# Une cellule triaxiale de grande taille pour l'étude du comportement des sols

Christophe Dano — Pierre-Yves Hicher — Ibrahim-Khalil Benazzouz — Jean-Yves Le Touzo

Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique Ecole Centrale Nantes – Université de Nantes - CNRS 1, rue de la Noë, BP92101 F-44321 Nantes cedex 3 Christophe.Dano@ec-nantes.fr

RÉSUMÉ. On considère qu'un volume de sol est représentatif lorsque la taille de l'échantillon testé est au moins 5 à 10 fois supérieure au diamètre du plus gros grain. Aussi, la caractérisation des sols grossiers en laboratoire requiert des moyens hors normes. On décrit ici la nouvelle cellule triaxiale de grande taille implantée à Nantes, le mode opératoire et les perspectives offertes par cet outil. On présente plus particulièrement les essais de validation sur des échantillons de sable de Loire de 1 mètre de diamètre comparés à des essais sur des échantillons de 0,1 mètre de diamètre. On montre que le comportement pré-pic est similaire mais que la localisation des déformations induit un effet d'échelle dans le domaine post-pic.

ABSTRACT. The testing of natural or coarse soils requires large experimental devices since the size of the sample has to be at least 6 to 10 times greater than the maximum grain diameter. In this paper, a new large triaxial cell, the experimental procedure and the objectives of that original tool are described. For a validation purpose, triaxial tests on samples of a Loire River sand respectively 0,1 meter and 1 meter in diameter are compared. The results show a similar behaviour before the peak stress whereas the stress – strain curves in the post-peak domain are greatly affected by the strain localisation process.

MOTS-CLÉS : cellule triaxiale de grande taille, sols grossiers, sols naturels, sable, outil expérimental.

KEYWORDS: large triaxial cell, coarse soils, natural soils, sand, experimental device.

Revue. Volume X –  $n^{\circ}$  x/année, pages 1 à X

### $2 \quad \ \ \text{Revue. Volume } X - n^\circ \text{ x/année}$

## 1. Introduction

La résolution d'un problème mécanique impliquant un milieu formé de grains, par une approche de type mécanique des milieux continus, n'est valable que dans la mesure où le volume concerné est nettement supérieur au volume élémentaire représentatif (volume minimal au-delà duquel les propriétés physiques et mécaniques de la structure granulaire ne dépendent plus de l'échelle d'observation) et, par conséquent, à la dimension caractéristique des grains. On retient couramment qu'un volume de sol est représentatif lorsque la dimension la plus petite de l'échantillon est au moins égale à cinq à dix fois le diamètre du granulat le plus gros.

Les cellules triaxiales actuellement disponibles sur le marché permettent de reconstituer des échantillons de diamètre compris entre 38 et 150 mm environ. Elles sont donc adaptées pour la caractérisation en laboratoire des sols fins, des sables, voire des alluvions dont les granulats ont un diamètre voisin de 1 centimètre. Elles ne conviennent pas à la caractérisation des sols grossiers, des ballasts, des graviers... pour lesquels les granulats ont un diamètre plus important. La caractérisation en laboratoire du comportement de ces sols requiert des moyens d'essai spécifiques, imposants, à la mesure des granulats testés. Ces moyens existent, mais ils sont peu nombreux dans le monde.

Historiquement, la première grande cellule triaxiale a vu le jour au Mexique, à la fin des années 60, pour répondre à une problématique liée aux barrages en enrochements (Marsal, 1967). De conception originale, elle demeure l'une des plus grandes cellules construite à ce jour : les échantillons avaient un diamètre de 1130 mm. Malheureusement, peu de résultats expérimentaux ont été publiés. Dans les années 90 sont apparues plusieurs cellules triaxiales de dimension plus modeste mais d'utilisation plus intense. On peut citer les cellules du Cermès (France - diamètre des échantillons : 300 mm), de l'Université de Catalogne (Espagne – diamètre des échantillons : 250 mm), de l'Université de Tokyo (Japon – diamètres des échantillons : 300 mm et 1500 mm), de GeoDelft (Pays-Bas – diamètre des échantillons : 400 mm), de l'Université de Berkeley (Etats-Unis - diamètre des échantillons : 915 mm) ... A ce petit nombre de cellules, il convient d'ajouter dorénavant la nouvelle cellule triaxiale de grande taille installée à Nantes et décrite ci-après.

#### 2. Présentation de la cellule triaxiale de grande taille

Cette nouvelle cellule triaxiale de grande taille se veut, dans son principe, relativement proche des cellules conventionnelles. Elle a pour vocation, une fois validée, de permettre l'étude du comportement des sols naturels et des sols grossiers. Evolutive, elle peut aussi être modifiée pour servir de chambre de calibration.

De forme cylindrique, aux dimensions imposantes  $(2,56 \text{ m}^2 \text{ de surface au sol}, 4,35 \text{ m} \text{ de hauteur, masse totale comprise entre 10 et 15 tonnes), installée sur une dalle d'essais précontrainte et rigide, cette cellule présente certaines particularités (Fig. 1) :$ 

- elle est modulable puisque on peut reconstituer et tester différents volumes de sol. Actuellement, il est possible de préparer des échantillons de 500 mm de diamètre et 1000 mm de hauteur (élancement : 2) ou de 1000 mm de diamètre et 1500 mm de hauteur (élancement : 1,5) (Fig. 1).

- l'enceinte de pression est en fait une enceinte à double parois pour une mesure précise des variations de volume des échantillons en phase de cisaillement. La paroi intérieure, soumise sur ces deux faces à la même pression, ne se déforme pas et le volume intérieur à cette paroi reste par conséquent constant.

- l'effort vertical est appliqué au moyen d'un vérin hydraulique simple effet amovible de 1000 kN que l'on peut piloter en force ou en déplacement.

- la cellule est dimensionnée pour une gamme de pressions de confinement allant de 100 à 1000 kPa. L'étanchéité est en partie assurée par douze tirants de précontrainte verticaux.

L'instrumentation se compose d'un capteur de déplacement de 250 mm de course et d'un capteur de force au niveau du vérin hydraulique placé sur le dessus de la cellule, d'un capteur force immergé de 500 ou 1000 kN placé sous l'échantillon, de deux capteurs de pression 0 - 1 MPa montés sur l'enceinte de pression pour s'assurer de l'indéformabilité de la paroi intérieure, d'un capteur de dépression -40 / - 100 kPa pour la mesure de la dépression appliquée en phase de préparation des échantillons et enfin, d'un débitmètre volumique électromagnétique pour la mesure des volumes de fluide de confinement échangés entre la cellule et l'extérieur.

Enfin, les échantillons sont préparés dans des moules en aluminium adaptés à leur dimension et sont protégés du fluide de confinement par une membrane en PVC souple de 1,43 mm d'épaisseur. Les embases drainantes sont protégées de l'intrusion de particules fines par deux disques de géotextile.

#### 3. Validation expérimentale

#### 3.1. Matériau

Le sable de Loire est un matériau alluvial qui a fait l'objet de deux campagnes de caractérisation physique et mécanique (Dano *et al.*, 2003 ; Benazzouz, 2005). Il s'agit d'un matériau dont les grains sont sub-arrondis et qui présente une fraction non négligeable de débris coquilliers de forme allongée. Les études granulométriques réalisées avant les essais triaxiaux montrent que le diamètre moyen des particules  $d_{50}$  est d'environ 500 µm et que le coefficient d'uniformité C<sub>u</sub> vaut 3,2. Le poids volumique solide des grains, déterminé par la méthode des

#### 4 Revue. Volume $X - n^{\circ} x/année$

pycnomètres, vaut 26,2 kN/m<sup>3</sup>. Enfin, les poids volumiques minimal et maximal sont respectivement de 15,1 kN/m<sup>3</sup> et 18,5 kN/m<sup>3</sup>.



Vue générale

Echantillon 1000 mm

Figure 1. Vue de la cellule triaxiale et d'un échantillon avant essai.

#### 3.2. Protocole expérimental

Le sable sec a été caractérisé dans un premier temps au moyen d'essais triaxiaux consolidés drainés sur des échantillons de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur (Benazzouz, 2005). Dans un second temps, des essais triaxiaux ont été conduits sur des échantillons de ce même sable, sec, de même poids volumique moyen ( $\gamma_d = 17,1 \text{ kN/m}^3$ , soit environ 2050 kg de matériau), de 1000 mm de diamètre et 1500 mm de hauteur. Aucun dispositif d'anti-frettage n'a été utilisé malgré la différence d'élancement.

L'absence de dispositif adapté au diamètre des échantillons (pluviateur par exemple) et la forme de certaines particules du sable nous ont amené à opter pour une préparation des échantillons par couches et par damage. Les échantillons de 100 mm et 1000 mm ont été reconstitués respectivement en 5 et 10 couches. Si la compacité moyenne est proche dans les deux cas, nous avons pu constater, lors du remplissage du moule, une ségrégation des particules les plus grosses et l'obtention d'une structure plus lâche vers la périphérie des échantillons de 1000 mm. La dispersion du poids volumique autour de la valeur moyenne dans le cas des grands échantillons est évaluée à 0,3 kN/m<sup>3</sup>.

Les essais ont été réalisés aux mêmes contraintes de confinement (90, 190 et 340 kPa) à mi-hauteur des échantillons puisqu'il existe une différence de contrainte latérale entre les faces inférieures et supérieures des grands échantillons (1,5 m de hauteur) de 15 kPa. Le cisaillement est conduit avec des vitesses de déformation relativement proches :  $5,56.10^{-6} \text{ s}^{-1}$  pour les petits échantillons,  $4,65.10^{-6} \text{ s}^{-1}$  pour les grands échantillons. Cependant, cette vitesse s'est révélée être trop importante pour le confinement de 90 kPa sur l'échantillon de 1000 mm. La contrainte latérale a subi des variations importantes en cours d'essai. La diminution de la vitesse de déformation (2,7.10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>) permettrait d'éliminer ce problème.

### 3.3. Résultats expérimentaux

Malgré les difficultés inhérentes à l'utilisation d'un prototype (choix de la vitesse de déformation, capacité ultime du vérin atteinte lors de l'essai à 340 kPa), les résultats obtenus sur les échantillons de 1000 mm de diamètre sont en accord avec les connaissances actuelles sur le comportement des sables denses dilatants (Fig. 2) : croissance du déviateur des contraintes en fonction de la déformation axiale jusqu'à un pic au-delà duquel il diminue, dépendance du déviateur et du module tangent à l'origine avec la contrainte latérale, comportement volumique comportant une phase de contractance suivie d'une phase de dilatance... Sur la figure 3, on note que la perte de contrôle sur la contrainte latérale se traduit par une déviation de la courbe contrainte moyenne p / déviateur des contraintes q par rapport à la pente prévue de 1 pour 3.

Les essais à la contrainte de confinement de 190 kPa sont ici comparés (Tableau 1, Fig. 4). Compte tenu de la différence de poids volumique, les échantillons de 1000 mm de diamètre présentent des valeurs légèrement plus faibles du déviateur des contraintes et des déformations volumiques de dilatance. Cependant, les évolutions demeurent proches dans le domaine pré-pic. Les paramètres mécaniques (angle caractéristique, module sécant à 0,2 % de déformation, coefficient de Poisson, angle de dilatance) sont par conséquent proches.

Par contre, dans le domaine post-pic, le radoucissement est beaucoup plus marqué sur les grands échantillons que sur les petits échantillons. L'observation des échantillons après cisaillement montre des schémas de localisation des déformations assez différents : une seule bande de cisaillement est visible sur les petits échantillons alors qu'une dizaine de ces bandes parcoure la périphérie des grands échantillons (photos visibles sur http://www.ecnantes.fr/92551514/0/fiche pagelibre/). Cette observation expérimentale est cohérente avec l'approche théorique développée par Habib (1972) selon laquelle l'effet d'échelle n'existe que dans les milieux granulaires denses, donc dilatants, en présence de ce phénomène de localisation naissant au voisinage du pic de contraintes.

#### 6 Revue. Volume $X - n^{\circ} x/ann$ ée



La similitude des courbes expérimentales dans le domaine pré-pic nous permet de conclure positivement quant à la validité de notre cellule triaxiale de grande taille.

Figure 2. Essais triaxiaux sur la configuration 1000 mm de diamètre.

## 4. Conclusions

La comparaison d'essais triaxiaux sur des échantillons de 100 mm de diamètre et de 1000 mm de diamètre a permis de valider un nouvel outil d'investigation géotechnique : une grande cellule triaxiale destinée principalement à l'étude du comportement des sols grossiers et des sols naturels. D'un point de vue scientifique, les premiers essais réalisés ont permis de montrer l'absence d'effet d'échelle dans le domaine pré-pic tandis que le processus de localisation des déformations génère une évolution très différente des contraintes suivant la taille des échantillons.

## Remerciements

La conception, la construction et l'utilisation d'une cellule triaxiale aussi imposante est une œuvre collective. Les auteurs tiennent à remercier le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées pour son travail de conception et son soutien scientifique, les sociétés I2A, Amineau et SITIA pour la construction du dispositif et toutes les personnes dont l'aide est si précieuse lors de la réalisation des essais.

#### **Bibliographie**

- Bennazzouz I.K., Validation d'une grande cellule triaxiale Essais sur sable de Loire, Mémoire de Master Recherche, Ecole Centrale Nantes, 2005.
- Dano C., Hareb H., Hicher P-Y., « Characterization of Loire River sand in the small strain domain using new bender-extender elements », *Proceedings 16<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference*, Seattle, 2003.
- Habib P., Effet d'échelle sur les sables denses, Séminaire Plasticité et Viscoplasticité, Ecole Polytechnique, 1972.
- Marsal R.J., « Large-scale testing of rockfill materials », *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, vol. 93, n°SM2, 1967, p. 27-44.



Figure 3. Chemins de contraintes pour la configuration 1000 mm de diamètre.

# 8 Revue. Volume $X - n^{\circ} x$ /année



Figure 4. Comparaison des essais triaxiaux sur les 2 configurations..

Dénomination	Unités	GC190	C1	C2	C3
Diamètre	mm	1000	100	100	100
Poids volumique	kN/m <sup>3</sup>	17,16	17,13	17,04	17,04

**Tableau 1.** Récapitulatif des essais menés à  $\sigma_3^* = 190$  kPa.