## avantages et inconvénients de l'utilisation d'un système d'antifrettage dans l'essai triaxial de compression

advantages and disadvantages of lubricated platens in the compression triaxial tests

> J.L. COLLIAT Chercheur 3<sup>e</sup> cycle\* J. DESRUES Chargé de recherche au C.N.R.S.\* F. FLAVIGNY Maître de conférences à l'Université de Grenoble\*

### Résumé

Un bilan complet des avantages et inconvénients liés à l'utilisation d'un système d'antifrettage dans l'essai triaxial de compression, est dressé ici. L'influence des conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon sur les paramètres mesurés à l'essai triaxial est étudiée, à l'aide d'essais drainés réalisés, sous différentes contraintes de confinement (comprises entre 0,05 et 10 MPa), sur un sable fin. L'accent est mis sur deux points particuliers : d'une part, le problème des erreurs introduites par l'effet de mise en place du système d'antifrettage et, d'autre part, l'incidence sur l'homogénéité de déformation des échantillons étudiés à l'aide d'un tomodensitomètre à rayons X (ou « scanner »).

### Abstract

A complete balance of both advantages and disadvantages of the use of frictionless end platens in the compression triaxial test is drawn up herein. The influence of the experimental conditions (lubrificated end platens and height-to-diameter ratio) on the stress-strain behaviour of a fine sand is studied, using drained triaxial tests performed under both low and elevated cellpressures (from 0,05 to 10 MPa). It is emphasized on two peculiar points: the bedding error, and the deformation homogeneity inside the samples studied by means of an X-ray scanner.

\* Institut de Mécanique de Grenoble Laboratoire (UA6) associé au C.N.R.S.

Domaine Universitaire.

B.P. n° 68 - 38402 Saint Martin d'Hères.

### 1. INTRODUCTION

L'utilisation d'un système d'antifrettage dans l'essai triaxial de compression n'est pas ce que l'on peut appeler une technique nouvelle. ROWE et BARDEN (1964) associent le développement de cette technique au début de leurs études sur les relations de contraintedilatance à l'Université de Manchester, dès 1956. A l'Institut de Mécanique de Grenoble, BIAREZ (1962), en 1962, souligne la nécessité de supprimer le frettage aux extrémités de l'échantillon, afin d'obtenir une déformation homogène, dans le cas d'essais triaxiaux réalisés jusqu'à de grandes déformations axiales.

Cette technique semble connaître actuellement un regain d'intérêt, en liaison avec les progrès enregistrés dans la formulation des lois de comportement qui rendent plus que jamais nécessaire la réalisation d'essais mécaniques dits « homogènes », pour la détermination de paramètres fiables.

Pourtant, l'utilisation d'un système d'antifrettage dans l'essai triaxial ne fait pas l'unanimité. Les avis restent partagés ; ceci peut-être du fait du manque d'un bilan complet des avantages et inconvénients liés à cette technique expérimentale.

Après une étude bibliographique succincte, ce bilan est dressé ici : l'influence des conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon est étudiée à l'aide d'essais triaxiaux drainés, réalisés sous des pressions de confinement faibles et élevées; l'accent est mis sur deux points particuliers : le problème des erreurs introduites par l'effet de mise en place du système d'antifrettage et l'incidence sur l'homogénéité de déformation des échantillons.

### 2. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUCCINCTE

De nombreuses études ont permis de montrer que les deux causes principales de la non-homogénéité de l'essai triaxial conventionnel (essai utilisant des bases rugueuses et un échantillon d'élancement égal à 2) sont, d'une part, la formation de zones rigides à chaque extrémité de l'échantillon, due aux forces de friction radiales se développant entre le matériau testé et les bases rugueuses (phénomènes de frettage) et, d'autre part, la tendance à la localisation des déformations au sein de l'échantillon suivant une ou plusieurs bandes de cisaillements (ou surfaces de rupture), plus particulièrement dans le cas des matériaux denses, fragiles ou fissurés.

Ce deuxième phénomène a été étudié, entre autres auteurs, par DESRUES (1984), dans le cas d'essais de déformation plane et à l'aide d'une méthode stéréophotogrammétrique de faux relief. Il faut souligner que ce problème de la localisation des déformations en bandes de cisaillement, étudié, dans la référence citée, dans le cas d'un échantillon dilatant soumis à un essai de déformation plane, demande encore à être précisé pour l'essai triaxial de révolution, ainsi que dans le cas où le matériau devient contractant lorsque le niveau de contrainte auquel il est soumis augmente. Rappelons que, dans le cas de l'essai triaxial conventionnel, BISHOP et HENKEL (1957) préconisent l'utilisation d'échantillons longs, afin que, dans la zone centrale, le comportement du matériau ne soit pas influencé par le phénomène de frettage.

L'introduction, par ROWE et BARDEN (1964) de l'emploi de bases lubrifiées dans l'essai triaxial constitue un progrès important. La suppression des zones rigides à chaque extrémité de l'échantillon (avec l'hypothèse d'un antifrettage parfait), doit théoriquement permettre le choix d'un élancement quelconque. De fait, on trouve dans la littérature des valeurs d'élancement comprises entre 0,36 et 2,5. Ainsi, les résultats donnés dans la suite de ce paragraphe ne prennent pas en compte le rôle spécifique de l'élancement de l'échantillon qui n'a pas fait l'objet, de la part des différents auteurs, d'une étude systématique.

D'une façon générale, de nombreux auteurs (5, 7, 11, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 23) sont partisans de l'utilisation combinée d'échantillons courts et d'un système d'antifrettage, pour les deux raisons suivantes :

— l'utilisation de bases élargies lubrifiées, en supprimant les zones rigides aux extrémités de l'échantillon, entraîne une plus grande homogénité de distribution de contrainte et de déformation pendant l'essai, et permet à l'échantillon de conserver sa forme cylindrique même après avoir subi de grandes déformations;

— le développement plus uniforme de la dilatance entraîne une tendance vers la formation de plusieurs surfaces de rupture, plutôt que le développement prématuré d'une seule bande de cisaillement prédominante.

BISHOP et GREEN (1965), à la suite d'une étude très détaillée de l'influence des conditions d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon sur les paramètres déterminés à l'essai triaxial de compression, aboutissent à la conclusion suivante : des échantillons d'élancement 2, frettés ou antifrettés, donnent un angle de frottement de pic identique ; l'utilisation d'échantillons plus courts entraîne une hausse de la valeur de cet angle mesurée, et une amélioration du système d'antifrettage permet de retrouver la valeur « réelle » de la résistance au cisaillement correspondant à celle des échantillons d'élancement 2.

Il faut souligner que cette conclusion est contredite par les résultats obtenus par différents auteurs, dont LEE et SEED (1964), ROWE et BARDEN (1964) et TAT-SUOKA et AL (1984), d'où l'impossibilité d'une conclusion définitive sur ce point.

Au sujet du choix de l'élancement « optimal » d'un échantillon triaxial antifretté, divers résultats sont obtenus. HETTLER et VARDOULAKIS (1984), s'appuyant sur les résultats d'une analyse théorique (bifurcation diffuse) de l'apparition d'un mode de déformation hétérogène (tonneau ou autre mode plus complexe), proposent d'utiliser des échantillons très courts (leur appareil triaxial accepte des échantillons d'élancement 0,36 avec un diamètre initial de 78 cm) pour obtenir des essais qu'ils considèrent comme parfaitement homogènes jusqu'à une déformation axiale de 10 %. LABANIEH (1984), en utilisant des échantillons d'élancement 2 et en portant un soin particulier au système d'antifrettage, réalise des essais considérés comme homogènes jusqu'à des déformations axiales atteignant 15 % (soit bien après le pic de contrainte situé à une déformation axiale d'environ 8 %). Enfin, BOUVARD (1982) et DEGNY (1984), avec des échantillons d'élancement 1, considèrent conserver l'homogénité de leurs essais jusqu'à des déformations axiales de près de 20 % ; DEGNY (1984) arrive à la conclusion que le moment où l'homogénéité de l'essai est perdue n'est pas une propriété intrinsèque du matériau, mais dépend des conditions aux limites et de la qualité de régulation de cet essai.

Sauf dans le cadre de quelques études récentes (10, 11, 12, 16, 17, 24), un des problèmes essentiels, lié à l'utilisation d'un système d'antifrettage dans l'essai triaxial, a été en général ignoré : il s'agit de l'erreur due à l'effet de mise en place du système d'antifrettage. Dans le cas d'essais triaxiaux de compression, réalisés sur du sable en conditions drainées, avec des échantillons d'élancement 2, cet effet peut entraîner la mesure d'un module initial tangent environ 60 % plus faible pour les échantillons antifrettés (3, 15, 22, 23). SARSBY, KALTEZIOTIS, et HADDAD (1982) montrent que, lors d'essais de compression isotrope et sous des contraintes inférieures à 700 kPa, l'effet de la mise en place du système d'antifrettage peut être la cause de 80 % de la valeur mesurée du raccourcissement de l'échantillon. MOLENKAMP et TATSUOKA (1983) considèrent que cet effet de mise en place est similaire à l'effet de pénétration de la membrane latérale, pour des niveaux de contrainte courants. GOLDSCHEIDER (1984) détermine la correction à appliquer à la mesure des déformations d'un échantillon par différence entre des mesures obtenues lors d'essais avec et sans système d'antifrettage ; il met en évidence une grande dispersion des résultats obtenus par cette méthode, empêchant la détermination exacte de cette erreur. Enfin, HETTLER, VARDOULAKIS et GUDEHUS (1984), préférant une méthode d'approche plus directe, déterminent la «vraie» déformation axiale de leurs échantillons à partir de mesures faites en dehors des zones perturbées par la présence du système d'antifrettage.

## 3. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Après l'exposé de résultats généraux illustrés par des courbes caractéristiques et représentatives d'essais, cette étude expérimentale permet de bien mettre en évidence le rôle des conditions d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon sur les différents paramètres mesurés à l'essai triaxial de compression drainé, et l'accent est mis sur l'importance de la prise en compte de l'effet de mise en place du système d'antifrettage ; le cas des essais réalisés sous pressions de confinement élevées est également considéré. Enfin, l'homogénéité de déformation des échantillons est étudiée de façon originale grâce à l'utilisation d'un tomodensitomètre à rayons X.

#### 3.1. Conditions et procédure d'essai

Les trois cas de conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement envisagés dans cette étude sont les suivants : a. échantillon fretté et d'élancement 2 (cas conventionnel) ;

- b. échantillon antifretté et d'élancement 2;
- c. échantillon antifretté et d'élancement 1.

Le matériau utilisé est un sable quartzique fin, provenant de la carrière d'Hostun, uniforme (figure 1), composé de particules anguleuses, et dont les caractéristiques sont les suivantes :

Pour tous les essais, les échantillons sont mis en place à l'état sec, par déversement. Les échantillons lâches sont mis en place avec une hauteur de chute nulle (leur densité relative initiale est comprise entre 15 % et 25 %); les échantillons denses sont mis en place avec une hauteur de chute libre égale à 1 m, d'où une densité relative initiale comprise entre 90 % et 95 %. Cette méthode de mise en place assure des résultats très reproductibles, ainsi que des échantillons homogènes en densité initiale sur toute leur hauteur.



Fig. 1. – Courbe granulométrique du sable d'Hostun fin.

Tous les essais (sauf ceux réalisés sous pression de confinement élevée, voir le paragraphe 3.4) ont été effectués, en conditions drainées, sur des échantillons saturés d'un diamètre initial de 100 mm; la charge axiale est appliquée par l'intermédiaire d'une tête rotulée. Les échantillons sont enfermés dans une membrane d'une épaisseur de 0,5 mm, et la vitesse d'écrasement est égale à 1 mm/min (soit 1 %/min pour l'échantillon d'élancement 1).

Le système d'antifrettage est composé de bases élargies métalliques (d'un diamètre de 120 mm), polies et lubrifiées par une fine couche de graisse au silicone; entre les bases élargies et l'échantillon sont intercalées deux membranes de latex, d'épaisseur 0,4 mm et également lubrifiées. Le drainage de l'échantillon est assuré, à chacune de ses extrémités, par une pierre poreuse centrale, d'un diamètre de 18 mm; ces pierres poreuses, dépassant légèrement des bases élargies, assurent également le centrage de l'échantillon.

Les déformations prises en compte dans l'interprétation des essais sont les déformations logarithmiques naturelles, calculées de la façon suivante :

$$\varepsilon_1 = \text{Log} (\text{H}/\text{H}_0)$$
 et  $\varepsilon_v = \text{Log} (\text{V}/\text{V}_0)$ 

avec  $H_0$  et  $V_0$  = hauteur et volume de l'échantillon après consolidation isotrope. Toutes les autres notations utilisées sont les notations classiques de la Mécanique des Sols.

#### 3.2. Résultats généraux

Du point de vue général, la figure 2 donne des courbes d'essais caractéristiques, obtenues, dans le cas d'échantillons initialement denses ou lâches, pour une pression de confinement de 90 kPa. Des résultats similaires ont été obtenus pour des valeurs de la pression de confinement comprises entre 50 et 1 000 kPa.

De la même façon que dans le cas des nombreuses études déjà réalisées, les faits suivants ont pu être observés : a. l'utilisation d'échantillons conventionnels (frettés -élancement 2), dans le cas d'échantillons initialement denses, entraîne la mesure d'un pic de contrainte très marqué, avec le développement prématuré d'une bande de cisaillement prédominante;

b. dans le même cas d'échantillons initialement denses l'utilisation d'un système d'antifrettage permet d'atteindre la rupture de façon plus progressive, sans bande de cisaillement visible, ou avec le développement de surfaces multiples;

c. dans le cas de l'utilisation d'un système d'antifrettage, l'emploi d'échantillons courts (élancement 1) semble préférable à celui d'échantillons longs (élancement 2), du fait d'une géométrie plus stable, permettant de poursuivre les essais jusqu'à des déformations axiales plus importantes.

# 3.2.1. Les paramètres mesurés à l'essai triaxial de compression

Il s'agit ici des paramètres caractérisant la rupture d'un échantillon soumis à un essai triaxial de compression réalisé en conditions drainées. La figure 3 (sauf en ce qui concerne la figure 3a) présente des résultats obtenus par une seule valeur de la pression de confinement ; des résultats similaires (mais atténués lorsque la pression de confinement augmente) ont été observés pour des pressions de confinement comprises entre 50 et 1 000 kPa.

La figure 3a montre l'influence des conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon



Fig. 2. — Courbes caractéristiques du comportement contrainte-déformation-changement de volume, en fonction des conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon.

50°

ø

45°

40°

00



0,10





23

sur la valeur de l'angle de frottement de pic mesurée, dans le cas d'essais réalisés avec des pressions de confinement comprises, entre 50 et 1 000 kPa. L'incidence de l'antifrettage et de l'élancement diffère suivant l'indice des vides initial des échantillons, ne permettant pas une conclusion générale. Malgré une certaine dispersion des résultats, notamment dans le cas du sable lâche, il faut remarquer que l'écart maximum observé (une différence de l'ordre de 2° à 3° sur la valeur de l'angle de frottement de pic du sable dense) reste faible et de l'ordre de grandeur de la reproductibilité entre deux essais « identiques ».

Concernant la reproductibilité des essais, il est intéressant de relever une étude réalisée par AMOROS, VUEZ et DEVEAUX (1980), sur vingt-cinq échantillons d'essais triaxiaux conventionnels (frettés - élancement 2) préparés de façon identique : l'écart-type sur le déviateur au pic de contrainte se monte à 35 kPa, pour une valeur moyenne de 376 kPa (soit un écart de l'ordre de 3° sur la valeur de l'angle de frottement de pic), alors que l'erreur moyenne quadratique estimée par analyse des erreurs des divers capteurs n'est que de 14 kPa; la différence est expliquée par des variations sur des variables mal contrôlées à la fabrication des échantillons.

La figure 3b met clairement en évidence le fait que la rupture de l'échantillon, définie au pic de contrainte, est atteinte par des déformations axiales plus grandes si un système d'antifrettage est utilisé, et ceci d'autant plus que la densité initiale de l'échantillon est faible. L'utilisation d'échantillons courts (élancement 1) accentue encore ce résultat. L'identité de comportement, dans le cas du sable dense, entre les échantillons d'élancement 2 frettés et antifrettés, est due au développement d'hétérogénéités de déformation (bandes de cisaillement) dans les deux cas d'échantillons ; c'est un des inconvénients possibles de l'utilisation combinée d'un système d'antifrettage et d'échantillons longs (voir § 3.2.2).

La figure 3c montre bien que l'utilisation d'un système d'antifrettage et d'échantillons courts conduit à une mobilisation beaucoup plus complète de la dilatance des échantillons de sable dense. On remarque la grande dispersion de la variation de volume finale dans le cas dense fretté : c'est précisément le résultat du développement incontrôlable des localisations plus ou moins précoces dans ces conditions d'essai. Dans le cas initialement lâche, la différence entre les cas fretté et antifretté semble négligeable, quel que soit l'élancement de l'échantillon.

Enfin la figure 3d montre que le taux de changement de volume, défini au pic la contrainte, semble indépendant des conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement, quel que soit l'indice des vides initial de l'échantillon. Il faut remarquer qu'un résultat identique (la figure n'est pas donnée ici) a été mis en évidence en ce qui concerne la valeur de la déformation volumique correspondant au pic de contrainte.

Ces résultats concernant les variations de volume indiquent clairement que la différence entre les échantillons frettés et antifrettés ne provient pas du taux de dilatance au pic de contrainte, mais plutôt de la conservation ou de la perte de l'homogénéité de l'essai à partir du pic, comme le confirment les observations visuelles rapportées au paragraphe suivant.

#### 3.2.2. Déformation globale des échantillons

La figure 4 montre l'influence caractéristique des conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement sur la déformation globale (ou sur la géométrie) des échantillons : déformation classique en « tonneau » d'un échantillon conventionnel de sable dense (figure 4a), accompagnée d'une surface de rupture (visible juste après le pic de contrainte, à  $\varepsilon_1 = 0,05$  environ) traversant l'échantillon de part en part en fin d'essai. L'utilisation d'un système d'antifrettage et d'un échantillon d'élancement 1 permet une déformation globale, homogène (figure 4b), sans surface de rupture visible à grande déformation axiale.

Les deux photographies précédentes sont à rapprocher des courbes d'essai de la figure 2. Il est intéressant de relever que, dans le cas de l'échantillon conventionnel fretté et d'élancement 2, le développement complet de la bande de cisaillement s'accompagne de l'arrêt brutal de la dilatance globale de l'échantillon ; au contraire, dans le cas de l'échantillon antifretté et d'élancement 1, où aucune surface de rupture n'est visible en fin d'essai, la dilatance de l'échantillon est continue.

La figure 4c montre qu'il est également possible d'obtenir une bonne déformation globale d'un échantillon long et antifretté, mais sa géométrie est difficile à maîtriser, notamment dans le domaine des grandes déformations axiales, et des hétérogénités de déformation (figure 4d) peuvent être obtenues : dans ce cas, l'hétérogénité de déformation globale de l'échantillon en fin d'essai est aussi (sinon plus) importante que dans le cas conventionnel.

# 3.3. Problème de la mise en place du système d'antifrettage

La pénétration des particules granulaires dans les membranes de latex composant le système d'antifrettage entraîne une erreur sur les valeurs mesurées des déformations axiales et volumiques. La conséquence directe de l'erreur faite sur la mesure de la déformation axiale est immédiatement visible sur la figure 2 : dans le domaine des faibles contraintes de confinement (jusqu'à 300 kPa environ), la valeur mesurée du module initial tangent, dans le cas d'un échantillon antifretté et d'élancement 1, peut être jusqu'à 50 % plus faible que dans le cas d'un échantillon conventionnel fretté et d'élancement 2.

A la suite de ces observations empiriques, l'effet de mise en place du système d'antifrettage a été étudié à l'aide d'essais de compression isotrope, avec mesure du raccourcissement de l'échantillon à l'intérieur de la cellule triaxiale.



 $4a = dense - \sigma_3 = 100 \ kPa - \varepsilon_1 = 0,35$ fretté élancement 2



 $4b = dense - \sigma_3 = 90 \ kPa - \varepsilon_1 = 0,30$ antifrette élancement 1



 $4c = l\hat{a}che - \sigma_3 = 90 \ kPa - \varepsilon_1 = 0,22$ antifretté élancement 2



 $\begin{array}{l} \textit{4d} = \textit{dense} \ -\sigma_3 = \textit{300 kPa} - \varepsilon_1 = \textit{0,20} \\ \textit{antifretté élancement 2} \end{array}$ 

Fig. 4. — Rôle des conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement sur la déformation globale des échantillons.



Nº 34

Fig. 5. — Erreur faite sur la mesure de la déformation axiale et due à la mise en place du système d'antifrettage.

# 3.3.1. Erreur faite sur la mesure de la déformation axiale

La figure 5a montre les résultats obtenus dans le cas du sable dense soumis à un essai de compression isotrope jusqu'à 1 MPa : la déformation axiale d'un échantillon conventionnel est donnée par la courbe a , celle d'un échantillon antifretté et d'élancement 1 est donnée par la courbe b, lorsque le système d'antifrettage est composé d'une simple couche latex + graisse, et par la courbe c lorsqu'il est composé d'une double couche latex + graisse (c'est le système d'antifrettage utilisé pour tous les essais précédents). Ainsi, l'effet de mise en place du système d'antifrettage peut être la cause de 70 % du raccourcissement mesuré d'un échantillon d'élancement 1 soumis à une pression de confinement de 1 MPa [valeur très proche de celle donnée par SARSBY, KALTEZIOTIS et HADDAD (1982), voir l'étude bibliographique, § 2].

L'erreur due à l'effet de mise en place du système d'antifrettage est déterminée par différence entre les cas fretté et antifretté. Cette erreur, représentée à la figure 5b en terme de raccourcissement axial, est indépendante de la densité initiale de l'échantillon; elle est très importante dans le domaine des très faibles contraintes, puis semble atteindre rapidement une valeur asymptotique (son augmentation semble devenir négligeable lorsque la contrainte dépasse 1 MPa).

La relation donnée à la figure 5b peut ensuite être introduite dans les programmes d'interprétation des essais triaxiaux. Cette correction de la déformation axiale doit évidemment être appliquée à la phase de confinement, comme à la phase d'écrasement, de l'échantillon.

Deux exemples d'application de cette correction sont donnés à la figure 6, dans le cas d'essais réalisés sous des contraintes de confinement de 90 kPa (figure 6a) et de 600 kPa (figure 6b). Le résultat n'est pas réellement satisfaisant, la correction étant soit trop forte (figure 6a, en tout début d'essai) soit trop faible (en particulier dans le cas de la figure 6b). Il faut souligner que le domaine des petites déformations initiales est un domaine délicat, et que la mesure de « bons » modules initiaux demande un matériel approprié (des capteurs de force et de déplacement de grande précision, placés de préférence à l'intérieur de la cellule triaxiale) dont la cellule utilisée n'était pas pourvue.









De nouveaux essais sont nécessaires pour déterminer de façon plus précise l'erreur due à la mise en place du système d'antifrettage et son rôle sur la mesure du module initial tangent.

# 3.3.2. Erreur faite sur la mesure de la déformation volumique

De la même façon que précédemment, mais cette fois pour la mesure de la déformation volumique, la figure 7a donne les résultats des essais de compression isotrope, obtenus dans le cas d'échantillons de sable dense, pour les deux cas de système d'antifrettage, déterminée par différence entre les cas fretté et antifretté, est également indépendante de la densité initiale de l'échantillon, et est donnée, en terme de changement de volume, à la figure 7b.

En rapportant la valeur du changement de volume à la surface de contact entre l'échantillon et le système d'antifrettage, l'erreur, faite sur la mesure du changement de volume de l'échantillon et due à l'effet de mise en place du système d'antifrettage, peut être comparée à l'erreur du même type mais due à l'effet de pénétration de la membrane latérale (figure 8) ; cette dernière erreur a été déterminée par la méthode de FRYDMAN, ZEITLEN et ALPAN (1973), en fonction du diamètre moyen du sable testé.

Il est clairement montré, en parfait accord avec les conclusions de MOLENKAMP et TATSUOKA (1983), que les deux phénomènes sont similaires, au niveau de contrainte considéré.

#### 3.4. Essais à fortes contraintes de confinement

Tous les résultats présentés ci-dessus sont relatifs au domaine des faibles contraintes de confinement (inférieures à 1 MPa). Quelques essais ont été réalisés sous une contrainte de confinement égale à 10 MPa, dans le but d'observer si les conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon ont encore une influence dans le cas d'essais réalisés sous contraintes de confinement élevées.



Fig. 8. — Comparaison de l'erreur faite sur la déformation volumique et due à la mise en place du système d'antifrettage avec celle due à l'effet de pénétration de la membrane latérale.





Les conditions d'essai sont identiques à celles des essais sous faibles contraintes de confinement, à la seule différence près que le diamètre initial des échantillons est de 5 cm au lieu de 10 cm. Pour le reste, le même système d'antifrettage est utilisé, l'échantillon d'élancement 1 est écrasé à la même vitesse de 1 %/min, et la charge axiale est encore appliquée par l'intermédiaire d'une tête rotulée.

La figure 9 donne les résultats obtenus sur le sable dense. Il est évident que, contrairement à ce qu'il pouvait être attendu, les conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon ont encore une grande influence sur les résultats d'essais triaxiaux de compression réalisés sous fortes contraintes de confinement.

Il faut insister sur le fait que cette influence n'est pas limitée à un point particulier de l'essai mais qu'elle concerne l'essai de façon globale. C'est-à-dire que les conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon ont une influence importante sur :

a. le comportement contrainte-déformation : l'échantillon conventionnel fretté et d'élancement 2 présente un léger pic de contrainte, alors qu'avec l'échantillon antifretté et d'élancement 1 la courbe de contrainte est toujours croissante (c'est la réponse « normale » d'un sable soumis à un essai triaxial sous forte contrainte de confinement, voir COLLIAT (à paraître, 1986) ;

b. le module initial tangent : celui-ci est encore 30 % plus faible dans le cas de l'échantillon antifretté et d'élancement 1 (ce résultat est en contradiction avec les conclusions tirées de la figure 5 et nécessite une étude plus approfondie);

c. la déformation globale de l'échantillon : l'échantillon conventionnel s'est déformé suivant la forme classique en tonneau, alors que l'échantillon antifretté et d'élancement 1 a conservé une forme cylindrique jusqu'à la fin de l'essai à une déformation axiale égale à 0,50;

d. la localisation de la déformation : l'échantillon fretté et d'élancement 2 était, en fin d'essai, strié de multiples bandes de cisaillement, avec un système de doubles surfaces prédominantes ; il faut également noter que cet échantillon n'était plus axisymétrique, indiquant clairement le passage d'une cinématique de déformation axisymétrique à une cinématique de déformation axisymétrique à une cinématique de déformation surfaces de cisaillement prédominantes ; sur l'échantillon antifretté et d'élancement 1, aucune bande de cisaillement n'était visible en fin d'essai.

### 3.5. Points de vue sur la déformation locale des échantillons

La tomodensitométrie à rayons X, connue aussi sous son nom médical de « scanner », est une technique de contrôle non destructif qui peut apporter des renseignements précieux sur l'état de déformation des échantillons triaxiaux. Après des premiers résultats obtenus par DESRUES (1984) et REYNAUD (1984), une collaboration scientifique s'est établie entre l'Institut de Mécanique de Grenoble et le Laboratoire d'Étude des Technologies Informatiques du Centre d'Études Nucléaires de Grenoble. Il a ainsi été possible de soumettre à un contrôle tomodensitométrique des échantillons ayant subi un essai triaxial de compression.

La tomodensitométrie à rayons X réalise un enregistrement de l'atténuation d'une gerbe de faisceaux X, au cours de sa traversée d'une section de l'échantillon, pour un grand nombre d'incidences différentes. La combinaison des profils obtenus permet la reconstitution de l'atténuation en «tout» point de la section considérée ; cette atténuation peut être reliée à l'indice des vides du matériau, de façon directe dans le cas qui nous intéresse (matériau granulaire). Il est ainsi possible d'obtenir des cartes de la densité locale du matériau dans diverses sections, et de contrôler ainsi l'homogénéité de cette densité dans l'état initial et son évolution. En raison des variations de volume liées à la distorsion d'un milieu granulaire, la densité locale peut être reliée, au moins qualitativement, à la déformation, et peut jouer de ce fait le rôle d'un révélateur d'hétérogénéités de celle-ci; la localisation, cause de forte dilatance dans les matériaux granulaires denses, est ainsi détectée aisément.

Avant d'aborder les résultats obtenus, il faut encore noter que, pour toutes les photographies présentées, la densité locale est exprimée par une échelle de tons de gris, allant du noir pour les structures peu denses au blanc pour les plus denses, et que les diagrammes ajoutés représentent le profil moyen de la densité locale (de façon qualitative et non pas quantitative, du fait du manque d'un étalonnage préalable du scanner) mesurée dans le faisceau matérialisé en pointillés. Enfin, il faut souligner la présence, sur chaque photographie, d'un effet de bord (la densité à la périphérie des échantillons paraissant plus élevée) dû à un durcissement du faisceau de rayons X sur les premiers millimètres de la traversée de l'échantillon ; il convient de faire abstraction de cet artefact. Deux essais ont été réalisés sur le sable dense, à l'aide d'une presse triaxiale spécialement conçue pour permettre un contrôle tomodensitométrique de l'échantillon en cours d'essai. L'échantillon est maintenu sous vide (correspondant à une pression de confinement de 90 kPa environ), il est désolidarisable de la presse et peut ainsi être placé dans le scanner à toute étape de l'essai.

Les deux cas de conditions expérimentales étudiés ont été ceux de l'échantillon conventionnel (fretté - élancement 2, figure 10) et de l'échantillon antifretté et d'élancement 1 (figure 11).

L'échantillon conventionnel s'est d'abord déformé classiquement en tonneau, puis a présenté une surface de cisaillement unique, traversant l'échantillon de part en part et complètement développée lorsque la déformation axiale atteint 10 %. Les photographies de la figure 10 correspondent à ce stade de l'essai, sur le palier des courbes de contrainte-déformationchangement de volume.

L'échantillon antifretté et d'élancement 1 s'est déformé en conservant une forme cylindrique, et aucune bande de cisaillement n'était visible à l'œil nu en fin d'essai à une déformation axiale de 20 %.

En dehors du contrôle de la déformation axiale, aucune mesure de force ou de déformation n'a été réalisée au cours de ces essais, mais les courbes de la figure 2a peuvent être considérées comme caractéristigues et représentatives de ces deux essais.

La figure 10a représente une coupe horizontale réalisée dans le plan médian de l'échantillon fretté et d'élancement 2 ; la bande de cisaillement est très évidente et le profil de densité montre clairement la dilatance à l'intérieur de la bande. La coupe de la figure 10b a été réalisée près de la tête de l'échantillon ; la bande de cisaillement est retrouvée, mais il faut remarquer que celle-ci n'est plus plane : elle semble n'avoir pu traverser le cône rigide (représenté par le rond central légèrement plus dense, donc plus blanc sur l'image du scanner) et en avoir épousé le contour ; par ailleurs, la localisation de la dilatance à l'intérieur de la bande de cisaillement est de nouveau mise en évidence.

La figure 11 concerne l'essai réalisé sur l'échantillon antifretté et d'élancement 1. La photographie de la figure 11a représente une coupe horizontale réalisée près de la tête de l'échantillon, et alors que la déformation axiale est égale à 10 %. La marque, au centre de l'échantillon, montre l'influence de la petite pierre poreuse centrale assurant le drainage : un phénomène de frettage se développe localement, entraînant la formation d'un petit cône rigide de demi-angle au sommet d'environ 25° (angle déterminé à l'aide d'une seconde coupe, parallèle à la précédente mais située 1 cm plus bas — voir le schéma 1 explicatif —, montrant la pointe de ce cône) ; enfin, le profil de densité moyenne semble indiquer une distribution de la dilatance légèrement hétérogène au sein de l'échantillon.

Après un premier passage de l'échantillon dans le tomodensitomètre, l'écrasement est poursuivi jusqu'à



10a = coupe au centre de l'échantillon



10b = coupe près de la tête de l'échantillon

Fig. 10. — Contrôle tomodensitométrique d'un échantillon de sable dense conventionnel fretté et d'élancement 2 ( $\sigma_3 = 90 \text{ kPa} - \varepsilon_3 = 10 \text{ \%}$ ).





 $\begin{array}{l} 11b = coupe ~au~centre~de~l'échantillon\\ (\varepsilon_1 = 20~\%) \end{array}$ 

Fig. 11. — Contrôle tomodensitométrique d'un échantillon de sable dense antifretté et d'élancement 1 ( $\sigma_3 = 90$  kPa).



Schéma 1. – Phénomène de frettage local.

atteindre une déformation axiale égale à 20 %, puis un nouveau contrôle de densité est réalisé.

La figure 11b représente une coupe horizontale réalisée au centre de l'échantillon. Hormis une zone centrale plus dense, la dilatance s'est répartie de façon très homogène dans la totalité de l'échantillon.

Ces deux essais ont permis de montrer qu'à l'essai triaxial conventionnel, comme dans le cas de l'essai biaxial de déformation plane [voir DESRUES (1984)], la dilatance de l'échantillon est localisée dans les bandes de cisaillement, d'où une perte d'homogénéité de l'essai. En ce qui concerne l'étude de la localisation de la déformation dans l'essai triaxial, ces deux essais constituent les premiers jalons d'une étude plus complète qui abordera les différents aspects du problème (initiation et propagation des bandes de cisaillement) et qui devra apporter, quant aux mesures des densités locales à l'intérieur des échantillons, des réponses quantitatives grâce à un étalonnage préalable du tomodensitomètre à rayons X.

#### 4. CONCLUSION

Cette étude expérimentale permet de souligner trois points particuliers liés à l'utilisation d'un système d'antifrettage dans l'essai triaxial de compression :

1. l'influence des conditions expérimentales d'antifrettage et d'élancement de l'échantillon sur la mesure de la résistance au cisaillement reste faible ;

2. le problème de la mise en place du système d'antifrettage est important et entraîne une forte erreur sur la détermination du module initial tangent ;

3. en ce qui concerne le choix de l'élancement « optimal » d'un échantillon antifretté, le problème de l'instabilité des échantillons longs (élancement 2) constitue un argument important en faveur du choix d'échantillons courts (cette étude n'a concerné que l'élancement égal à 1 et ne permet pas de plaider en faveur d'échantillons plus courts).

Malgré les restrictions exposées ci-dessus, il est possible de confirmer le fait que l'utilisation d'échantillons antifrettés et d'élancement 1, dans l'essai triaxial de compression, est préférable à l'utilisation d'échantillons conventionnels frettés et d'élancement 2, pour la mesure de paramètres plus indépendants des conditions expérimentales et donc plus représentatifs du milieu étudié. Néanmoins, tant qu'une méthode de correction fiable de l'effet de mise en place du système d'antifrettage n'est pas mise au point, il faut considérer que l'utilisation d'un système d'antifrettage dans l'essai triaxial de compression reste fonction des paramètres recherchés.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Laboratoire d'Étude des Technologies Informatiques du Centre d'Études Nucléaires de Grenoble, et plus particulièrement MM. PLEYBER et MARTIN, pour les essais avec contrôle tomodensitométrique qu'ils ont rendus possibles.

#### BIBLIOGRAPHIE

- AMOROS D., VUEZ A. et DEVEAUX D. (1980), Analyse de la mesure et des résultats d'essais triaxiaux. Journée de Géotechnique à l'École Nationale des Travaux Publics de l'État, Vaulx-en-Velin, 14 mai 1980.
- BIAREZ J. (1962), Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulvérulents. Thèse de Doctorat ès Sciences, Grenoble, 1962.
- BISHOP A.W. and GREEN G.E. (1965), The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil. Géotechnique, vol. 15, n° 3, Sept. 1965, pp. 243-266.
- BISHOP A.W. and HENKEL D.J. (1957), The measurement of soil properties in the triaxial test. Edward Arnold-Publishers-Ltd, 2nd edition, 1957.

- BOUVARD D. (1982), Rhéologie des milieux pulvérulents : étude expérimentale et identification d'une loi de comportement. Thèse de Docteur-Ingénieur, Grenoble, 1982.
- COLLIAT J.L. (1986), Comportement des milieux granulaires sous fortes contraintes. Influence de la nature minéralogique du matériau étudié. Thèse de Doctorat de spécialité, Grenoble, à paraître, 1986.
- DEGNY E. (1984), Étude du comportement d'un sable dense à l'aide d'une presse tridimensionnelle. Thèse de Docteur-Ingénieur, Grenoble, 1984.
- DESRUES J. (1984), La localisation de la déformation dans les matériaux granulaires. Thèse de Doctorat ès Sciences, Grenoble, 1984.
- FRYDMAN S., ZEITLEN J.G. and ALPAN J. (1973), The membrane effect in triaxial testing of granular soils. Journal of Testing and Evaluation, vol. 1, n° 1, Jan. 1973, pp. 37-41.
- GOLDSCHEIDER M. (1984), True triaxial tests on dense sand. Results of the International Workshop on Constitutive Relations for Soils, Grenoble, 6-8 Sept. 1982, pp. 11-54.
- HETTLER A. and VARDOULAKIS I. (1984), Behaviour of dry sand tested in a large triaxial apparatus. Géotechnique, vol. 34, n° 2, June 1984, pp. 183-198.
- HETTLER A., VARDOULAKIS I. and GUDE-HUS G. (1984), Stress-strain behaviour of sand in triaxial tests. Results of the International Workshop on Constitutive Relations for Soils, Grenoble, 6-8 Sept. 1982, pp. 55-66.
- LABANIEH S. (1984), Modélisations non linéaires de la rhéologie des sables et applications. Thèse de Doctorat ès Sciences, Grenoble, 1984.
- LEE K.L. (1978), End restraint effect on undrained static triaxial strength of sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the A.S.C.E., vol. 104, n° GT6, June 1978, pp. 687-704.
- LEE K.L. and SEED H.B. (1964), Discussion on Importance of free ends in triaxial testing by ROWE P.W. and BARDEN L. (1964) Journal of the soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the A.S.C.E., Vol. 90, n° SM6, June 1964, pp. 173-175.
- 16. MOLENKAMP F. (1984), Quality of lubrication of end platens, membrane penetration and bedding

error. Results of the International Workshop on Constitutive Relations for Soils, Grenoble, 6-8 Sept. 1982, pp. 91-93.

- MOLENKAMP F. and TATSUOKA F. (1983), Discussion on Compression of free-ends during triaxial testing by SARSBY and al (1982). Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the A.S.C.E., vol. 109, n° 5, May 1983, pp. 766-772.
- OLSON R.E. and CAMPBELL L.M. (1964), Discussion on Importance of free-ends in triaxial testing by ROWE P.W. and BARDEN L. (1964). Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the A.S.C.E., vol. 90, n° SM6, June 1964, pp. 167-173.
- RAJU V.S., SADASIVAN S.K. and VENKA-TARAMAN M. (1972), Use of lubricated and conventional end platens in triaxial tests on sands. Soils and Foundations, Journal of the J.S.S.M.F.E., vol. 12, n° 4, Dec. 1972, pp. 35-43.
- REYNAUD X. (1984), Contribution à l'étude de la déformation dans les matériaux granulaires. Mémoire de D.E.A., Grenoble, 1984.
- ROBINET J.C., MOHKAM M., DOANH D. et TORRENTI J.M. (1983), Amélioration des appareils triaxiaux pour les sols et les bétons. 18<sup>e</sup> Colloque Annuel du Groupe Français de Rhéologie, Méthodes et appareils de mesures rhéologiques, Paris, 1983.
- ROWE P.W. and BARDEN L. (1964), Importance of free ends in triaxial testing. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the A.S.C.E., vol. 90, n° SM1, Jan. 1964, pp. 1-27.
- ROY M. and LO K.Y. (1971), Effect of end restraint on high pressure tests of granular materials, Canadian Geotechnical Journal, vol. 18, n° 4, 1971, pp. 579-588.
- SARSBY R.W., KALTEZIOTIS N. and HAD-DAD E.H. (1982), Compression of free ends during triaxial testing. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the A.S.C.E., vol. 108, n° GT1, Jan. 1982, pp. 83-107.
- TATSUOKA F., MOLENKAMP F., TORII T. and HINO T. (1984), Behaviour of lubrication layers of platens in element tests. Soils and Foundations, Journal of the J.S.S.M.F.E., vol. 24, n° 1, March 1984, pp. 113-128.