



## Résistance au cisaillement d'une grave alluvionnaire

- essais à la boîte : constats et effets d'échelle -

L. Afriani<sup>1</sup>, D. Levacher<sup>1</sup>, M. Khay<sup>2</sup> et D. Lozach<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Groupe de Recherche en Génie Civil, M2C UMR 6143 CNRS Université de Caen, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France. Tel : 33 (0) 231565709, afriani@geos.unicaen.fr, daniel.levacher@geos.unicaen.fr

<sup>2</sup>Centre d'Expérimentation Routière de Rouen, BP 245, 76121 Le Grand-Quevilly cedex, France. Tel : 33 (0) 235688832

### Résumé

Des études paramétriques sont menées sur des essais de résistance au cisaillement à la boîte pour une grave alluvionnaire de Seine. Après avoir défini la granularité du matériau à tester et proposé une procédure de mise en place du matériau dans la boîte, une importante campagne d'essais systématiques a été entreprise. Les objectifs couvrent l'étude de la répétabilité des essais, de l'influence de la dimension géométrique de la boîte avec des essais en petite (250 x 250 mm) et grande (500 x 500 mm) boîtes de cisaillement, de l'effet de la dimension des grains et de l'influence de l'espacement entre les demi-boîtes sur les caractéristiques mécaniques  $c$  et  $\varphi$  du matériau. Le sol étudié est un matériau grossier naturel de Criquebeuf-sur-Seine qui provient d'un dépôt alluvionnaire, silico-calcaire d'une terrasse de la Vallée de la Seine en Seine Maritime près de Rouen.

### Abstract

Parametric studies are undertaken on direct shear tests for an alluvial soil. The experimental set up is described with the used methodology for filling the shear boxes. The soil properties of the tested a natural coarse soil are given. The main objectives relative to this investigation are the repeatability of the tests, the effect of the geometric dimensions of the shear boxes, i.e. a small square box (250 x 250 mm) and a large one (500 x 500 mm), the effect of soil particles size and the influence of the space between the 2 half-boxes. Results are focused on the cohesion  $c$  and the internal friction angle  $\varphi$  which are the main parameters for designing the structures. The tested soil is a natural material from Criquebeuf-sur-Seine. It comes from an alluvial silico-calcareous deposit of a terrace of the valley of the Seine river, near the town of Rouen in France.

## **1. Introduction**

Une grande boîte de cisaillement direct a été utilisée pour déterminer la résistance au cisaillement d'un sol grossier. Les essais de cisaillement ont été réalisés au Centre d'Expérimentation Routière CER de Rouen en collaboration avec l'Université de Caen. Les résultats des essais attendus sont les caractéristiques de résistance au cisaillement à savoir l'angle de frottement et la cohésion du sol. La variabilité de ces valeurs dépend d'une part d'un effet d'échelle dû à l'appareil de cisaillement et d'autre part, dû à la taille maximale des grains du sol testé.

La connaissance des valeurs de l'angle de frottement interne  $\phi$  et de la cohésion  $c$  est nécessaire voire indispensable pour le dimensionnement d'ouvrages de génie civil comme les soutènements, les fondations, les tunnels, les remblais... Dans le cas d'un sol grossier, l'utilisation de l'essai de cisaillement plan à la boîte pour déterminer ces deux paramètres mécaniques, paraît envisageable. Encore faut-il discuter de la validité des résultats obtenus en fonction des effets d'échelle entre la taille de la boîte et le diamètre maximal des grains du sol testé. Pour ce faire, des essais de cisaillement à la boîte ont été réalisés à l'aide d'une boîte de cisaillement direct de section carrée permettant deux configurations : une grande boîte dont les dimensions sont de 500 x 500 mm et une petite boîte de 250 x 250 mm. Le sol grossier est une grave alluvionnaire provenant des carrières de Criquebeuf-sur-Seine près de la ville de Rouen dans la partie nord de la Normandie. Le diamètre maximal s'approche de 200 mm. Pour réaliser des essais de cisaillement direct, il est donc nécessaire d'écarter le sol naturel. Cependant, l'écarterage ne doit en aucun cas, remettre en cause la représentativité de l'essai. Une étude de l'effet d'échelle du grain de sol s'impose, un écarterage par tamisage a été opéré de façon à réduire graduellement la dimension maximale du grain à savoir 25, 50 et 80 mm.

Cet article rappelle d'abord brièvement les définitions données aux sols grossiers d'après différents auteurs et décrit ensuite l'installation expérimentale utilisée ainsi que la méthodologie relative à la mise en place du matériau dans la boîte de cisaillement. Des résultats d'essais sont donnés et analysés. Les premières constatations intéressent les effets d'échelle dus à la taille des particules, aux dimensions de la boîte utilisée et à l'espacement entre les deux demi-boîtes. Enfin une comparaison entre des résultats issus d'essais de résistance au cisaillement à la boîte et triaxiaux sur le même matériau est présentée.

## **2. Définition d'un sol grossier**

Il existe une réelle difficulté pour donner précisément la définition d'un sol grossier, en particulier pour en situer les dimensions limites des grains. Différents chercheurs, [1], en fonction des essais in situ ou en laboratoire effectués sur les sols grossiers, ont défini différemment les sols grossiers ainsi que les limites de la taille des particules qui les composent.

Charles [2], a été amené à étudier dans le cadre de travaux variés sur les barrages, la stabilité de versants, la construction de murs de soutènement,... le comportement de sols grossiers. L'auteur a donc caractérisé le sol grossier par la taille des particules prédominantes dans le sol. Lambe et Whitman, cités par Charles [2], considèrent comme un sol grossier, s'il contient plus de 50 % de particules plus grandes que 0,075 mm. Selon le système de

classification des sols grossiers par la British Standard Institution [1981], (cité par Charles [2]), les sols sont dits grossiers s'ils contiennent 65 % de sables et de graviers dont la taille des grains est supérieure à 0,06 mm. Par la suite, Craig et Susilo [3], définissent les sols grossiers comme ayant moins de 35 % de matériau plus fin que 0,06 mm. Ils confirment que ce sont des sols mal gradués. Holtz et Willard [4], pour des études de sol en laboratoire, ont travaillé avec des sols graveleux argileux destinés à des barrages en terre, des remblais et des revêtements en terre. Ils ont choisi ces matériaux parce que, souvent dans la pratique, on utilise ces sols graveleux dans la construction des ouvrages en terre. Ils offrent une meilleure stabilité, un faible tassement et une grande résistance à l'érosion. Les particules de graviers étaient surtout composées de gneiss, de granite et de schiste, issus d'un dépôt de rivière. Les sols argileux de la matrice fine avaient un poids volumique qui variait de 26,6 à 27 kN/m<sup>3</sup>. Pour l'étude des sols grossiers, les auteurs ont retenu la granulométrie des divers mélanges de sols graveleux comme indiqué sur la figure 1. Les sols argileux étaient mélangés à certains pourcentages de graviers, afin d'obtenir les courbes granulométriques suivantes, (figure 1).

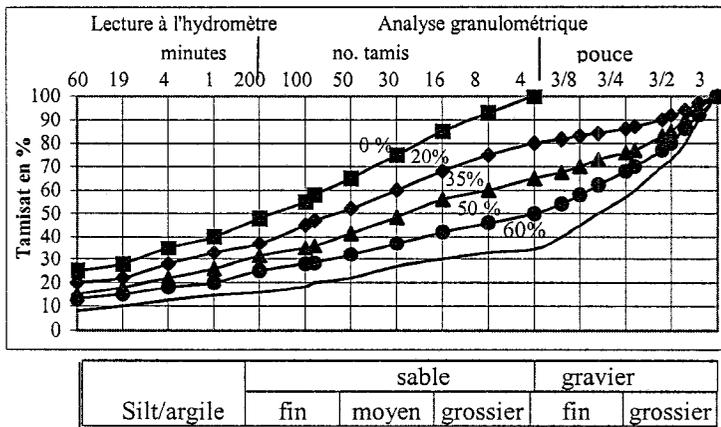


Fig.1: Granulométries de sols graveleux argileux étudiés par Holtz et Willard [4]

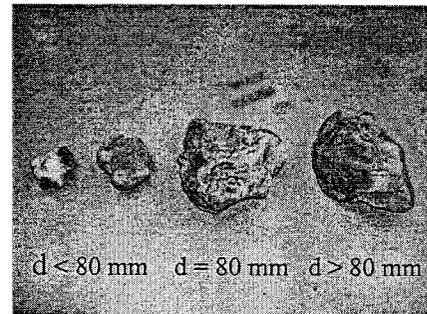


Fig 2: Granulats sub-arrondis du matériau 0/25 mm de Criquebeuf sur-Seine

D'autres auteurs, Nichiporovitch et Rasskazov [5] ont défini la taille des sols grossiers jusqu'à 50 mm de diamètre dans le cadre d'essais de résistance au cisaillement de matériaux grossiers en laboratoire. Ils ont, par ailleurs, effectué des essais in situ en utilisant des sols de dimension de particules allant jusqu'à 200 mm. Perrot [6] a proposé comme définition pour les sols grossiers, les sols qui contiennent plus de 50 % d'éléments de taille supérieure à 2 mm, la dimension limite supérieure des éléments n'étant pas fixée. Les sols grossiers les plus répandus sont issus de carrières ou bien, se trouvent dans la nature (éboulis, alluvions,...). Une grave est dite argileuse s'il y a plus de 10 % d'éléments de taille inférieure à 80 µm et les graves contenant moins de 5 % d'éléments inférieurs à 50 µm seront dites sableuses.

L'intervalle granulaire des sols grossiers a été discuté par beaucoup d'auteurs, surtout sur la limitation supérieure du diamètre des grains. A partir de nombreuses constatations, on peut situer les diamètres limites des sols grossiers. L'intervalle granulaire considéré va de 0,2 jusqu'à 50 mm. D'une façon générale, ces seuils sont imposés par le respect de la représentativité de l'échantillonnage du sol et de l'essai réalisé avec les appareillages classiques de laboratoire.

### 3. Remarques sur le comportement d'un sol grossier

Sur des graves alluvionnaires, Vallé [1] a effectué un important programme d'essais triaxiaux et à la boîte pour définir les caractéristiques de résistance au cisaillement de ces sols grossiers. Le matériau grossier étudié est une grave alluvionnaire de granulométrie très étalée 0/200 mm. Pour les essais de cisaillement direct, le sol naturel a d'abord été prélevé, puis écrêté par tamisage pour obtenir différentes granulométries jusqu'à 0/50 mm.

La résistance au cisaillement du sol grossier est influencée principalement par le frottement entre les grains, la taille des grains, l'espacement entre les demi-boîtes et la dimension de la boîte de cisaillement, l'énergie et le mode de compactage. Le frottement dans la zone de cisaillement dépend principalement de l'aspect de la surface des grains (rugueux ou lisse) et de la forme de la particule (arrondie ou anguleuse) du sol.

### 4. Matériaux testés

Les sols étudiés sont issus d'un matériau naturel grossier prélevé à Criquebeuf-sur-Seine, près de Rouen. Ils sont soit tamisés, écrêtés, soit mis en remblai et réutilisés. Le sable de Fontainebleau a été retenu comme sable de référence. Les matériaux grossiers proviennent d'un dépôt alluvionnaire, silico-calcaire d'une terrasse de la Vallée de la Seine au sein de la carrière de Criquebeuf-sur-Seine. Le prélèvement du matériau a été opéré en une seule fois pour une quantité suffisante et nécessaire pour les essais menés à la boîte de cisaillement. Ce même matériau a déjà été utilisé par Vallé [1] pour des essais triaxiaux.

Un vaste programme d'essais de cisaillement à la boîte a été entrepris afin d'étudier les différents effets d'échelle inhérents à la taille des boîtes et à la taille des grains. Celui-ci a intéressé les types de sol suivants :

1. le sol naturel de Criquebeuf-sur-Seine d'un diamètre maximum supérieur à 200 mm, a été utilisé pour les études sur l'effet d'échelle géométrique de la boîte, l'influence de l'espacement entre les deux demi-boîtes, l'effet d'échelle des grains. Ce matériau a été écrêté à 50 mm et 80 mm,
2. le sol naturel de Criquebeuf-sur Seine mis en remblai au CER de Rouen, après écrêtage à un diamètre maximum de 25 mm. Ce matériau a permis d'effectuer des essais de répétabilité et les études sur l'effet d'échelle de la boîte, l'effet d'échelle du diamètre maximum des grains et l'influence de l'espacement des demi-boîtes,
3. une étude comparative a été menée sur le rapport entre la taille de la boîte et la taille minimale des grains. Pour ce faire, du sable de Fontainebleau 0/0,4 mm, considéré comme un sable de référence, a été utilisé pour les essais de répétabilité.

La forme des grains constituant le matériau de Criquebeuf-sur-Seine est sub-arrondie, comme montré sur la figure 2. La taille maximale des grains est adaptée à la géométrie des appareillages d'essai. Le rapport  $L/d_{\max}$  égal 10 a été choisi pour les essais à la boîte de cisaillement.  $L$  est le coté de la boîte et  $D_{\max}$ , la dimension maximale des plus gros éléments. La figure 3 récapitule les courbes granulométriques relatives aux essais de résistance de cisaillement. Elles concernent le

matériau naturel écrêté respectivement à 25, 50 et 80 mm et celui écrêté à 25 mm extrait d'un remblai.

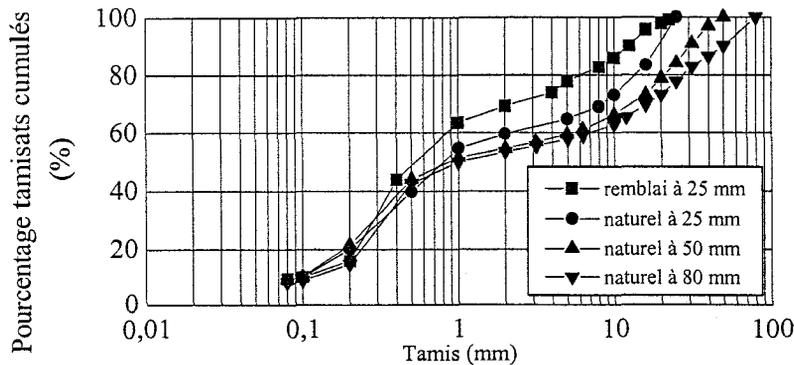


Figure 3: Courbes granulométriques de la grave naturelle écrêtée de Criquebeuf-sur-Seine

### 5. Conditions générales d'essais

Une première série d'essais a consisté en des essais de répétabilité sur le matériau naturel et le sable de Fontainebleau. Ils ont été effectués à l'aide de la grande boîte de cisaillement de 500 x 500 mm. La hauteur de la boîte est de 250 mm augmentée de l'espacement « t » entre les deux demi-boîtes. Une deuxième série d'essais ont permis d'étudier l'influence de la taille des grains sur la résistance au cisaillement en utilisant la grande boîte avec des espacements égaux à  $D_{max}$ ,  $D_{max}/2$  et  $D_{max}/4$  pour des diamètres de grain de 50 mm et 80 mm. Une troisième série d'essais a été réalisée avec une boîte modifiée à partir de la grande boîte afin d'en réduire les dimensions. Les dimensions de la petite boîte sont de 250 x 250 x (125 + t) mm. La petite boîte est en fait installée dans la grande boîte. Les essais avec la petite boîte concernent l'étude de l'influence de l'espacement entre les demi-boîtes.

Le bâti de cisaillement est présenté sur les figures 4 et 5. Un capteur d'effort horizontal  $F_h$ , et vertical  $F_v$ , un capteur de déplacement horizontal  $\delta_h$ , trois capteurs de déplacement vertical  $\delta_v$  constituent l'ensemble des mesures recueillies à chaque essai. Le capteur d'effort vertical  $F_v$  permet de connaître à tout instant la contrainte normale appliquée  $\sigma$ . Il est placé sur la plaque d'appui en acier du coussin pneumatique au-dessus de la boîte supérieure. Les mesures délivrées par les différents capteurs sont acquises et traitées par un système informatique associé au pilotage de l'essai. Ainsi les données recueillies permettent de suivre l'évolution de la force de cisaillement, la constance du chargement vertical et les variations des déplacements.

Le remplissage du matériau dans la boîte se fait en 3 couches : une première couche de 90 mm, une deuxième de (100 + t) mm et une troisième de 60 mm pour la grande boîte. Pour la petite boîte, les épaisseurs des couches sont : 35 mm, (60 + t) mm et 30 mm. Chaque couche est compactée au moyen d'un marteau vibrant jusqu'à la masse volumique requise de l'éprouvette. La masse de matériau nécessaire à chaque essai est approximativement de 150 kg et 20 kg respectivement pour la grande et la petite boîte. La vitesse de déplacement horizontal est de 0,5 mm/min pour tous les essais. Ces valeurs correspondent à des taux de cisaillement direct respectifs de 0,17° et 0,11° par minute où le cisaillement est défini suivant Brandy *et al* [7] par :

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{\delta h}{h} \right) \quad [1]$$

Vallé [1] a aussi utilisé une vitesse de déplacement horizontal de 0,5 mm/min pour des essais triaxiaux et de cisaillement direct avec la même boîte. Il a constaté que la vitesse d'essai n'influence pas les résultats obtenus, à savoir les paramètres de la résistance au cisaillement. Les contraintes normales appliquées pour les essais sont de 50, 100, 150 kPa. La teneur en eau initiale du matériau testé est approximativement de 8 %. Le poids volumique est de 1,91 à 2,2 t/m<sup>3</sup>.

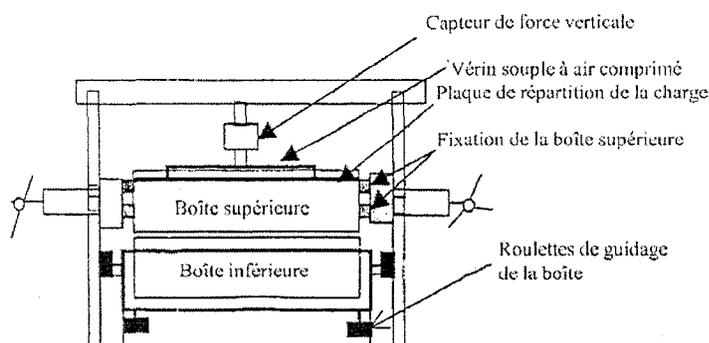


Fig. 4: Schéma de la boîte de cisaillement direct

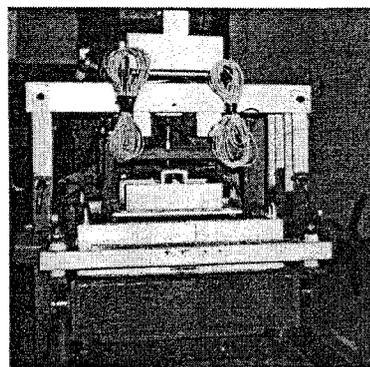


Fig.5 : Vue générale du bâti de cisaillement

## **6. Premières constatations et discussion**

### **6.1. Essais de répétabilité sur un sable fin**

L'essai de répétabilité a été effectué sur un sable fin de Fontainebleau 0/0,4 mm. Pour cet essai, un espacement entre les demi-boîtes de 12 mm a été choisi. Les essais ont été répétés 3 fois pour la contrainte normale appliquée de 50 kPa et de 150 kPa. Pour la contrainte normale de 100 kPa seul un essai a été effectué. Les caractéristiques mécaniques obtenues pour le sable de Fontainebleau, sont de 36,4° pour  $\phi$  et 16,4 kPa pour  $c$ . La courbe de déplacement horizontal en fonction de la résistance au cisaillement est sensiblement identique. Le coefficient de variation pour la valeur pic de la résistance au cisaillement est de 8,7 % pour la contrainte normale de 50 kPa et de 7,2 % pour la contrainte normale de 150 kPa.

### **6.2. Essai de répétabilité sur un sol issu d'un remblai**

Des résultats obtenus à partir des essais, on observe deux comportements pendant le cisaillement. Tout d'abord, la valeur de la résistance au cisaillement augmente jusqu'à atteindre une valeur pic qui caractérise la résistance au cisaillement maximale, voir figure 8. Au-delà du pic, la courbe va décroître et se stabiliser. Il n'y a plus alors d'influence de cisaillement entre les grains. Ou bien, la valeur des déplacements horizontal et vertical croît jusqu'à la fin des essais; il y a absence de pic.

Les essais dits de répétabilité ont consisté à répéter trois fois l'essai pour des valeurs de contrainte normale appliquées de 50 kPa et 150 kPa. Ces essais ont été menés à la grande boîte de cisaillement avec un espacement égal à  $D_{max}/2$  en utilisant le sol de Criquebeuf-sur-Seine écrêté à 25 mm issu du remblai. Ces expérimentations revêtent un caractère particulier car elles

permettent de vérifier s'il existe une variabilité sur les résultats des essais. La figure 8 montre des exemples de courbes reliant le déplacement horizontal  $\delta_h$  et la résistance au cisaillement  $\tau$  en fonction des contraintes normales appliquées  $\sigma$ .

De ces essais, les caractéristiques intrinsèques du matériau conformément à la figure 6 sont pour l'angle de frottement interne  $\phi$  et la cohésion  $c$  respectivement  $35,8^\circ$  et  $46,7$  kPa. Les grains ne semblent pas subir d'attrition ou de déformation pendant les essais. La contrainte normale appliquée reste relativement peu élevée tout comme l'énergie de compactage. La figure 7 montre les courbes granulométriques du sol avant essai et après essai. Après essai, les prélèvements de sol ont eu lieu dans la zone de cisaillement. A partir de la figure 8, on constate que la courbe de déplacement horizontal en fonction de la résistance au cisaillement a une allure similaire. Pour la variation de la valeur pic de la résistance au cisaillement, on note un coefficient de variation de 9,4 % pour la contrainte normale de 50 kPa et un coefficient de variation de 1,1 % pour la contrainte normale de 150 kPa.

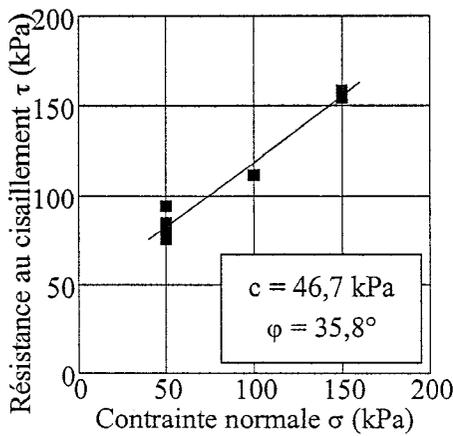


Fig.6: Courbe intrinsèque du matériau issu du remblai

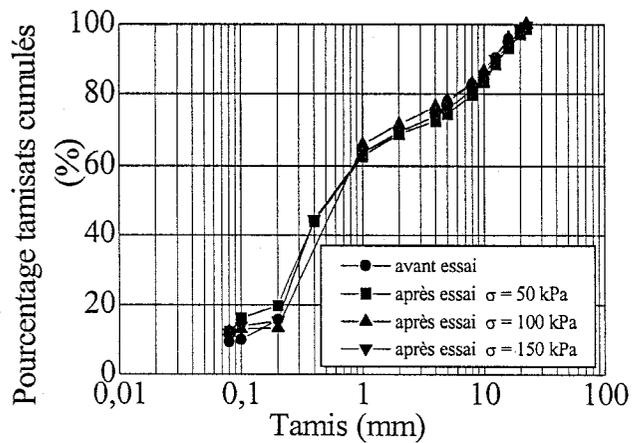


Fig.7: Courbes granulométriques du matériau issu du remblai avant et après essai

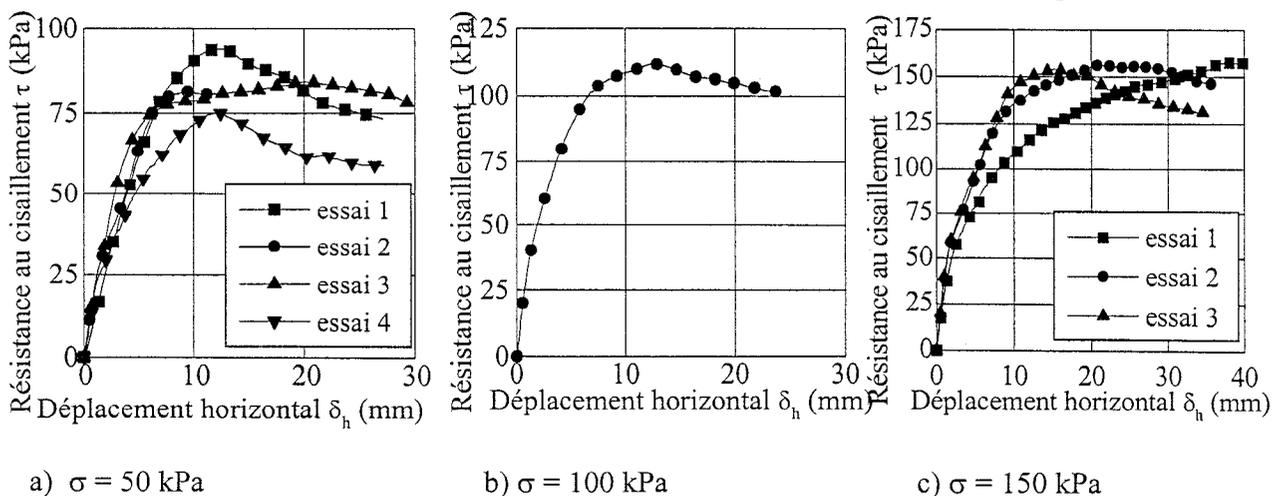


Fig.8: Exemples de résultats d'essais de répétabilité pour un sol naturel écrêté pour 0/25 mm, issu d'un remblai

### 6.3. Influence de la taille du grain

La variation de la résistance au cisaillement est aussi influencée par le diamètre maximal du grain. Il peut influencer sur la valeur de la cohésion et de l'angle de frottement. Avec l'augmentation du diamètre maximal des grains, la valeur de  $c$  et de  $\varphi$  augmente. Ceci est montré dans le tableau 1.

Boîte (mm)	Sol, $D_{\max}$ (mm)	t (mm)	c (kPa)	$\varphi$ (°)
500x500	naturel, 0/50	12	56,4	38,5
500x500	naturel, 0/80	12	59,8	40,2

Tableau 1: Effet de la taille des grains d'une grave alluvionnaire : résultats d'essais

On aboutit aux mêmes tendances que celles données par Vallé [1]. Les essais de cisaillement direct effectués par Vallé [1] ont été réalisés à l'aide de la grande boîte et avec le même matériau testé. Il obtient une valeur de  $c$  égale à 39,3 kPa, et une valeur de  $\varphi$  égale à 40,1° pour un matériau écrêté à 25 mm et une valeur de  $c$  égale à 65,2 kPa, et une valeur de  $\varphi$  égale à 45,6° pour les matériaux écrêtés à 50 mm.

### 6.4. Influence de l'espacement entre les demi-boîtes

L'espacement entre les demi-boîtes peut influencer la valeur de la cohésion. Les essais sur l'effet de l'espacement, ont été réalisés à l'aide de la grande et de la petite boîte. Les résultats de ces essais sont montrés dans le tableau 2.

Boîte (mm)	Sol, $d_{\max}$ (mm)	t (mm)	c (kPa)	$\varphi$ (°)
500x500	naturel, 0/50	12	56,4	38,5
	naturel, 0/50	25	46,0	39,4
	naturel, 0/50	50	30,0	38,8
250x250	remblai, 0/25	6	31,6	42,5
	remblai, 0/25	12	35,8	40,5
	remblai, 0/25	25	48,1	31,8

Tableau 2: Influence de l'espacement entre les demi-boîtes : résultats d'essai

A partir du tableau 2, on constate, dans le cas de la grande boîte, que l'augmentation de l'espacement peut faire diminuer la valeur de la cohésion mais la valeur de l'angle de frottement  $\varphi$  reste peu changée. Ces résultats confirment ceux de Vallé [1], Shirdam [8] et Nichiporovitch et Rasskazov [5] qui ont montré que: si l'espacement croît, la cohésion diminue et  $\varphi$  reste constant. Cependant, les résultats obtenus dans le cas de la petite boîte ne conduisent pas aux mêmes conclusions. L'influence de l'espacement des demi-boîtes dépend de la dimension de la boîte..

### 6.5. Influence de la dimension géométrique de la boîte

La variation de la résistance au cisaillement d'un sol grossier alluvionnaire est influencée aussi par l'effet d'échelle dû à la dimension de la boîte. Le tableau 3 donne les résultats des essais: La valeur de  $c$  augmente avec la dimension de la boîte alors que  $\varphi$  décroît. Les variations observées entre les boîtes de 500 et de 250 mm sont respectivement de 10,9 kPa et de 4,7 degrés.

Boîte (mm)	Sol, $d_{\max}$ (mm)	t (mm)	c (kPa)	$\varphi$ (°)
500x500	remblai, 0/25	12	46,7	35,8
250x250	remblai, 0/25	12	35,8	40,5
250x250	naturel, 0/25	12	48,7	42,1

Tableau 3: Effet de la taille de la boîte : résultats d'essais

### 6.6. Autres résultats

L'essai réalisé en utilisant un sol naturel 0/25 mm et un espacement de  $D_{\max}/2$  montre que les valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement dépend de l'angularité des particules de sol et sont plus élevées pour un matériau naturel neuf que pour un sol réutilisé du remblai (cf tableau 3).

Les caractéristiques mécaniques obtenues à partir d'essais de cisaillement direct à l'aide de la grande boîte donnent des valeurs de  $c$  supérieures à celles obtenues à partir des essais triaxiaux. Vallé [1] obtient sur le même matériau une valeur de la cohésion  $c$  égale à 43,8 kPa et un angle de frottement  $\varphi$  égal à 39°. Il a utilisé un appareil triaxial avec des éprouvettes de 150 mm de diamètre et de 300 mm de hauteur. Les éprouvettes étaient compactées à l'aide d'un marteau vibrant (cf tableau 3).

### 7. Conclusions

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques du sol de Criquebeuf-sur-Seine, des essais à l'aide d'une grande et d'une petite boîte cisaillement, ont été réalisés. Pour ces essais, le diamètre maximal des grains a été limité à 25, 50 et 80 mm.

Les résultats montrent que ces caractéristiques sont influencées par l'espacement des demi-boîtes, la taille des grains de sol et la dimension géométrique de la boîte. Dans le cas de la grande boîte, la valeur de la cohésion diminue alors que la valeur  $\varphi$  reste constante lorsque l'espacement augmente. Avec l'augmentation du diamètre maximal du grain, les valeurs de  $c$  et de  $\varphi$  croissent dans le cas des essais à la grande boîte. Pour l'effet d'échelle géométrique de la boîte, on note qu'à la petite boîte, on obtient une valeur plus élevée de la cohésion et de l'angle de frottement interne qu'à la grande boîte.

## 8. Références bibliographiques

1. Vallé, N., (2001), *Comportement mécanique d'un sol grossier d'une terrasse alluvionnaire de la Seine*, thèse de doctorat Université de Caen, 297 p
2. Charles, J.A., (1989), *General report / discussion session 8: geotechnical properties of coarse grained soil*, Proceedings of the Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, volume 4, pp. 2495-2519.
3. Craig, R.F. et Susilo, B.S., (1986), *Mekanika tanah*, Erlanga éditeur, 374 p.
4. Holtz, W.G et Willard, E., (1961), *Triaxial shear characteristics of clay gravel soils*. Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, volume 1, pp. 143-149.
5. Nichiporovitch, A.A. et Rasskazov, L.N., (1967), *Shear strength of coarse fragmental materials*, Proceedings of the Geotechnical Conference, Oslo, volume 1, pp. 225-229.
6. Perrot, A., (1968), *Etude de la résistance au cisaillement des matériaux grossiers*, Rapport interne du laboratoire des Ponts et Chaussées, Nancy, 40 p.
7. Brady, K.C. Awcock, I. et Wightman, R., (1983), *A comparison of shear strength measurements using two sizes of shear box*, TRRL Laboratory Report, n°1101, 25p.
8. Shirdam, R., (1998), *Comportement mécanique des matériaux superficiels des versants naturels*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 217 p.