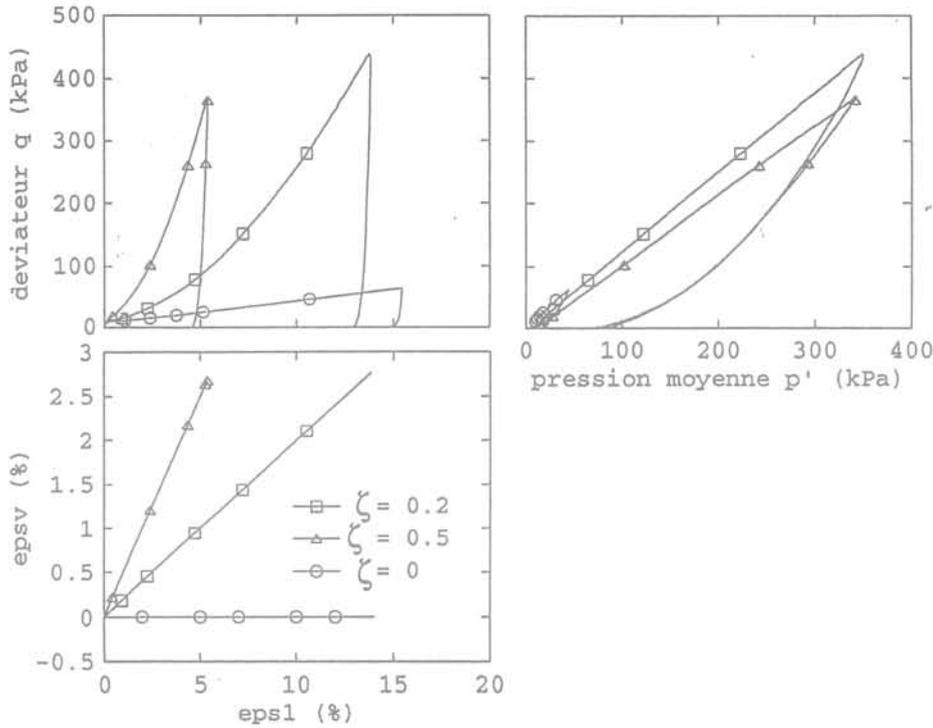


FIG. 5 Essais triaxiaux en déformations proportionnelles sur sable de Hostun RF lâche (confinement 20 kPa): effet du taux de dilatance imposé.  
Stress-strain curves for strain path triaxial tests on Hostun RF sand (confining pressure: 20 kPa).

Pour  $\zeta$  positif, on note qu'on quitte rapidement le domaine des faibles contraintes.

Il faut noter que, selon Lo et Chu (1993), la valeur de  $\zeta$  marquant la transition entre les deux types de comportement représente le taux de déformation volumique à la rupture mesuré dans un essai drainé avec le même indice des vides initial et le même niveau de consolidation isotrope (soit ici - 0,06, valeur proche de 0 correspondant à l'essai non drainé).

L'essai œdométrique est un essai en déformations proportionnelles particulier. En effet, la déformation radiale de l'échantillon reste nulle : on impose donc

$\zeta = 1$ . On présente sur la figure 6 les résultats obtenus pour des échantillons lâche et dense (essais OEDO1 et OEDO2, tableau I). Étant donné la valeur positive de  $\zeta$  correspondant à cet essai, on constate que les contraintes augmentent très rapidement. La valeur du rapport des contraintes  $\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$  se stabilise pour le sable

dense à une valeur  $K_0 = 0,38$  à partir d'une déformation axiale de l'ordre de 1 %, valeur pour laquelle  $\sigma'_3$  dépasse 200 kPa. Il ne s'agit donc pas d'essais sous faibles contraintes. Pour le sable lâche,  $K_0$  tend vers une valeur proche de 0,5.

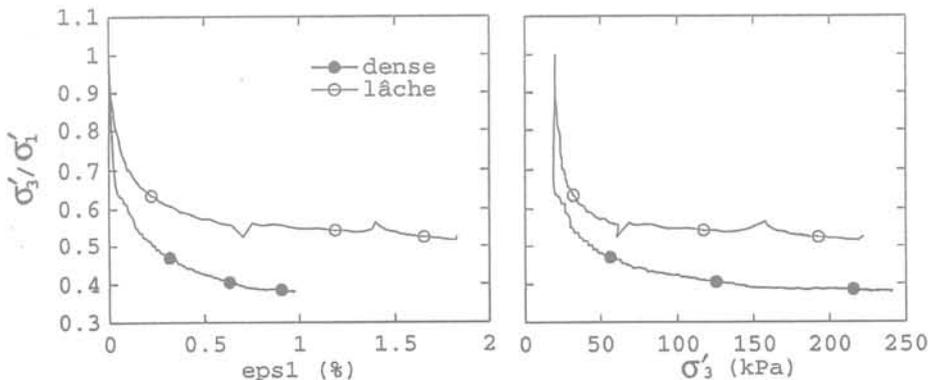


FIG. 6 Essais œdométriques sur sable de Hostun RF : effet de la densité initiale.  
Stress-strain curves for oedometric tests on Hostun RF sand.

### Essai de détermination du critère de rupture

Le principe de cet essai a été proposé par Lo et Chu (1993). Il consiste à réaliser un chargement triaxial drainé sur un échantillon jusqu'à atteindre un état de contrainte voisin de la rupture (déviateur  $q$  proche du maximum). A partir de ce point, on continue à charger l'échantillon en imposant un taux de déformation volumique  $\zeta$ , plus dilatant que celui du matériau à la rupture  $\zeta_r$ .

On génère ainsi des surpressions interstitielles et la pression moyenne effective  $p'$  diminue. Le point représentatif de l'état de contrainte dans le plan déviateur – pression moyenne effective rejoint alors la courbe de rupture et se maintient sur celle-ci, puisqu'on continue de soumettre l'échantillon à un chargement plastique.

On a ainsi un moyen de déterminer la surface de rupture en un seul essai. Cet essai ne peut pas être interprété correctement si des hétérogénéités se développent dans l'échantillon, ce qui ne semble pas se produire pour le matériau lâche (essai SR1, fig. 7). Par ailleurs, le taux de déformation volumique imposé  $\zeta$ , doit prendre une valeur nettement inférieure à  $\zeta_r$  : ainsi pour l'essai SR1 (Fig. 7), la valeur de  $\zeta$  est de -1. Pour un essai sur sable dense, la valeur de  $\zeta$  doit être plus fortement négative encore, ce qui entraîne une variation rapide de l'état de contrainte et des difficultés pour les contrôleurs digitaux pression-volume pour suivre cette variation, à moins d'adopter une vitesse d'essai extrêmement réduite.

Sur la figure 7, nous avons également représenté le chemin de contrainte dans le plan  $q$ - $p'$  des essais drainés à même densité initiale ( $I_D = 0,14$ ) : la courbe de rupture déterminée par l'essai en déformations proportionnelles passe bien par les points représentatifs de la

rupture dans les trois essais drainés effectués (la rupture pour les essais drainés sur sable lâche étant définie, en l'absence de pic, comme étant le déviateur maximal atteint en fin d'essai, soit environ pour 18 % de déformation axiale). Cet essai semble donc un bon moyen de déterminer rapidement le critère de rupture d'un matériau, sous réserve que l'échantillon reste homogène au cours de l'essai, ce qui impose un élanement faible de l'échantillon et un très bon dispositif d'antifrettage (Lo et Chu, 1993).

## 5

## Analyse des propriétés élastoplastiques de base

## 5.1

### Module de déformation

Pour les sols, il est connu que le module de déformation initial  $E_0$  dépend de la pression de confinement. La loi habituellement utilisée, proposée par Janbu (1963), est de la forme :

$$E = E_{ref} \left( \frac{\sigma_3}{p_{ref}} \right)^n \quad (1)$$

La valeur de la pression de référence est souvent prise égale à la pression atmosphérique ( $P_{ref} = 100$  kPa). La valeur de  $n$  est comprise entre 0,33 et 1. En l'absence de données expérimentales, une valeur de 0,5 est souvent adoptée.

Pour déterminer le module de déformation initial à partir de nos essais, nous avons tracé l'évolution du

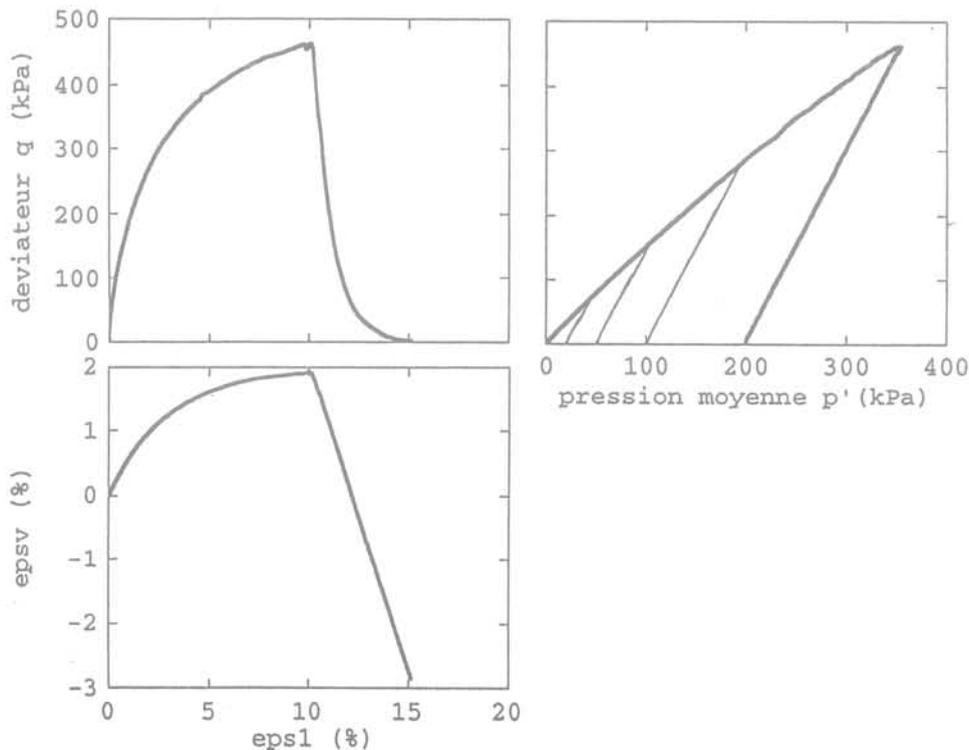


FIG. 7 Essai de détermination du critère de rupture sur sable de Hostun RF lâche. One-test determination of failure curve on loose Hostun RF sand.

## Angle de frottement interne

module sécant en fonction de la déformation axiale pour les deux densités et les trois confinements utilisés (Fig. 8). Ce module semble indépendant de la déformation pour de très faibles valeurs de celle-ci, avec cependant d'importantes fluctuations. Ces fluctuations montrent les limitations de l'appareillage utilisé dans la détermination des propriétés élastiques du matériau. Devant cet état de fait, il a été décidé de considérer le module sécant à 0,1 % de déformation axiale. C'est l'évolution de ce module en fonction de la pression de confinement qui est représentée sur la figure 9.

Les paramètres  $E_{ref}$  et  $n$  de la relation de Janbu sont déterminés par les moindres carrés : on obtient pour  $E_{ref}$  des valeurs de 31,7 MPa et 62,6 MPa, et pour  $n$  des valeurs de 0,76 et 0,68, pour le sable lâche et dense respectivement.

Il apparaît donc que pour la plage de contraintes étudiée ici la valeur de  $n$  s'écarte significativement de la valeur de 0,5 (en particulier pour le sable lâche).

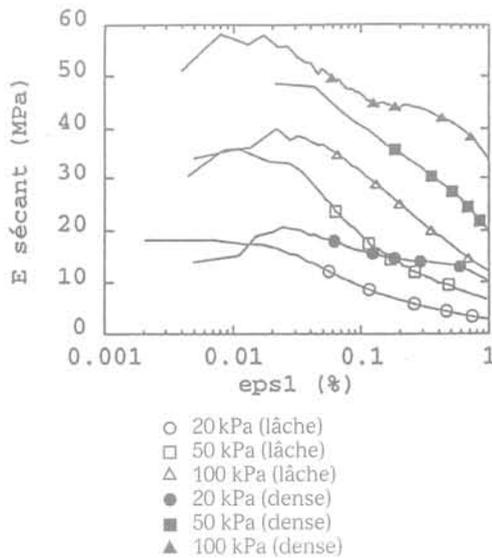


FIG. 8. Module de déformation sécant déterminé sur les essais drainés en fonction de la déformation axiale.

Secant modulus of deformation as a function of axial strain for Hostun RF sand.

La courbe de rupture dans le plan  $p'$ - $q$  obtenue dans la gamme de contraintes étudiée n'étant pas linéaire (voir Figure 1 et 2), ceci indique une variation de l'angle de frottement à la rupture avec la pression moyenne.

On a reporté sur la figure 10 l'évolution de l'angle de frottement à la rupture avec la pression de confinement, on constate une décroissance sensible et régulière de  $\phi'_{max}$  entre 20 et 100 kPa. Si on considère également les résultats obtenus pour le sable d'Hostun à l'Institut de Mécanique de Grenoble par Flavigny (communication personnelle aux membres du GRECO) pour des confinements compris entre 100 et 600 kPa (Fig.11), on constate une décroissance continue entre 20 et 600 kPa, cette décroissance étant plus prononcée pour les faibles confinements.

Pourtant, s'il est généralement admis que l'angle de frottement  $\phi'_{max}$  décroît quand le niveau de contrainte augmente, dans les études publiées dans la littérature sur le comportement des sables sous faible confinement, il apparaît des divergences quant à cette variation (Fig. 10). Ponce et Bell (1971) rapportent une forte

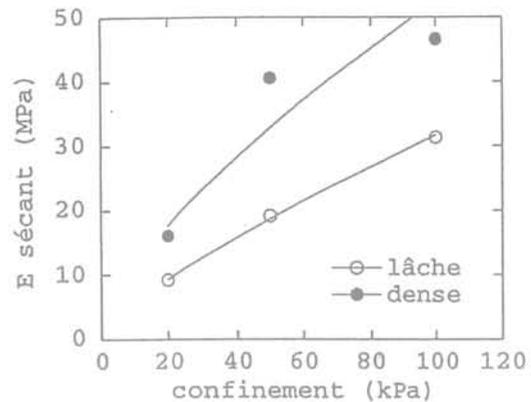


FIG. 9. Module de déformation sécant en fonction de la pression de confinement : effet de la densité initiale.

Secant modulus of deformation as a function of confining pressure for Hostun RF sand.

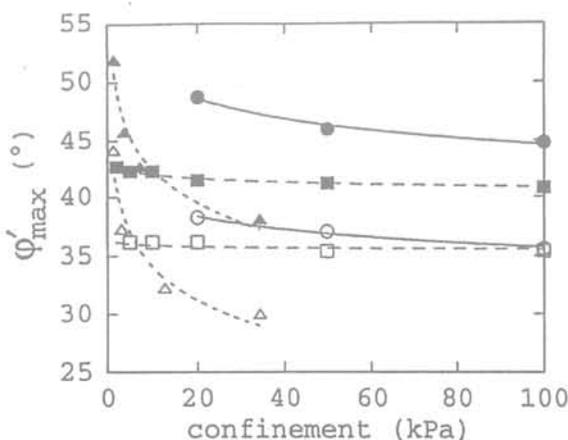


FIG. 10. Évolution de l'angle de frottement interne en fonction du confinement pour différents sables : faibles confinements.

Internal angle of friction as a function of confining pressure for various sands (low pressures).

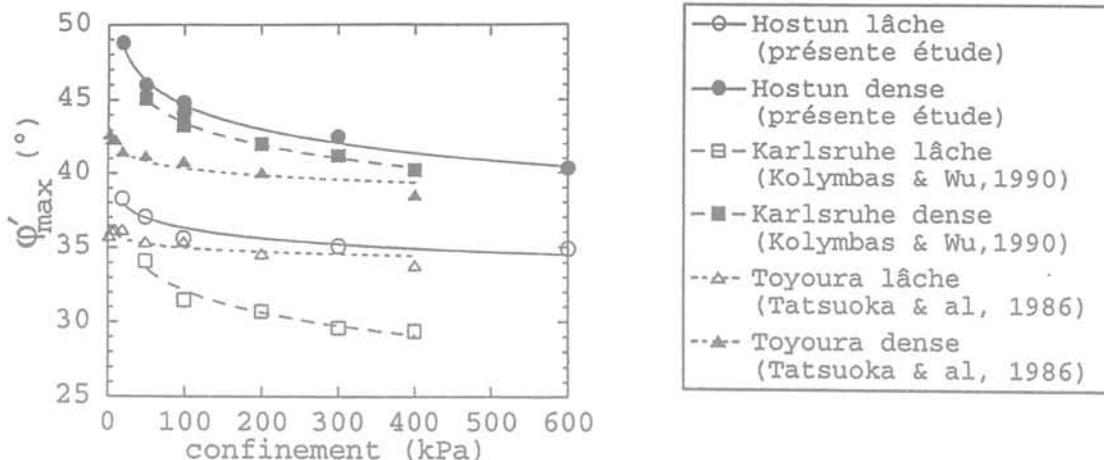


FIG. 11 Évolution de l'angle de frottement interne en fonction du confinement pour différents sables.  
Internal angle of friction as a function of confining pressure for various sands.

augmentation de  $\varphi'_{\max}$  quand le confinement diminue à partir d'une valeur de 20 kPa environ. Il est relativement constant pour des valeurs plus élevées du confinement. Il faut noter que ces auteurs utilisent des échantillons non antifrettés. En revanche, Fukushima et Tatsuoka (1984), sur échantillons antifrettés, trouvent globalement une dépendance beaucoup plus faible pour le sable de Toyoura, voire nulle pour des confinements inférieurs à 20 kPa. On constate une dispersion importante pour les très faibles confinements. La comparaison entre les résultats obtenus par les différents auteurs ne peut évidemment être que qualitative puisque les sables étudiés et les techniques expérimentales sont différents. Pour des confinements plus élevés (50 à 400 kPa), Kolymbas et Wu (1990) obtiennent une décroissance de l'angle de frottement avec le confinement pour le sable de Karlsruhe (Fig. 11) comparable à celle observée pour le sable d'Hostun, et une évolution similaire pour d'autres matériaux granulaires.

Nous avons représenté sur la figure 12 l'évolution de l'angle de frottement  $\varphi'_{\max}$  avec la pression moyenne effective à la rupture dans les essais drainés sur le sable d'Hostun lâche et dense (nos essais CID 1 à CID 6). La courbe  $\varphi'_{\max} - p'$  obtenue à partir de l'essai SR1 a également été reporté sur la figure 12. On constate une bonne concordance de cet essai avec les essais drainés sur sable lâche en terme d'angle de frottement au pic.

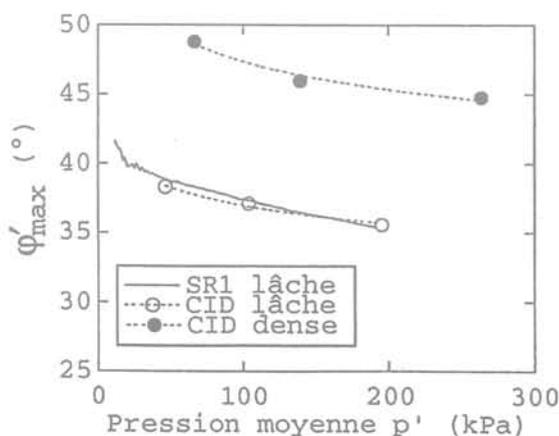


FIG. 12 Évolution de l'angle de frottement interne en fonction de la pression moyenne à la rupture pour le sable d'Hostun.  
Internal angle of friction as a function of mean stress at failure for Hostun RF sand.

Des corrélations ont été proposées par certains auteurs pour reproduire l'évolution de  $\varphi'_{\max}$  en fonction de  $p'$ . Ainsi une relation hyperbolique à trois paramètres a été proposée par Maksimovic (1989):

$$\varphi'_{\max} = \varphi_B + \frac{\Delta\varphi}{1 + \frac{p'}{p_N}} \quad (2)$$

Les paramètres  $\varphi_B$ ,  $\Delta\varphi$  et  $p_N$  ont été déterminés à partir des essais de la figure 12. On a obtenu respectivement 31,9°, 9° et 200 kPa pour le sable lâche 41,5°, 14° et 75 kPa pour le sable dense.

### 5.3

## Dilatance

On définit l'angle de distance  $\psi_{\max}$  dans les essais triaxiaux drainés par la relation:

$$\operatorname{tg} \psi_{\max} = \left( -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \varepsilon_1} \right)_{\max} \quad (3)$$

On a tracé sur la figure 13 l'évolution de  $\psi_{\max}$  avec la pression de confinement pour les essais drainés sur sable lâche et dense. On constate que  $\psi_{\max}$  est faible pour le sable d'Hostun lâche (de l'ordre de 3 à 4°), et qu'il dépend peu du confinement. En effet, nous avons également représenté sur la même figure les essais obtenus par Flavigny sur le sable d'Hostun entre 100 et 600 kPa.  $\psi_{\max}$  reste compris entre 2 et 4° pour une plage de confinements de 20 à 600 kPa. Pour le sable dense, la dilatance est beaucoup plus forte et sa dépendance avec le confinement plus marquée. L'évolution paraît continue entre 20 et 600 kPa avec, comme pour  $\varphi'_{\max}$ , une décroissance plus forte pour les faibles contraintes. Pour le sable d'Hostun dense,  $\psi_{\max}$  varie donc de 43° pour 20 kPa à 24° pour 600 kPa. Les résultats obtenus par Fukushima et Tatsuoka (1984) sur le sable de Toyoura et par Kolymbas et Wu (1990) sur le sable de Karlsruhe sont également représentés pour comparaison. Les tendances observées sont identiques. On remarque une dispersion notable pour les très faibles confinements pour le sable de Toyoura. Il faut noter que ces résultats ont été obtenus par Fukushima et Tatsuoka (1984) pour des indices des vides initiaux assez dispersés.

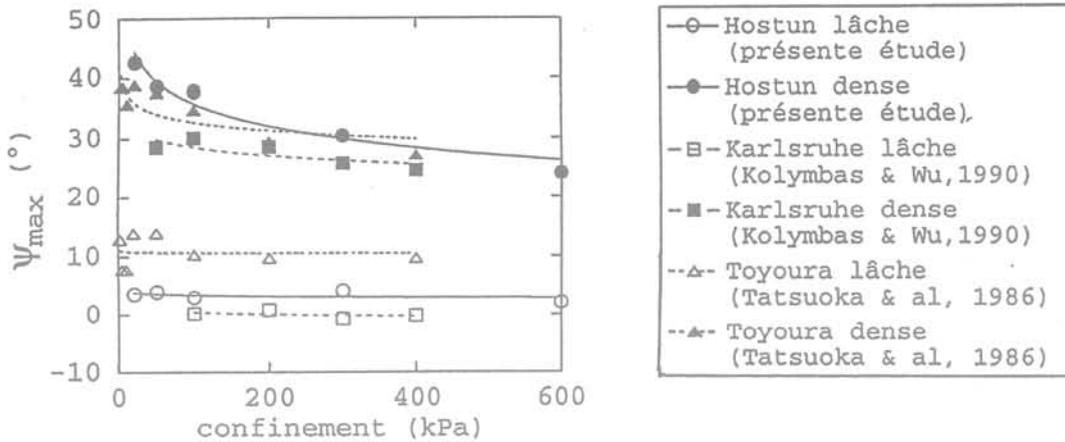


FIG. 13 Évolution de l'angle de dilatance en fonction du confinement pour différents sables.  
Angle of dilatancy as a function of confining pressure for various sands.

Bolton (1986) a proposé pour les sables la corrélation suivante entre  $\psi_{\max}$ , la densité initiale du matériau  $I_D$  et la pression moyenne effective à la rupture  $p'$ :

$$\operatorname{tg} \psi_{\max} = \left( -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \varepsilon_1} \right)_{\max} = 0.3(I_D(10 - \ln p') - 1) \quad (4)$$

Pour le sable dense, nos résultats correspondent à la relation suivante pour  $\psi_{\max}$ , qui est très proche de la relation (4) proposée par Bolton:

$$\operatorname{tg}(\psi_{\max}) = 0,27(I_D(10 - \ln p') - 0,78) \quad (5)$$

Par contre, cette corrélation ne permet pas de reproduire les résultats que nous avons obtenus pour le sable lâche.

#### 5.4

### État critique

Nous avons représenté en figure 14 l'ensemble des essais présentés dans cette étude dans le plan indice des vides - pression moyenne. Il apparaît que l'état de plasticité parfaite n'est pas atteint dans nos essais, où la pression moyenne ou l'indice des vides évolue toujours en fin d'essai.

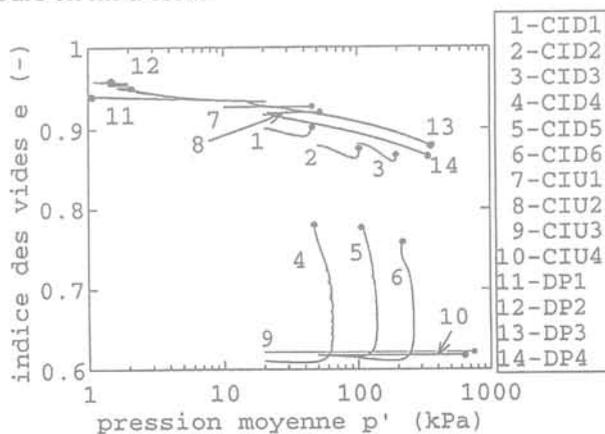


FIG. 14 Récapitulatif des chemins suivis et de l'état de contrainte-déformation en fin d'essai pour les essais effectués dans cette étude.  
Summary of stress-strain paths and end points for different tests on Hoston RF sand.

On peut cependant déterminer l'angle de frottement critique comme étant l'angle de frottement à la rupture correspondant à un taux de dilatance nul. Nous avons tracé sur la figure 15 l'évolution de  $\phi'_{\max}$  avec  $\operatorname{tg}(\psi_{\max})$  pour nos essais drainés sur sable lâche et dense, auxquels nous avons adjoint les essais de Flavigny, effectués pour des confinements plus élevés. On constate que les points obtenus sont correctement alignés. On remarquera que pour tous les essais drainés dont nous disposons, la valeur de la dilatance à la rupture, bien que faible pour le sable lâche, est toujours positive, et la valeur de  $\phi'_{cv}$  obtenue doit résulter d'une extrapolation de  $\phi'_{\max}$  pour un taux de dilatance nul. Pour affiner la détermination de  $\phi'_{cv}$ , nous avons reporté sur la figure 15 les points obtenus pour les essais en déformations proportionnelles correspondant à  $\xi$  positif ou nul, c'est-à-dire à un taux de dilatance imposé négatif ou nul. Ces points s'alignent correctement avec ceux correspondant aux essais drainés. La droite moyenne de la figure 15 a été construite sur les valeurs obtenues sous faible confinement. La valeur de  $\phi'_{cv}$  obtenue est de  $35,2^\circ$ . Si on prend en compte les essais de Flavigny on obtient une valeur, légèrement plus faible, de  $34,9^\circ$ . Ces valeurs sont conformes à celles généralement admises pour le sable d'Hostun.

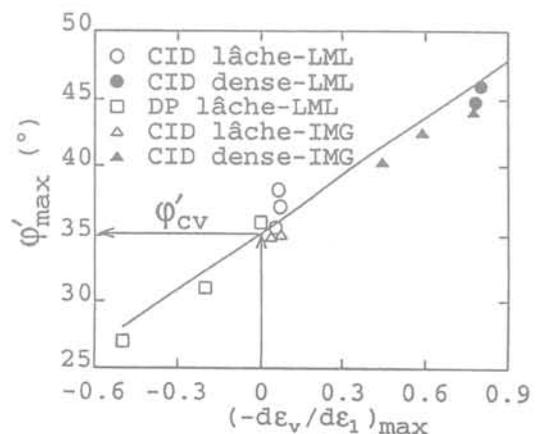


FIG. 15 Détermination de l'angle de frottement critique pour le sable d'Hostun.  
Determination of critical state angle of friction for Hoston RF sand.

Connaissant  $\varphi'_{cv}$ , Bolton (1986) a proposé une corrélation entre l'angle de frottement à la rupture  $\varphi'_{max}$  obtenu au cours d'un essai triaxial, la densité initiale du matériau  $I_D$  et la pression moyenne effective à la rupture  $p'$  :

$$\varphi'_{max} - \varphi'_{cv} = 3 (I_D (10 - \ln p') - 1) \quad (6)$$

Pour le sable d'Hostun dense ( $I_D = 0,88$ ) en faibles confinements, la relation proposée par Bolton reste pratiquement valable, puisqu'on obtient à partir de nos essais :

$$\varphi'_{max} - \varphi'_{cv} = 2,89 (I_D (10 - \ln p') - 1) \quad (7)$$

En revanche, la corrélation proposée par Bolton ne permet pas de reproduire les résultats obtenus pour  $\varphi'_{max}$  avec le sable lâche. Il faut noter que pour le sable lâche la détermination de  $\varphi'_{max}$  et  $\psi_{max}$  est plus difficile.

6

## Conclusion

Dans cet article, une étude sur le comportement du sable d'Hostun RF pour des confinements variant de 20 à 100 kPa a été présentée. En plus des essais classiques drainés et non drainés pour le sable lâche et dense, pouvant servir à la détermination des paramètres de modèles rhéologiques dans cette plage de contraintes, des essais en déformations proportionnelles ont été effectués, qui peuvent servir à la validation de ces modèles. Par ailleurs, un essai spécial dit de détermination du critère de rupture a permis l'identification de ce critère pour des pressions moyennes allant de 20 kPa à 200 kPa. La nature non linéaire de la courbe de rupture obtenue met en évidence une variation de l'angle de frottement avec la pression moyenne, importante pour les faibles confinements.

Une étude des évolutions de l'angle de frottement  $\varphi'_{max}$  et de l'angle de dilatance  $\psi_{max}$  en fonction du confinement est présentée pour le sable d'Hostun. On les compare aux évolutions obtenues, d'une part sur le sable d'Hostun pour des confinements supérieurs à

100 kPa, et d'autre part sur d'autres sables pour des confinements variant de 2 kPa à 400 kPa. Les résultats publiés pour les variations de l'angle de frottement pour de très faibles confinements (inférieurs à 20 kPa) montrent de grandes divergences. Les résultats concernant la dilatance pour des confinements inférieurs à 20 kPa sont également caractérisés par une dispersion importante. En revanche, pour des confinements supérieurs à 20 kPa, l'évolution de  $\varphi'_{max}$  et  $\psi_{max}$  est qualitativement la même pour tous les sables :  $\varphi'_{max}$  décroît quand le confinement augmente (d'autant plus que la densité initiale est élevée), cette décroissance pouvant être modélisée suivant la relation hyperbolique proposée par Maksimovic (1989), ou par les corrélations proposées par Bolton (1986).  $\psi_{max}$  est faible et pratiquement insensible à l'évolution du confinement pour les sables lâches. Pour les sables denses, en revanche, on note une diminution notable de la dilatance quand le confinement augmente, ce qui est conforme à ce qui est généralement observé et à ce qu'a formalisé Rowe (1962) dans sa théorie de la dilatance. Les corrélations de Bolton (1986) sont applicables au sable dense.

Pour le module de déformation initial  $E_{0v}$ , on constate que la classique loi puissance de Janbu (1963) conserve sa validité pour les confinements inférieurs à 100 kPa, avec un exposant qui s'écarte notablement de la valeur 0,5 usuellement utilisée dans les modèles, spécialement pour le sable lâche.

En résumé, il apparaît que les lois d'évolution de l'angle de frottement, l'angle de dilatance et le module initial en fonction du niveau de contrainte, conservent qualitativement leur validité pour des confinements faibles. En ce sens elles sont extrapolables aux faibles confinements. Cependant les valeurs des paramètres de ces lois doivent être déterminées dans le domaine de contrainte où ces lois doivent être utilisées. Plus généralement, les paramètres des modèles de comportement doivent être déterminés, et les modèles validés, dans le domaine de contrainte où les modèles doivent être utilisés.

## Bibliographie

- Biarez J. et Ziani F. – Introduction aux lois de comportement des sables très peu denses. *Revue Française de Géotechnique*, n° 54, 1991, p. 65-73.
- Bolton M.D. – The strength and dilatancy of sand. *Geotechnique*, vol. 36, n° 1, 1986, p. 65-787.
- Canou J., El Kachem M. et Kattan A. – Propriétés de liquéfaction statique d'un sable lâche. *Cahiers de Rhéologie*, vol. VIII, n° 4, 1990, p. 207-218.
- Chu J., Lo S.-C.R. et Lee I.K. – Strain softening behaviour of granular soil in strain-path testing. *J. of Geotechn. Eng., ASCE*, vol. 118, n° 2, 1993, p. 191-208.
- Colliat J.-L., Desrues J. et Flavigny F. – Avantages et inconvénients de l'utilisation d'un système d'antifretage dans l'essai triaxial de compression. *Revue Française de Géotechnique*, n° 34, 1986, p. 41-55.
- Flavigny E., Desrues J. et Palayer B. – Le sable d'Hostun RF. *Revue Française de Géotechnique*, n° 53, 1991, p. 67-69.
- Fukushima S. et Tatsuoka F. – Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures. *Soils and Foundations*, vol. 24, n° 4, 1984, p. 30-48.
- Janbu – Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Eur. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Wiesbaden (Ger.)*, 1963, vol. 1, p. 19-25.
- Kolymbas D. et Wu W. – Recent results of triaxial tests with granular materials. *Powder Technology*, n° 60, 1990, p. 99-119.
- Kong X.J., Tatsuoka F. et Pradhan B.S. – Dynamic deformation properties of sand at extremely low pressures. *Proceedings 7<sup>th</sup> Jap. Earthquake Eng. Symp.*, 1986, p. 631-636.
- Konrad J.-M., Flavigny E. et Meghachou M. – Comportement non drainé du sable d'Hostun lâche. *Revue Française de Géotechnique*, n° 54, 1991, p. 53-63.
- Lancelot L. et Shahrour I. – Mechanical behaviour of a chemical powder at low stress levels – Influence of temperature and humidity. *Powder Handling and Processing*, vol. 6, n° 3, 1994, p. 303-308.
- Lancelot L., Shahrour I., Al Mahmoud M. et Doanh T. – Étude expérimentale du comportement du sable d'Hostun sous faibles confinements, 11<sup>e</sup> Congrès français de Mécanique, Lille, vol. 4, 1993, p. 457-460.
- Lo S.-C.R. et Chu J. – One test determination of the failure curve of a granular soil by strain path testing. *Soils and Foundations*, vol. 33, n° 1, 1993, p. 176-181.
- Maksimovic M. – Non linear failure for soils. *J. of Geotech. Eng.*, vol. 115, n° 4, 1989, p. 581-586.
- Ponce V.M. et Bell J.M. – Shear strength of sand at extremely low pressures. *Jour. SMF Division, Proceedings, ASCE*, vol. 97, n° SM4, 1971, p. 625-638.
- Rowes P.W. – The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings Royal Society of London*, vol. 269, séries A, 1962, p. 500-527.
- Tatsuoka F., Goto S. et Sakamoto M. – Effects of some factors on strength and deformation characteristics of sand at low pressures. *Soils and Foundations*, vol. 26, n° 1, 1986, p. 105-114.
- Tatsuoka F., Sakamoto M. et Kawamura T. – Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures. *Soils and Foundations*, vol. 26, n° 1, 1986, p. 65-84.