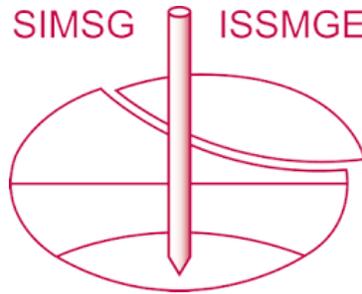


# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Écueils de la mesure en laboratoire du comportement mécanique des sols grossiers

## Difficulties with measurement of coarse soils behavior in laboratory

Philippe Reiffsteck – *Chargé de Recherche, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58 Boulevard Lefebvre 75732 Paris cedex 15 France*

Jean-Claude Blivet – *Ingénieur de Recherche, Laboratoire des Ponts et Chaussées de Rouen, CETE Normandie-Centre, BP 245 76121 Grand-Quevilly Cedex France*

Nilton Valle – *Ingénieur, Département des Routes de Santa Catarina, 46 Rue Tenente Silveira 88030-300 Florianópolis SC – Brésil*

Matoren Khay – *Ingénieur de Recherche, Centre d'Expérimentation Routière, CETE Normandie-Centre, BP 245 76121 Grand-Quevilly Cedex France*

**RÉSUMÉ:** La difficulté de mesurer leurs propriétés mécaniques est une des caractéristiques des sols grossiers. À partir d'un même matériau (une grave alluvionnaire), sont présentés les résultats d'essais effectués avec des boîtes de cisaillement direct de différentes dimensions (jusqu'à 500 mm de côté) et avec un appareil triaxial dont le diamètre des éprouvettes est 150 mm et qui permet la mesure locale des déformations. Ces résultats sont complétés par d'autres mesures de comportement disponibles dans la bibliographie. Une analyse critique de ces essais est présentée. Sont abordées les questions d'échelle dans les deux types d'essai (à la boîte et au triaxial) ; il est observé que les recommandations inscrites dans les normes d'essais demandent à être modifiées afin de pouvoir les appliquer aux matériaux grossiers.

**ABSTRACT:** A characteristic feature of coarse soils is the difficulty in measuring their mechanical properties. This paper presents the results of tests carried out on a given material (alluvial gravel), using direct shear boxes of varying sizes (sides of up to 500 mm) and a triaxial instrument with test samples 150 mm in diameter, with measurement of local deformations. The results are complemented by other behavior measurements that are provided in the bibliography. A critical analysis of these tests is presented. The issue of scale effects in the two types of test (direct shear and triaxial instruments) is discussed; the recommendations included in test standards are observed to be in need of modifications so that they may be applied to coarse materials.

## 1 INTRODUCTION

Ce travail a été initié dans le cadre d'une recherche sur les sols grossiers menée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées avec pour objectif de préciser l'influence du mode de reconstitution, du mode de compactage et du type d'essai sur les paramètres mécaniques usuels. Une fois choisi un matériau de référence, nous avons entrepris une campagne d'essais paramétriques mettant en œuvre différentes techniques de reconstitution habituellement utilisées, plusieurs appareillages aptes à tester les sols grossiers ainsi qu'un remblai expérimental destiné à servir de référence.

## 2 PRÉSENTATION DES EXPÉRIMENTATIONS

### 2.1 Description et caractéristiques du matériau

Le matériau est un tout venant de graves naturelles 0/80 mm provenant du dépôt alluvionnaire, silico-calcaire de la terrasse de la Vallée de Seine, extrait de la carrière de Criquebœuf sur Seine (Seine-Maritime). Le tableau 1 donne les caractéristiques d'identification du matériau.

Tableau 1. Caractéristiques du matériau

Matériau	Naturel	Ecrêté à 25 mm	Enl/Subst à 25mm
dmax (mm)	80	25	25
% < 80 µm	8,3	10,4	8,7
% < 5 mm	54,2	67,8	55,5
Cu	80	32	70
Cc	0,17	0,58	0,30

Les courbes granulométriques de la grave 0/80 mm et des fractions écrêtées à 25 mm sont données sur la figure 1. Sont également représentées les courbes granulométriques moyennes des matériaux après enlèvement de la classe 25/80 et substitution par la même quantité pondérale de 6,3/25 ainsi que les courbes granulométriques des matériaux utilisés pour les remblais expérimentaux criblés avec un matériel de carrière. Le premier des remblais (appelé petit remblai) décrit dans cette communication

est un remblai de petite taille construit au préalable pour valider la faisabilité du remblai d'étude.

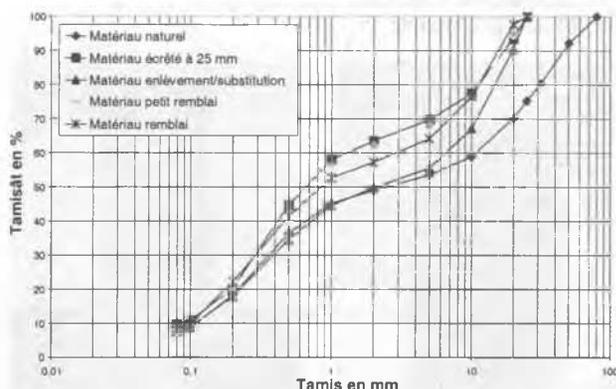


Figure 1. Courbes granulométriques moyennes des matériaux utilisés.

### 2.2 Essais à la boîte de cisaillement

Les essais ont été réalisés dans les boîtes de cisaillement direct de 500 mm et 250 mm (figure 2) composées de deux demi-boîtes de hauteur 150 mm et 100 mm respectivement.

Les éprouvettes ont été confectionnées en trois couches, la première de 90 mm, la deuxième de (100 + t) mm et la troisième de 60 mm pour la boîte de 500 mm et de 35 mm pour la première, (60 + t) mm pour la deuxième et 30 mm pour la troisième couche, pour la boîte de 250 mm. La deuxième couche est toujours centrée au niveau de la surface de cisaillement. La hauteur de l'éprouvette a été toujours égale à la moitié de la dimension de la boîte plus l'espacement entre les deux demi-boîtes.

Pour obtenir la boîte de 250 mm, on vient placer dans l'équipement de la boîte de 500 mm, deux demi-boîtes de 250 mm, dont la hauteur totale est de 200 mm (100 mm pour chaque demi-boîte). Au fond, nous avons mis une plaque de 40 mm de hauteur, pour que l'éprouvette ait la même épaisseur dans la partie inférieure que dans la partie supérieure.

L'espacement ( $t$ ) entre les deux demi-boîtes a été fixé à  $d_{max}/2$  pour tous les essais. On a utilisé l'espacement de 25 mm ; 12 mm ; 6 mm et 5 mm pour les matériaux avec  $d_{max} = 50\text{mm}$  ; 25 mm ; 12,5 mm et 6,3 mm.



Figure 2. Boîte de cisaillement.

### 2.3 Essais triaxiaux

Nous avons effectué des essais triaxiaux consolidés sur des éprouvettes de 150 mm de diamètre non saturées selon la norme NF P 94-074 (AFNOR, 1994). La consolidation isotrope a été faite pendant 15 heures avec l'application d'une contrainte correspondant à la contrainte radiale choisie (50kPa ou 100kPa ou 150kPa). La vitesse d'essai de cisaillement a été fixée à 0,1 mm/min, jusqu'à la déformation de 10% (figure 3 à gauche). Pendant l'essai, nous n'avons mesuré que la déformation axiale et le déviateur de contrainte, une fois que la contrainte radiale a été maintenue constante.

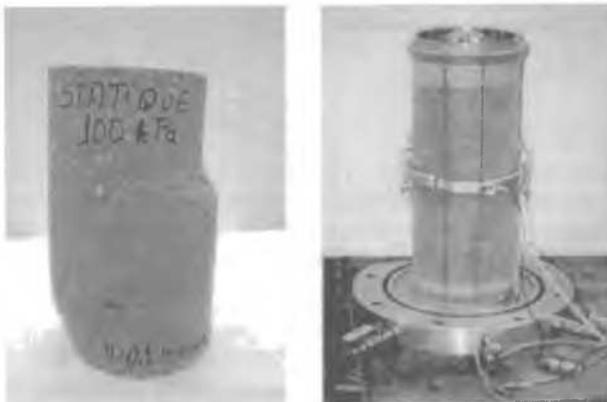


Figure 3. Eprouvette équipée et cisailée.

L'emploi d'un appareillage autorisant la mesure locale des déformations axiales et radiales a permis, d'une part, d'obtenir le module de déformation à partir de mesures effectuées dans la partie centrale de l'éprouvette, zone où les déformations sont les plus homogènes et, d'autre part, autorise la mesure de la variation de volume même pour les éprouvettes non saturées (figure 3 à droite).

## 3 PROTOCOLE DE RECONSTITUTION

Les différents protocoles de compactage en laboratoire et en place ont été définis de façon à se rapprocher des conditions de chantier. Un élément important de cette étude a été la réalisation d'un remblai expérimental reproduisant les conditions de mise en œuvre du chantier et au sein duquel des éprouvettes ont été prélevées par bloc. En complément, ce remblai a été l'objet

d'essais usuellement pratiqués pour juger de la bonne mise en œuvre des matériaux.

### 3.1 Compactage quasi-statique

Pour le compactage quasi-statique, une presse de moulage des éprouvettes de laboratoire a été utilisée. L'éprouvette est compactée par un piston qui applique une charge verticale de 40 kN dans un moule métallique.

Une masse de matériau, de teneur en eau et masse connues, a été introduite dans le moule de volume défini, qui contient une embase métallique (le disque d'espacement de l'essai Proctor). La procédure de compactage consiste à faire pénétrer le piston dans le moule qui s'appuie sur une embase métallique. Ensuite, le moule est renversé et, après, le piston est appliqué de l'autre côté. Nous avons utilisé cette procédure jusqu'à la déformation maximale possible. Avec cette procédure, nous avons réussi à obtenir 97 à 98% de la masse volumique maximale de l'essai Proctor normal.

### 3.2 Compactage par vibrocompression

Nous avons utilisé un dispositif de vibrocompression pour confectionner en laboratoire des éprouvettes de densité et de teneur en eau prédéterminées.

Le moule et le matériau qu'il contient subissent les effets :

- d'une compression simple dirigée selon l'axe du cylindre ;
- d'une vibration forcée dont la résultante multidirectionnelle est contenue dans un plan perpendiculaire à ce même axe. L'action combinée de cette compression et de cette vibration provoque un réarrangement du sol qui conduit très rapidement aux compacités souhaitées.

### 3.3 Compactage par marteau vibrant

Le matériau a été compacté en trois couches avec un marteau vibrant qui disposait d'une dame de compactage constituée d'un mouton cylindrique de 150 mm de diamètre.

Une membrane en latex (identique à celle de l'essai triaxial) est mise à l'intérieur du moule pour minimiser le frottement sol-moule. Une couche mince de graisse est interposée entre le moule et la membrane de façon à réduire le coefficient de frottement. La charge est appliquée sur toute la surface de l'éprouvette et l'on suit l'opération à l'aide d'un dispositif de contrôle de hauteur pour chaque couche. La membrane de compactage a été enlevée pour la réalisation de l'essai triaxial.

### 3.4 Compactage avec la dame Proctor

Nous avons utilisé le même moule et la même façon de préparer l'éprouvette que pour le compactage par marteau vibrant (§ 3.3.). Nous avons compacté le matériau en trois couches avec la dame dite « Dame Proctor Modifié » en donnant 56 coups à chaque couche. L'énergie de compactage correspond à celle de l'essai Proctor normal. Après le compactage, nous avons arasé l'excédent du matériau au niveau du moule et enlevé la membrane pour la réalisation de l'essai triaxial.

### 3.5 Compactage du remblai

Nous avons réalisé un remblai de 18,00 m<sup>2</sup> en trois couches de 35 cm compactées. Le matériau a été mis en place avec une teneur en eau naturelle ( $w = 9,3\%$ ) très proche de la teneur optimum déterminée par l'essai proctor normal ( $w_{OPN} = 9,2\%$ ). Nous avons appliqué le protocole de compactage défini par le GTR afin d'atteindre l'objectif de densification q4 c'est-à-dire 95% de l'OPN (SETRA, 1992). Pour chaque couche de 45 cm de matériau étalé, selon le GTR, nous avons réalisé 4 passes du rouleau VP-12.

Ce remblai a fait l'objet de nombreux essais. La géométrie a été suivie par nivellement optique de chaque couche en 10 points

différents. La densité a été contrôlée à l'aide d'un gammadensimètre à pointe à profondeur variable (GPV 25-40) en 4 points pour la couche inférieure et par une double sonde GDS 200 en 2 points pour toute l'épaisseur du remblai. Les essais mécaniques ont consisté en trois essais avec le pénétromètre dynamique PDG 1000, trois essais à la plaque de diamètre 600 mm ainsi que deux essais pressiométriques.

Sur place, nous avons taillé à la main douze éprouvettes pour réaliser des essais triaxiaux qui serviront de référence pour juger les protocoles appliqués en laboratoire.

## 4 RESULTATS

### 4.1 Influence du mode de reconstitution sur les paramètres mécaniques

Nous avons comparé sur la figure 4, l'influence de la technique de reconstitution du matériau sur les résultats obtenus avec la boîte de cisaillement. Les matériaux mis en œuvre sont un 0/25, 0/12,5, 0/6,3. On observe une certaine dispersion des résultats.

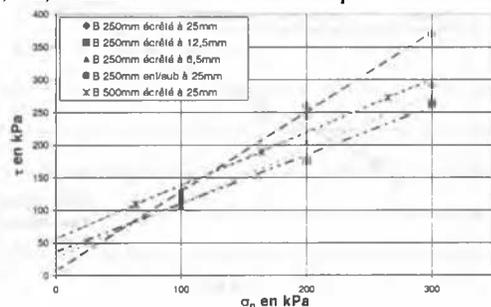


Figure 4. Courbe intrinsèque pour l'essai de cisaillement direct à la boîte.

En effet, l'angle de frottement interne varie peu alors que la cohésion décroît avec le  $d_{max}$  (tableau 2).

Tableau 2. Résultats des essais de cisaillement à la boîte.

Mode	boîte	c (kPa)	$\phi$ (°)
Ecrêtage à 25 mm	250 mm	56,5	39,2
Ecrêtage à 12,5 mm	250 mm	36,0	36,6
Ecrêtage à 6,5 mm	250 mm	26,8	39,8
Enlèv./Subst à 25 mm	250 mm	7,5	50,6
Ecrêtage à 50 mm	500 mm	65,3	45,6
Ecrêtage à 25 mm	500 mm	56,1	38,8
Enlèv./Subst à 50 mm	500 mm	59,7	43,2

On ne peut conclure sur un sens de variation de l'angle de frottement avec  $d_{max}$  alors qu'il semble que l'engrènement des particules grossières génère une cohésion apparente. La plus grande différence est observée pour la technique d'enlèvement substitution.

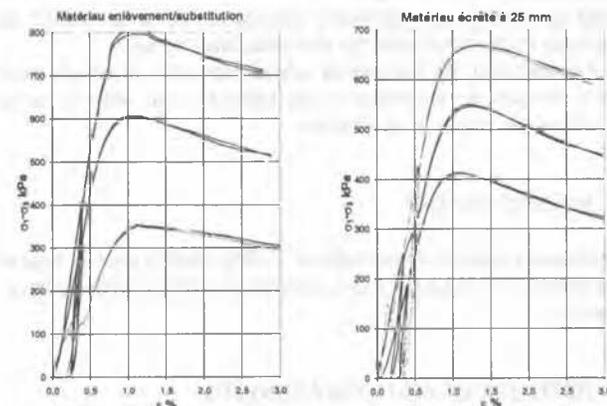


Figure 5. Essai triaxial de précision CD Non Saturé -  $\sigma_3 = 50 ; 100$  et  $150\text{kPa}$

La figure 5 présente deux résultats d'essais triaxiaux de précision. Généralement, les valeurs de modules tangents initiaux obtenues pour le matériau du remblai et les matériaux écrêtés sont inférieures à celles obtenues par les techniques de reconstitution, cependant cette différence s'estompe lorsque l'on s'intéresse aux modules de déchargement rechargement (tableau 3).

Tableau 3. Résultats des essais triaxiaux  $\sigma_3=100\text{ kPa}$  ( $d_{max}=25\text{ mm}$ ).

Matériau	compactage	$E_{tan}$ (MPa)	$E_{cycl}$ (MPa)
Remblai - 2 <sup>ème</sup> couche	rouleau	33,8	117,3
Remblai - 1 <sup>ère</sup> et 2 <sup>ème</sup> couche	rouleau	24,7	-
Matériau du Remblai	statique	66,5	134,0
Ecrêté laboratoire	statique	73,1	141,5
Enlèv./subst. laboratoire	statique	92,8	178,6

### 4.2 Influence du mode de compactage

#### 4.2.1 Sur la densité

Pour vérifier l'homogénéité de la masse volumique le long des éprouvettes triaxiales, nous les avons auscultées au Banc gamma densimétrique avec des mesures à chaque centimètre suivant la génératrice. Nous observons de manière évidente les zones d'intercouches avec des pics de densité. Les densités sont plus élevées pour le "marteau vibrant" et le "Proctor" et plus faibles pour la vibrocompression, mais toutes sont proches de celle de l'OPN  $\rho_d=2,03\text{ Mg/m}^3$ . L'éprouvette taillée dans le remblai voit sa densité chuter en fond de couche.

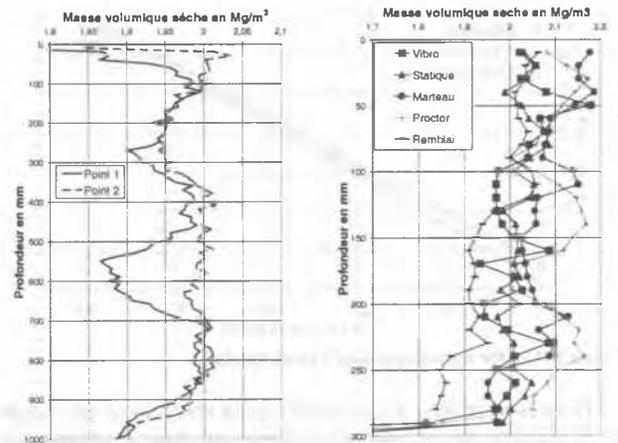


Figure 6. Profil de masse volumique pour le remblai et pour les éprouvettes triaxiales.

Pour voir la qualité du remblai, après sa réalisation, on a auscultée à la double sonde deux points, jusqu'à la profondeur de 1,0 m. La détermination de la teneur en eau a été faite tous les 10 cm en prélevant le matériau à l'aide d'une tarière manuelle. Pour toute la hauteur du remblai, la teneur en eau a varié de 8,4% à 10,0%, avec une moyenne de 9,3% et la masse volumique a varié de  $1,96\text{ Mg/m}^3$  à  $2,01\text{ Mg/m}^3$  en points individuels avec une moyenne de  $1,96\text{ Mg/m}^3$  et un Taux de Compactage (TC) de 96,7%.

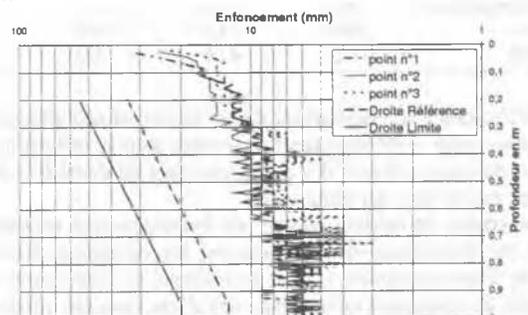


Figure 7. Profil pénétrométrique et courbes de référence (SETRA, 1992).

Les trois pénétrogrammes obtenus sur le remblai donnent toutes les mêmes tendances et montrent que le compactage obtenu est considéré de qualité, parce que les courbes obtenues sont à droite de la courbe de référence tout au long du profil (figure 7).

#### 4.2.2 Sur les paramètres mécaniques

Les courbes contrainte-déformation sont présentées à la figure 8, pour chaque modalité de compactage : laboratoire et remblai.

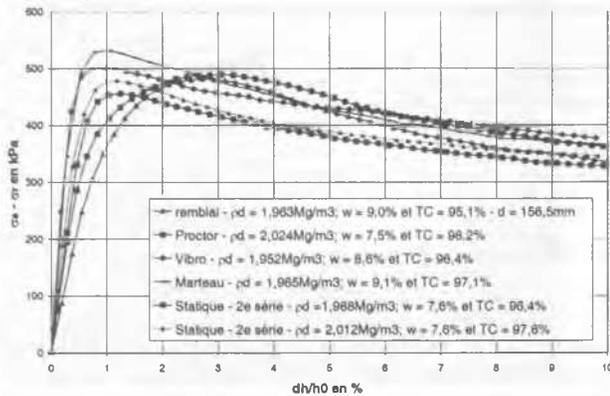


Figure 8. Essai Triaxial CU Non Saturé -  $\sigma_3 = 100\text{kPa}$

Les courbes intrinsèques de la figure 9 montrent les résultats de la cohésion et de l'angle de frottement interne du matériau obtenus au triaxial pour différents modes de compactage.

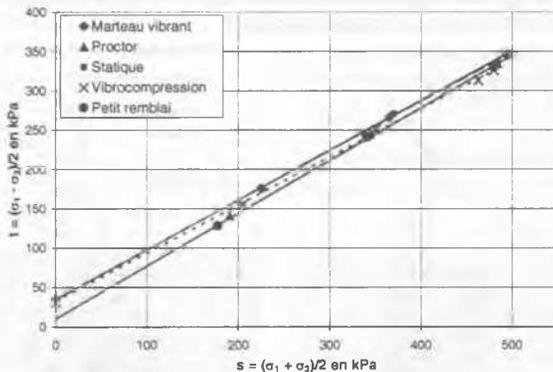


Figure 9. Courbe intrinsèque pour l'essai triaxial.

D'après le tableau 4, les valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement sont presque constantes, sauf pour le compactage Proctor et le remblai où la cohésion est plus faible et l'angle de frottement plus élevé. Ceci s'explique par la variation des caractéristiques du matériau pour le compactage Proctor et le remblai par rapport aux autres modalités. En effet, ceux-ci sont de même origine mais légèrement différents du fait de la variabilité naturelle du site (Valle, 1998).

Tableau 4. Résultats des essais triaxiaux pour  $\sigma_3=100\text{ kPa}$  au pic.

Mode	c (kPa)	$\phi$ (°)	$E_{tan}$ (MPa)
Marteau	43,8	39,0	125,8
Statique	43,8	39,2	64,1
Vibrocompression	39,7	37,8	116,0
Proctor	20,9	41,2	89,3
Remblai	13,4	42,0	43,0

La résistance au cisaillement du sol étudié est peu affectée par le processus de confection des éprouvettes pour la réalisation des essais triaxiaux, même s'il y a des gradients de densité et de teneur en eau le long des éprouvettes.

Par contre, le module tangent est beaucoup plus sensible au mode de compactage des éprouvettes, les variations allant au-delà du simple au double (figure 8 et tableau 4). Ceci montre que la façon de compacter un matériau agit d'une manière importante sur son comportement en déformation. Des phénomènes

d'écrouissage ou de surconsolidation sont probablement en jeu dans ces différents modes de compactage.

#### 4.3 Influence de l'appareillage

Nous avons comparé dans le tableau 5, les paramètres obtenus à partir de tous les essais réalisés. Nous constatons une grande cohérence des résultats (figure 10).

Tableau 5. Résultats pour différents types d'essais sur le matériau du remblai - compactage au rouleau sauf pour la boîte : marteau.

Essai	c (kPa)	$\phi$ (°)	$E_{tan}$ (MPa)	$E_{cycl}$ (MPa)
Boîte	56,5	39,2	-	-
Triaxial	19,0	41,1	37	117
Triaxial*	-	-	17,5	42,2
Plaque	-	-	19,9	41,9
Pressiomètre	-	-	13,8	37,2

\*modules calculés comme le module à la plaque

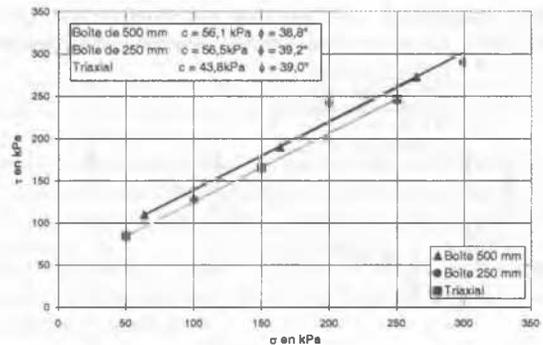


Figure 10. Courbes intrinsèques pour différents appareillages ( $d_{max}=25\text{ mm}$  - compactage au marteau)

Dans les conditions actuelles de sa pratique, l'essai à la boîte de cisaillement direct présente une dispersion plus importante que l'essai triaxial. Il est difficilement reproductible ; les conditions aux limites des appareillages et les procédures utilisées dans les différents laboratoires sont trop diverses. De plus, cet essai a tendance à surestimer la cohésion du matériau par une influence trop importante de l'effet d'engrènement sur les résultats. Il est donc nécessaire de proposer une standardisation de l'essai dans les grandes boîtes de cisaillement direct.

## 5 CONCLUSION

L'analyse des résultats des résistances au cisaillement mesurées sur des sols grossiers conduit à esquisser un modèle de comportement de ces sols à la rupture avec un partage entre un frottement du type Coulomb (paramètre intrinsèque du matériau) et une résistance due à l'engrènement des particules de sol qui dépend du niveau des contraintes appliquées, de la compacité du matériau et de l'amplitude des déformations imposées.

Globalement, les paramètres mécaniques sont surestimés pour les techniques de reconstitution par rapport à ceux obtenus sur le matériau mis en place sur chantier.

## 6 REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier le CNPq (Brésil) pour la bourse accordée à N. VALLE, ce qui a permis la réalisation de cette recherche.

## 7 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR (1994) Norme NF P 94-074. Essai à l'appareil triaxial de révolution - Appareillage, Préparation des éprouvettes, Essais UU, CU + u, CD.



SETRA-LCPQ(1992) GTR. Réalisation des remblais et des couches de forme.

VALLÉ N. (1998) Mesure de la résistance au cisaillement des sols grossiers à la boîte de cisaillement, Mémoire de DEA, ECP, 74 pages