

Mesures en laboratoire du comportement mécanique des sols hétérogènes

Philippe REIFFSTECK*

*Université Paris-Est,
Laboratoire central des ponts et chaussées,
Paris, France*

Jocelyn ARBAUT

Nadège SAGNARD

Matoren KHAY

*Centre d'études techniques de l'équipement
Normandie-Centre,
Grand-Quevilly, France*

Didier SUBRIN

Christian CHAPEAU

*Laboratoire régional des ponts et chaussées
de Lyon, France*

Daniel LEVACHER

Université de Caen, France

■ RÉSUMÉ

La difficulté de prélèvement et d'évaluation de leurs propriétés mécaniques est une des caractéristiques des sols grossiers. Cette difficulté est liée au rapport de taille entre le diamètre des plus gros grains du matériau et la dimension la plus faible de la cellule d'essai. À partir d'un même matériau (une grave alluvionnaire), on présente les résultats d'essais effectués avec des boîtes de cisaillement direct de différentes dimensions (jusqu'à 500 mm de côté et 600 mm de diamètre) et avec des appareils triaxiaux, dont le diamètre des éprouvettes est de 150 ou 300 mm, qui permettent la mesure locale des déformations. Le comportement mécanique déduit des résultats d'essais est complété par d'autres mesures de comportement réalisées sur un remblai instrumenté. L'objectif du programme expérimental était de mettre en évidence l'influence des modes de reconstitution et de compactage ainsi que du type d'essai sur les paramètres mécaniques comme la cohésion, l'angle de frottement interne et le module de déformation. Une analyse critique des résultats des essais est présentée. Les questions d'effets d'échelle sont abordées dans les deux types d'essai (à la boîte et au triaxial). Il apparaît que les recommandations inscrites actuellement dans les normes d'essais devraient être modifiées afin de pouvoir les appliquer aux matériaux grossiers.

Laboratory measurements of the mechanical behavior of heterogeneous soils

■ ABSTRACT

One of the main characteristics of coarse-grained soils is the difficulty involved in proceeding with extraction and evaluation of their mechanical properties. This challenge pertains to the size ratio between the diameter of the material's coarsest grain and the smallest test cell dimension. Based on a single given material (in this case, an alluvial gravel), this paper will discuss the results from tests conducted using differently-sized direct shear boxes (reaching up to 500 mm to a side and 600 mm in diameter) and with triaxial devices whose specimen diameter equals 150 or 300 mm, which enables measuring deformations locally. The mechanical behavior deduced from test results will be complemented by other behavioral measurements taken on an instrumented embankment. The objective of this experimental program has been to discern the influence of recompaction compaction modes along with the type of test on the range of mechanical parameters, such as cohesion, angle of internal friction and deformation modulus. A critical analysis of test results will also be presented. Questions related to scale effects will be raised for both types of tests (i.e. shear box and triaxial). As an outcome of this work, it appears that the set of recommendations currently listed in testing standards need to be modified for application to coarse-grained material.

***AUTEUR À CONTACTER :**

Philippe REIFFSTECK
philippe.reiffsteck@lcpc.fr

INTRODUCTION

Les matériaux grossiers, parce qu'ils comportent des gros éléments, sont très difficiles, d'une part, à prélever de manière intacte et, d'autre part, à caractériser d'un point de vue mécanique avec les moyens et appareillages habituels au laboratoire. Par conséquent, le dimensionnement des ouvrages

géotechniques qui les incorporent (fondations, soutènements, remblais, barrages) suscite des difficultés mal résolues. Fort de ce constat, une recherche a été entreprise sur les sols grossiers au sein du réseau technique des laboratoires des ponts et chaussées (LPC), 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. On peut citer à titre d'exemple l'enjeu de la détermination de la cohésion et de l'angle de frottement interne des sols grossiers pour le calcul de la stabilité de pentes ou d'ouvrages. Ces travaux font suite à de nombreuses études réalisées dans le réseau des LPC [1-3].

L'analyse bibliographique montre que les paramètres intervenant dans le comportement des sols grossiers sont la masse volumique, la nature et la forme des particules, la distribution granulométrique, la taille des particules, la teneur et la qualité des fines particules enrobant les gros éléments, la teneur en eau et les dimensions de l'équipement d'essai [4].

De nombreux auteurs ont étudié l'influence de la relation entre la taille de l'appareillage (L_0 pour la boîte, D_0 pour le triaxial) et la taille de la plus grosse particule (d_{max}) sur le comportement d'un sol grossier. Ils ont vérifié que cette relation jouait un rôle important dans la résistance au cisaillement d'un matériau grossier. Des essais de cisaillement direct ont été ainsi réalisés en faisant varier :

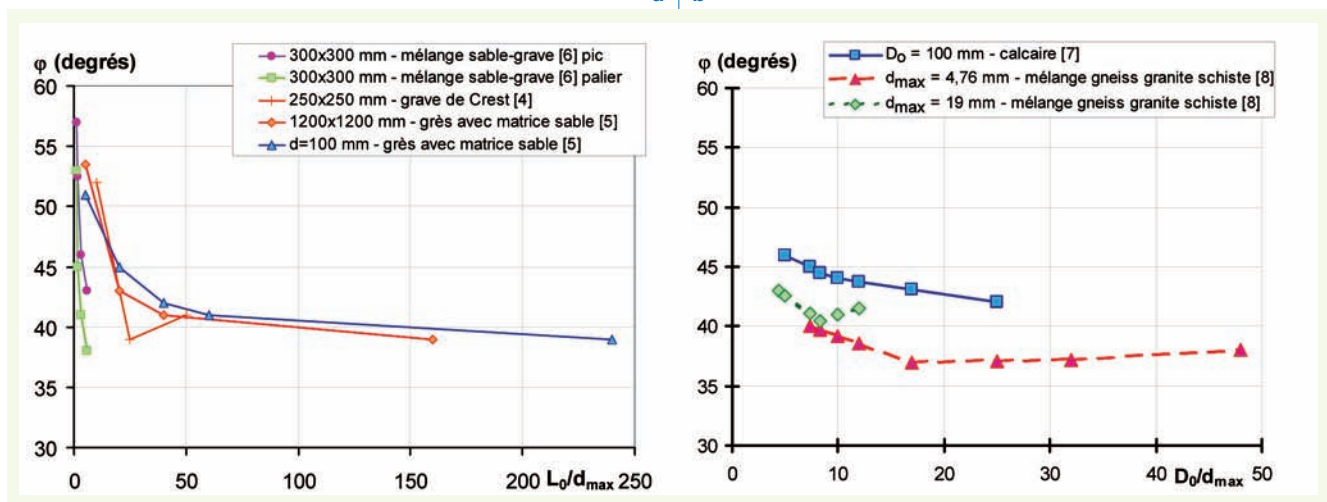
- la taille de la boîte : Fry *et al.* [5] ont utilisé une boîte carrée de 1 200 mm de côté et une ronde de 100 mm de diamètre pour réaliser des essais sur un grès très friable avec une matrice siliceuse dont le diamètre maximal était de 160 mm ;
- la courbe granulométrique : Santos *et al.* [6] ont préparé, à partir d'un même matériau ($d_{max} = 25$ mm), trois matériaux avec des courbes granulométriques parallèles pour faire des essais de cisaillement direct à la boîte carrée de 300 mm de côté.

Ces essais mettent en évidence la forte influence de la taille de l'appareillage sur les résultats expérimentaux. L'influence sur l'angle de frottement est exprimée en fonction du facteur d'échelle L_0/d_{max} (figure 1a). Les valeurs de L_0/d_{max} varient de 8 à 240. L'angle de frottement décroît quand L_0/d_{max} augmente et se stabilise pour des valeurs de L_0/d_{max} supérieures à 50. On obtient une forte augmentation de l'angle de frottement pour des valeurs de L_0/d_{max} inférieures à 25. Ces résultats ont été confirmés par des essais effectués par Vallé [4] sur un matériau grossier alluvionnaire originaire de Crest (Drôme).

Une étude similaire a été entreprise à l'appareil triaxial (figure 1b) :

- Fumagalli [7] a réalisé des essais triaxiaux avec un diamètre d'éprouvette D_0 de 100 mm sur un calcaire avec différentes granulométries ;
- Holtz et Gibbs [8] ont effectué des essais triaxiaux sur des éprouvettes de 35 mm, 82,5 mm, 152 mm et 229 mm de diamètre constituées de mélanges de graviers de gneiss, granite et schiste avec un diamètre d_{max} de 19 mm et sur un sable dont le diamètre d_{max} était de 4,76 mm.

figure 1
Angle de frottement en fonction du facteur d'échelle (D_0/d_{max} et L_0/d_{max}) :
- a : essais de cisaillement direct,
- b : essais triaxiaux.



Ils ont obtenu une réduction de l'angle de frottement interne avec l'augmentation du rapport D_0/d_{max} . Cette réduction est forte pour des valeurs $D_0/d_{max} < 10$.

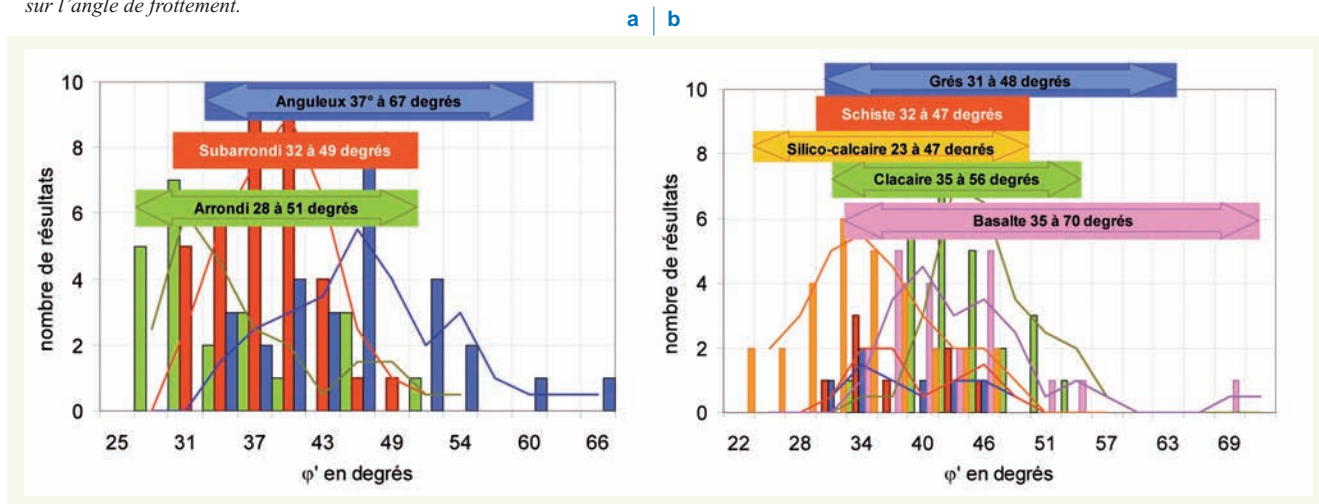
On peut donc conclure de ces études que le facteur d'échelle L_0/d_{max} doit être supérieur à 15 ou 20 pour la boîte de cisaillement quand le matériau possède une courbe granulométrique étalée et le double quand la graduation est uniforme. Pour l'appareil triaxial, le rapport D_0/d_{max} doit être égal à 6. Un rapport plus élevé peut être envisagé lorsque le matériau possède une granulométrie uniforme.

L'indice des vides, lié à la masse volumique sèche, est également un paramètre très important. L'angle de frottement interne est ainsi plus élevé pour les sols constitués de particules anguleuses que pour ceux formés de particules arrondies ; l'écart est de 10 degrés en moyenne (figure 2a). De plus, l'angle de frottement croît avec l'augmentation du coefficient d'uniformité (C_u). L'origine géologique du matériau influe également sur le comportement mécanique ; les valeurs de l'angle de frottement sont plus élevées pour les matériaux d'origine calcaire que pour des matériaux silico-calcaires (figure 2b).

La recherche avait pour objectif de juger de la pertinence des modèles rhéologiques adaptés à ces matériaux et des procédures de détermination de leurs paramètres en laboratoire ou en place, et comme finalité de pouvoir appréhender leur comportement au sein d'ouvrages : stabilité, déformation. Une fois choisi un matériau naturel de référence, une campagne d'essais paramétriques a été réalisée en 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. On s'est intéressé tout particulièrement à l'influence des modes de reconstitution et de compactage ainsi que du type d'essai sur les paramètres mécaniques comme la cohésion, l'angle de frottement interne et le module de déformation.

On note que l'assemblage naturel des grains, qualifié par leur distribution et leur répartition *in situ*, est fonction de la genèse du dépôt et ne peut, en aucun cas, être reproduit fidèlement en laboratoire.

figure 2
Influence de la forme (a) et de la nature (b) des grains sur l'angle de frottement.



PRÉSENTATION DES EXPÉRIMENTATIONS

■ Description et caractéristiques du matériau

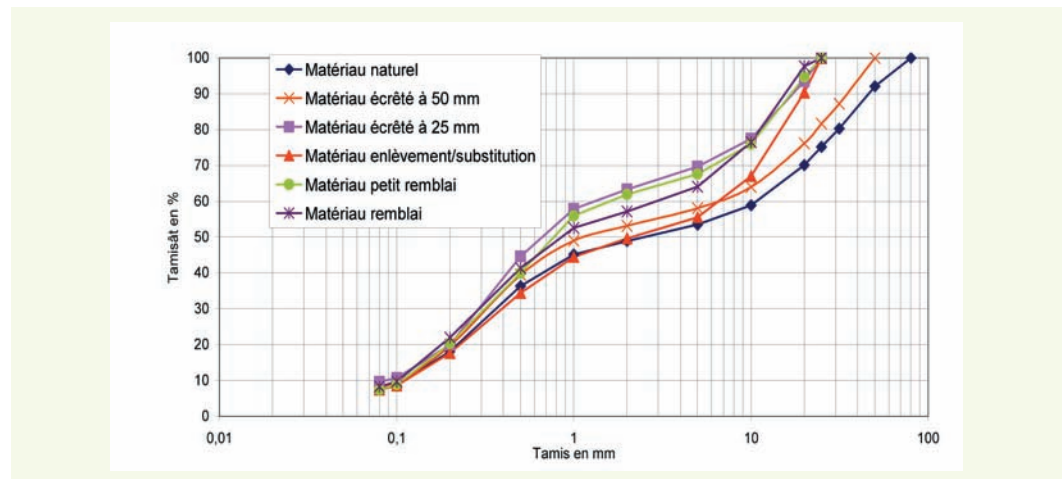
Le matériau de référence choisi pour cette étude est un tout venant de graves naturelles 0/80 mm provenant du dépôt alluvionnaire silico-calcaire de la terrasse de la Vallée de Seine, extrait de la carrière de Criqueboeuf-sur-Seine (Seine-Maritime) (tableau 1).

tableau 1
Caractéristiques du
matériau de Criquebeuf
sur-Seine.

Matériau	Naturel	Écrêté à 50 mm	Écrêté à 25 mm	Enlèvement/Substitution à 25 mm
d_{\max} (mm)	80	50	25	25
% < 80 μm	8,3	11,2	10,4	8,7
% < 5 mm	54,2	68	67,8	55,5
C_U	91	70	32	70
C_C	0,12	0,52	0,58	0,30

Les courbes granulométriques de la grave 0/80 mm et des fractions écrêtées à 50 et 25 mm sont présentées sur la **figure 3**. On constate que le matériau étudié présente une « bosse de sable », caractéristique commune aux graves silico-calcaires de la vallée de la Seine ; cette bosse est plus ou moins accentuée selon la teneur en calcaire, l'abondance et la répartition des silex. Cette particularité se traduit par des valeurs faibles du coefficient de courbure $C_C = d_{30}^2/d_{10} \cdot d_{60}$. On a également représenté 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 pour écrêtement à 25 mm. Le premier des remblais (appelé petit remblai), décrit dans cet article, est un remblai de petite taille construit au préalable pour valider la faisabilité du remblai d'étude (appelé remblai).

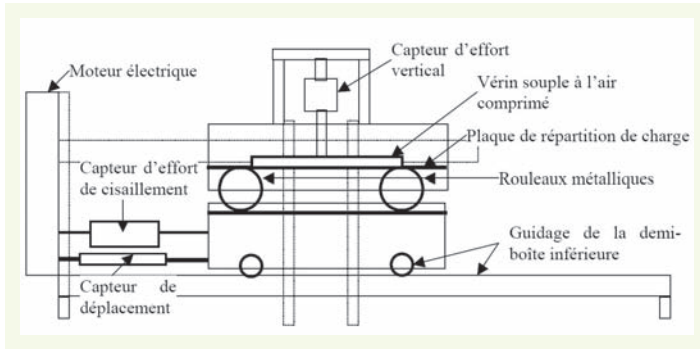
figure 3
Courbes granulométriques
moyennes des matériaux
utilisés.



■ Essais à la boîte de cisaillement

› Boîte de cisaillement carrée de 500 mm

Dans le cadre de cette recherche, la plupart des essais ont été réalisés dans la boîte de cisaillement direct de section carrée du centre d'expérimentation routière (CER) de Rouen. Il s'agit d'un prototype construit par le centre d'étude et de conception des prototypes (CECP) de Rouen dans les années 90, de 500 mm de côté, pouvant être ramené à 250 mm (**figure 4**), composé de demi-boîtes de hauteur 150 et 100 mm respectivement, séparées par un espacement (t) [4]. 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, une plaque de 40 mm de hauteur est mise en place pour que l'éprouvette ait la même épaisseur dans la partie inférieure que dans la partie supérieure. Les essais à la boîte de cisaillement sont effectués sur des matériaux non saturés, mis en place avec une teneur en eau et une masse volumique fixées préalablement par l'expérimentateur.



a | b

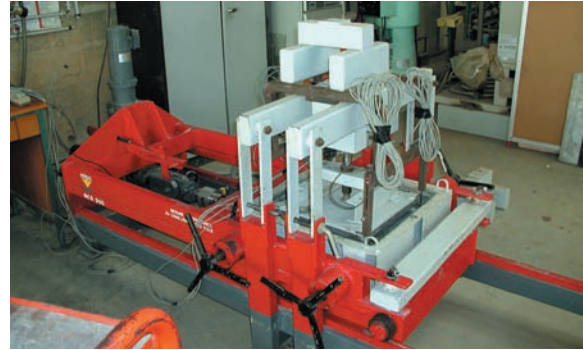


figure 4

Boîte de cisaillement direct
de section carrée du CER
de Rouen :
- a : principe de
fonctionnement,
- b : vue générale.

La machine d'essai de cisaillement repose sur une ossature métallique. Un vérin pneumatique souple permet d'exercer l'effort de compression vertical. Le châssis assure le système de guidage de la boîte. La demi-boîte inférieure se déplace lors de l'essai et un vérin à vis sans fin, entraîné par un moteur électrique dont la commande permet de sélectionner et de régler les vitesses de cisaillement, assure la traction.

Les éprouvettes ont été confectionnées en trois couches successives d'épaisseurs :

- 90 mm, (100 + t) mm et 60 mm pour la boîte de 500 mm ;
- 35 mm, (60 + t) mm et 30 mm 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 toujours été égale à la moitié de la dimension de la boîte plus l'espacement entre les deux demi-boîtes.

L'espacement (t) utilisé entre les deux demi-boîtes est un paramètre important de l'essai de cisaillement direct sur des sols ayant un diamètre d_{max} élevé. Comme cela a été relevé par Laréal *et al.* [9] et Bourdeau *et al.* [10] puis discuté par Shirdam *et al.* [11] et Vallé [4], cet espacement, lorsqu'il est trop faible, semble limiter le désenchevêtrement des particules dans le plan de cisaillement et conduire à des cohésions apparentes élevées. L'espacement (t) a été fixé à $d_{max}/2$ pour tous les essais décrits par la suite. On a utilisé des espacements de 25 mm, 12 mm, 6 mm et 5 mm pour les matériaux ayant des diamètres respectifs d_{max} de 50 mm, 25 mm, 12,5 mm et 6,3 mm.

> Boîte de cisaillement ronde de diamètre 600 mm

La machine d'essai de cisaillement pour sols grossiers du Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lyon (LRPC) a également permis de réaliser une partie des essais sur la grave alluvionnaire de Criquebeuf. Il s'agit d'un prototype confectionné par le CECP d'Angers dans les années 70 à partir d'un cahier des charges établi par le LRPC. Elle est d'un usage courant pour tester les matériaux constitutifs des sols renforcés. Le principe repose sur celui de la boîte de cisaillement direct de Casagrande, mais avec des dimensions adaptées pour tester des matériaux présentant de gros éléments sans induire d'effets d'échelle néfastes à l'interprétation des résultats. On présente ici le matériel d'essai, le principe de fonctionnement, la mise en œuvre des éprouvettes et le mode opératoire des essais [12].

Les machines de cisaillement sont classiquement pourvues d'un système de chargement vertical par l'intermédiaire d'un plateau rigide. La conception de la machine du LRPC repose sur l'application d'un effort vertical par l'intermédiaire d'un vérin pneumatique, avec l'avantage d'une transmission souple des efforts au sommet de l'éprouvette. Le schéma de principe est indiqué sur la **figure 5a**.

La boîte proprement dite est constituée de deux demi-boîtes en acier de diamètre 600 mm et de hauteur 300 mm. La machine d'essai (**figure 5b**) comporte une ossature métallique mécano-soudée, qui comprend le bâti et le plateau mobile recevant la demi-boîte inférieure. L'écartement entre les demi-boîtes est fixé au cours de l'essai en soulevant la demi-boîte supérieure maintenue immobile grâce à un col-de-cygne.

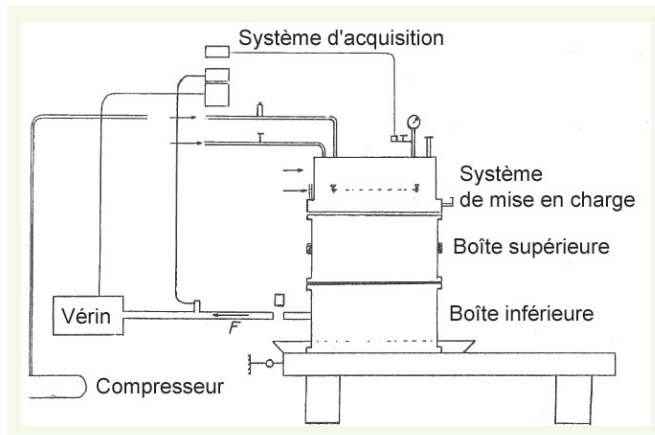


figure 5

Boîte de cisaillement direct de section circulaire du Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lyon :
- a : principe de fonctionnement,
- b : vue générale.

Le chargement vertical (contrainte maximale de 600 kPa) est assuré au moyen d'un vérin pneumatique appliquant les contraintes au matériau testé, par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc et d'un disque en plexiglas. Le système de chargement horizontal, exerçant un effort de traction (maximum 200 kN) sur la demi-boîte inférieure, comporte un vérin mécanique à vis entraîné par un moteur électrique avec des vitesses de cisaillement maintenues constantes au cours de l'essai. Les vitesses v prennent les valeurs suivantes : 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 ou 5 mm/min.

Le système de mesures des deux types de boîtes est composé :

- d'un capteur de force, avec affichage numérique, pour mesurer l'effort tangentiel ;
- d'un manomètre (capteur de pression) pour mesurer la contrainte normale ;
- d'un comparateur pour mesurer le déplacement relatif tangentiel entre les demi-boîtes ;
- de capteurs pour mesurer le tassement de l'échantillon pendant la consolidation.

■ Essais triaxiaux

> Appareil triaxial de diamètre 150 mm

Essai de référence pour la détermination de la résistance au cisaillement des sols, l'essai triaxial a été effectué pour la première série d'essais avec un appareillage triaxial classique. L'appareil triaxial de révolution est constitué d'une cellule triaxiale et d'un système de chargement comportant une presse et différents dispositifs de mise en pression et de mesure (figure 6). Des essais triaxiaux consolidés ont été effectués sur des éprouvettes de 150 mm de diamètre non saturées, selon la norme NF P 94-074 [13]. La consolidation isotrope a été faite pendant 15 heures avec l'application d'une contrainte correspondant à la contrainte radiale choisie (50, 100 ou 150 kPa). La vitesse d'essai de cisaillement a été fixée à 0,1 mm/min, jusqu'à une déformation égale à 10 %.

figure 6

Matériel d'essais triaxiaux et instrumentation de l'éprouvette du Laboratoire régional des ponts et chaussées de Rouen :
- a : vue d'ensemble,
- b : détail de la cellule de mesure.



a | b

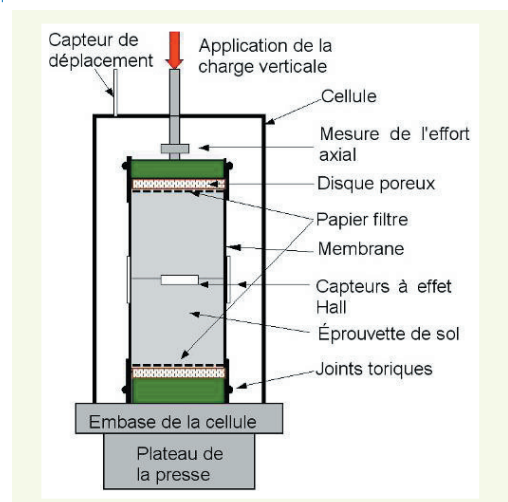
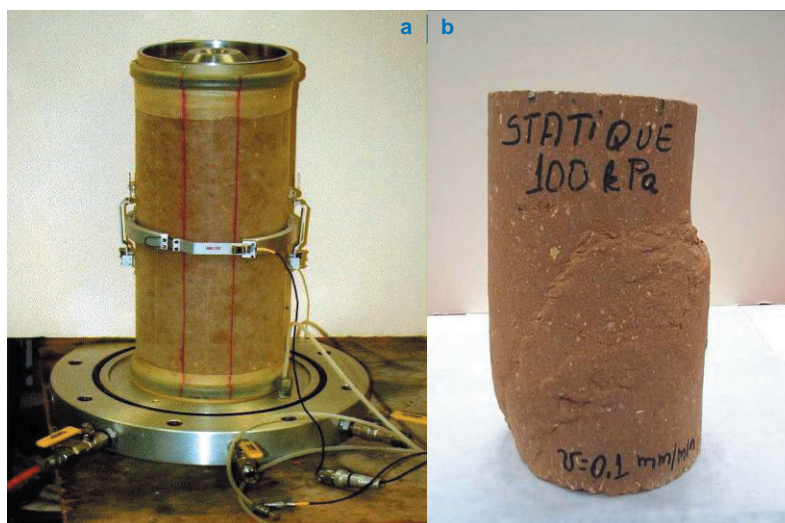


figure 7
Éprouvettes équipées d'un système de mesure locale des déformations axiales et cisailée.



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 de mesurer la variation de volume même pour les éprouvettes non saturées ou de maintenir le diamètre constant lors d'un essai de type Ko (**figure 7a et b**).

› Appareil triaxial de grandes dimensions

Une deuxième série d'essais a été réalisée avec un appareillage triaxial de grandes dimensions. En 1968, l'atelier des prototypes de Rouen a développé un appareil triaxial de grandes dimensions permettant d'effectuer des essais sur des éprouvettes de sol reconstitué de 300 mm de diamètre et 600 mm de hauteur (**figure 8**) [14]. Cet appareillage a été remis en activité en 2000 par le CECP de Rouen [15-17], avec pour objectifs d'être capable de réaliser des essais à vitesse de déformation constante ou à chemin de contrainte ou de déformation imposé. Par sa géométrie d'éprouvette et sa capacité technique en chargement statique, cet appareil est comparable à celui développé par le CERMES [18].

La spécificité de la structure de l'appareillage est que la cellule ne s'insère pas dans un bâti de réaction comme pour l'appareil classique décrit auparavant. Elle dispose de tirants périphériques procurant la réaction nécessaire. Une armoire spécifique regroupe la partie moteur et électronique ainsi que le circuit hydraulique.

La fonction déplacement axial à vitesse constante (ΔH) est réalisée par un moteur et une boîte de vitesses à sélection par embrayages électromécaniques. Elle permet d'obtenir une plage de vitesses de déplacement répartie en cinq gammes, entre 0,1 micron par minute et 10 mm/min.

Cette presse est complétée par deux « contrôleurs pression volume » (CPV), d'une capacité de 5 litres chacun, pour le maintien en pression de la cellule et de l'échantillon (**figure 8b**). Un CPV assure la mise en charge de la cellule dans la plage de 50 à 1 200 kPa. Un autre, identique à celui qui maintient la pression σ_c dans la cellule, assure la mise en pression de l'eau interstitielle au sein de l'éprouvette.

La pression interstitielle est mesurée par un capteur situé le plus près possible de la base de l'éprouvette. L'effort vertical est mesuré par un capteur immergé dans la cellule afin de s'affranchir des frottements sur le piston. Trois dispositifs pour la mesure des déformations de l'éprouvette sont mis en œuvre :

- mesure globale de la variation de hauteur de l'éprouvette ΔH : elle est mesurée à l'extérieur de la cellule sur le piston mobile. Son amplitude maximale est 15 %, soit 90 mm ;
- mesure locale sur le tiers central de l'éprouvette : du fait de la grande taille de l'éprouvette, la réalisation de mesures locales permettra d'atteindre le domaine des petites déformations (**figure 9**).

Elle consiste en la mesure des variations du périmètre central (capteur inséré dans une couronne qui encercle l'éprouvette) et de deux hauteurs (sur deux génératrices opposées) ;
 – mesure de la variation de volume ΔV à partir du volume d'eau interstitielle absorbée ou expulsée (sur le circuit de contre-pression) avec le déplacement du piston du CPV.

figure 8
 Appareil triaxial de grandes dimensions :
 - a : vue d'ensemble avec l'armoire de commande,
 - b : CPV.

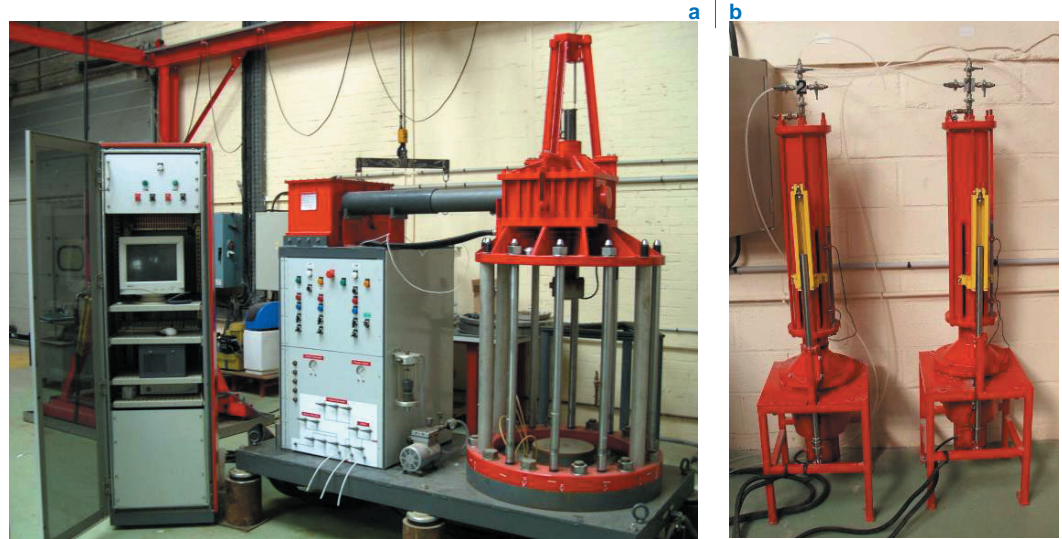
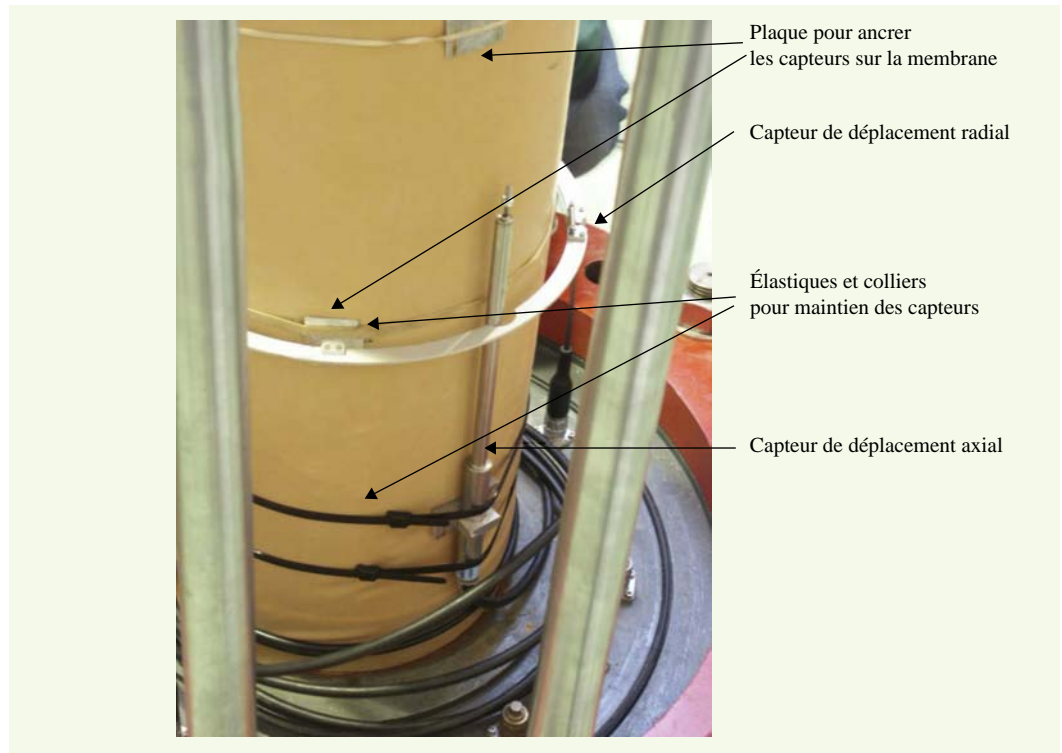


figure 9
 Mise en place du système de mesures locales sur le tiers central de l'éprouvette.



PROTOCOLES DE RECONSTITUTION DES MATÉRIAUX PAR COMPACTAGE

Les différents protocoles de compactage en laboratoire et en place ont été définis de façon à se rapprocher des conditions de chantier [15]. Ces protocoles ont servi à la reconstitution d'éprouvettes pour les essais triaxiaux sur éprouvettes de 150 mm. 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.

■ Compactage quasi statique

Pour le compactage quasi statique, une presse de moulage des éprouvettes de laboratoire a été utilisée. L'éprouvette est compactée en une seule couche par un piston qui applique une charge verticale de 40 kN dans un moule métallique (figure 10a). Une certaine quantité de matériau, de teneur en eau et de 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 l'embase métallique. Le moule est ensuite renversé et le piston est appliqué de l'autre côté. Cette procédure a été employée jusqu'à la déformation maximale possible. Avec cette procédure, on a réussi à obtenir 97 à 98 % de la masse volumique maximale de l'essai Proctor normal.

■ Compactage par vibrocompression

Un dispositif de vibrocompression a été utilisé pour confectionner en laboratoire des éprouvettes de densité et de teneur en eau prédéterminées (figure 10b). Le moule et le matériau qu'il contient subissent les effets d'une compression simple dirigée selon l'axe du cylindre et 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. Le compactage se fait en une seule couche.

■ 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 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.

■ Compactage avec la dame Proctor

Pour ce protocole, on a utilisé le même moule et la même façon de préparer l'éprouvette que pour le compactage par marteau vibrant. Le matériau a été compacté en trois couches avec la dame dite « dame Proctor modifié » en donnant 56 coups à chaque couche (figure 10c). L'énergie de compactage correspond à celle de l'essai Proctor normal. Après le compactage, l'excédent du matériau a été arasé au niveau du moule et la membrane enlevée pour la réalisation de l'essai triaxial.

figure 10
Éprouvettes reconstituées
par compactage statique
(a), vibro-compression (b),
dame Proctor (c) et taillées
dans le remblai (d).



■ Compactage du remblai

Un remblai de 18 m² a été construit 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 ($w_{OPN} = 9,2 \%$). Le protocole de compactage défini par le Guide des terrassements routiers (GTR) a été appliqué afin d'atteindre l'objectif de densification q_d , c'est-à-dire 95 % de l'optimum Proctor normal (OPN) [19]. Pour chaque couche de 45 cm de matériau étalé on a réalisé quatre passes d'un rouleau VP-12 [19].

Ce remblai a fait l'objet de nombreux essais. Sa 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 quatre points pour la couche inférieure et par une double sonde GDS 200 en deux 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 (figure 11).

figure 11
Mesures effectuées sur le remblai :
- a : double sonde,
- b : pénétromètre dynamique,
- c : essai de plaque.

Sur place, douze éprouvettes pour des essais triaxiaux ont été taillées à la main avec l'aide d'un tube guide de 152 mm de diamètre ; ces éprouvettes ont servi de référence pour juger les protocoles appliqués en laboratoire (figure 10d).



■ Compactage des éprouvettes pour les essais à l'appareil triaxial de grandes dimensions

Du fait de sa grande taille, l'appareil triaxial de 300 mm a soulevé des problèmes spécifiques de reconstitution des éprouvettes. Ainsi, dès sa mise en service, un bâti de compactage spécifique a été construit et utilisé pour des essais sur des sols reconstitués. La méthode de reconstitution des éprouvettes avait nécessité l'étude du nombre de couches à employer : 3, 6, 10, 15. Des mesures de compacité au banc gamma avaient été réalisées sur certaines éprouvettes [20].

Le protocole de confection des éprouvettes avec l'ancien bâti de compactage rénové (figure 12) a été mis au point après les essais de confection réalisés de 2003 à 2005 [21-22]. Le matériau est compacté en trois couches de 20 cm dans un moule constitué de deux demi-coquilles. Le compactage est réalisé avec le piston-marteau d'une masse de 200 kg fixée sur un vibreur à balourd de 50 Hz.

Un disque plein est fixé en fond de moule pour retenir le matériau et une géomembrane rigide découpée est glissée à l'intérieur pour éviter les frottements entre le moule et le sol. Une rehausse de 10 cm est nécessaire pour la mise en œuvre de la dernière couche foisonnée (figure 13).

En dehors du bâti de compactage, chaque couche de matériau est déversée dans le moule en une seule fois pour obtenir un maximum d'homogénéité de la couche. Pour ce faire, un dispositif de

pluviation conique avec trappe est utilisé avec une hauteur de chute choisie identique pour les trois couches (680 mm), hauteur ajustée avec un chariot élévateur. Cette procédure, en s'approchant au mieux d'un système de pluviation pour l'essai triaxial de laboratoire, permet de minimiser l'influence de différents paramètres (opérateur, répandage du matériau, débit d'écoulement, etc.).

Une fois le matériau déversé, le moule est fixé sur le bâti de compactage et une vibration est réalisée pendant 90 secondes. Après le compactage, le moule est transporté dans la cellule triaxiale ; les deux demi-coquilles sont ouvertes et la géomembrane rigide est enlevée. On installe ensuite le disque drainant supérieur et la membrane en latex est plaquée contre l'éprouvette à l'aide du manchon à dépression (figure 14). Les différentes phases de l'essai triaxial se succèdent après la mise en place de l'enceinte cylindrique.

figure 12
Confection d'une éprouvette avec le bâti de compactage (a) et mise en place dans l'appareil triaxial de grandes dimensions (b).

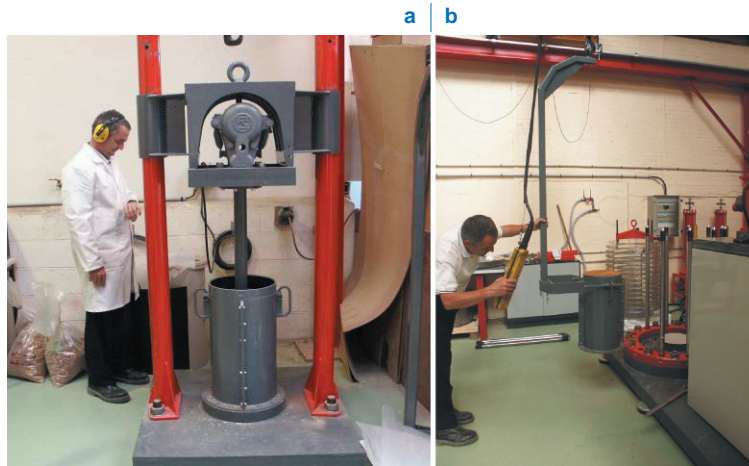
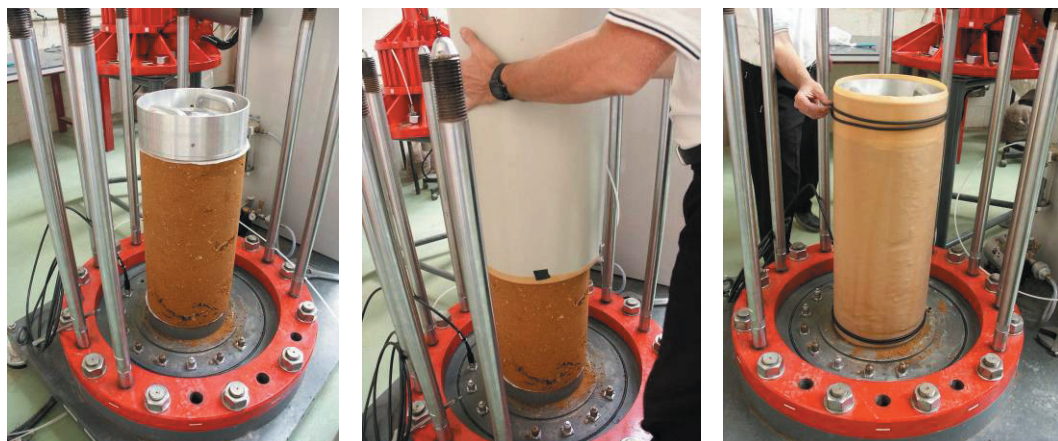


figure 13
Moule :
- a : rehausse,
- b : géomembrane.



figure 14
Phases successives de mise en place de l'éprouvette dans la cellule triaxiale de grandes dimensions.



INFLUENCE DES PARAMÈTRES ÉTUDIÉS SUR LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Le programme d'essai a été élaboré de manière à étudier l'influence du mode de reconstitution (écrêtage ou enlèvement de la fraction grossière et substitution par une fraction plus fine), du mode

de compactage (statique, vibrant, Proctor...) et du type d'essai (boîte de cisaillement ou appareil triaxial) sur les paramètres mécaniques comme la cohésion, l'angle de frottement interne et le module de déformation.

■ Influence du mode de reconstitution sur les paramètres mécaniques

On a étudié l'influence de la technique de reconstitution du matériau sur les résultats obtenus avec la boîte de cisaillement (figure 15). Les matériaux mis en œuvre ont les classes granulaires suivantes : 0/50, 0/25, 0/12,5, 0/6,3 avec ou sans enlèvement et substitution, comme indiqué dans le tableau 2. Ils sont compactés en trois couches avec un marteau vibrant. Malgré la réalisation d'essais systématiques, on constate une certaine dispersion des résultats.

Une augmentation de la résistance au cisaillement du sol est observée avec l'augmentation de la taille des grains du seuil d'écrêtage. Cette augmentation est notée sur les deux paramètres : la cohésion et l'angle de frottement. Toutefois, l'angle de frottement interne varie peu alors que la cohésion croît avec l'augmentation du paramètre d_{max} (tableau 2). Ce comportement est imputable à l'engrènement des grains qui fait varier la masse volumique du sol. Celle-ci croît pour une partie avec l'augmentation du diamètre des grains du matériau.

Les matériaux obtenus par écrêtage et par enlèvement et substitution à $d_{max} = 50$ mm fournissent des valeurs identiques de la cohésion c et de l'angle de frottement φ à même masse volumique et même teneur en eau. Cette conclusion est toutefois à pondérer par le résultat de l'essai pour $d_{max} = 25$ mm. De ce fait, 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 évolution de la cohésion avec d_{max} est observée pour la technique d'enlèvement et substitution à $d_{max} = 25$ mm.

Les résultats du tableau 2 sont présentés graphiquement sur la figure 16, qui représente la cohésion et l'angle de frottement en fonction de d_{max} . Le résultat d'essai avec $d_{max} = 25$ mm pour le mode

figure 15
Courbe intrinsèque pour
l'essai de cisaillement
direct à la boîte.

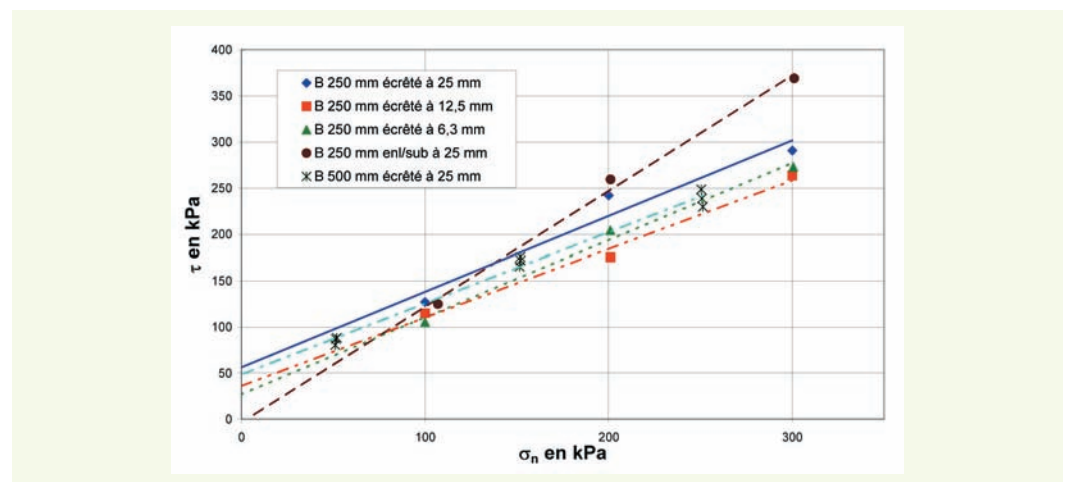


tableau 2
Résultats des essais de
cisaillement à la boîte [4].

Mode	Boîte	c (kPa)	φ (degrés)	w (%)	ρ_d (t/m ³)
Écrêtage à 25 mm	250 mm	56,5	39,2	8,4	1,99
Écrêtage à 12,5 mm	250 mm	36,0	36,6	9,4	1,94
Écrêtage à 6,3 mm	250 mm	26,8	39,8	9,7	1,93
Enlèv/Subst à 25 mm	250 mm	7,5	50,6	7,9	1,99
Écrêtage à 50 mm	500 mm	65,3	45,6	6,3	2,09
Écrêtage à 25 mm	500 mm	56,1	38,8	7,7	2,03
Enlèv/Subst à 50 mm	500 mm	59,7	43,2	6,3	2,07

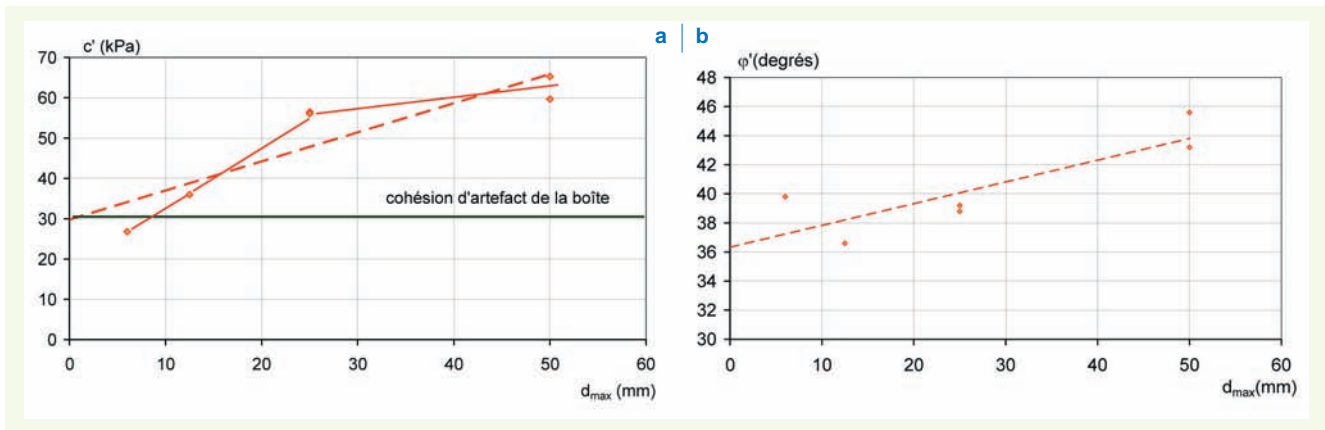


figure 16

Influence du diamètre maximal des grains sur les paramètres c' (a) et φ' (b) de résistance au cisaillement.

enlèvement-substitution est délibérément ignoré, car il traduit manifestement un critère très relevé et influencé notamment par le résultat à une contrainte verticale de 300 kPa, comme le montre la **figure 15**.

L'extrapolation vers un matériau hypothétique tel que $d_{max} = 0$ conduit à un angle de frottement intergranulaire de l'ordre de $\varphi_{\mu} = 36$ degrés. Cet angle de frottement intergranulaire est, par certains auteurs, considéré comme une composante de l'angle de frottement interne du matériau φ' en fonction de la densité [23, 24]. Pour un tel matériau « idéal » tel que $d_{max} = 0$, la cohésion c est nulle. Cette interprétation met en évidence une cohésion d'artefact du dispositif de l'ordre de $c_0 = 30$ kPa, en accord avec les observations de Shirdam [12]. Ces résultats permettent d'écrire la résistance au cisaillement du matériau sous la forme :

$$\tau_f = c(d_{max}) - c_0 + \sigma_n \tan(\varphi(d_{max})) \tag{1}$$

où :

$$\tan \varphi(d_{max}) = \tan \varphi_{\mu} + \lambda_{\phi} d_{max}$$

$$c(d_{max}) = c_0 + \lambda_c d_{max}$$

La résistance au cisaillement normalisée par l'état de contrainte verticale s'écrit sous la forme :

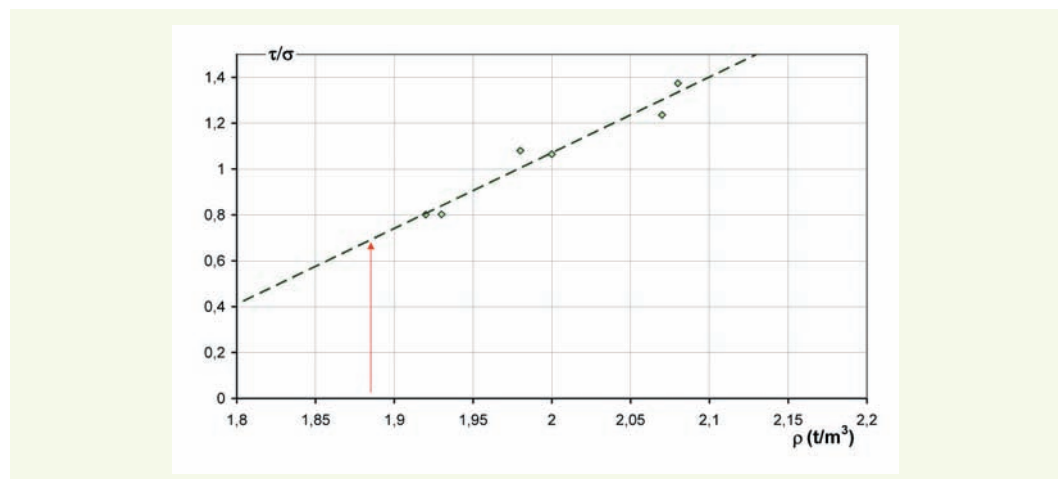
$$\tau_f / \sigma_n = \tan \varphi + (c - c_0) / \sigma_n \tag{2}$$

avec $c_0 = 30$ kPa, artefact de la boîte.

La **figure 17**, qui représente l'évolution de la résistance au cisaillement normalisée (pour une contrainte verticale de 100 kPa), montre que l'on peut intégrer la variation de l'angle de frottement

figure 17

Résistance au cisaillement normalisée en fonction de la masse volumique sèche.



et de la cohésion en fonction d'un seul paramètre qui est la masse volumique sèche, ou de manière équivalente l'indice des vides, en écrivant la relation sous la forme suivante :

$$\tau_f / \sigma_n = \tan \varphi_\mu + \lambda_r (\sigma_n)^* (\rho_d - \rho_{d \min}) \quad (3)$$

avec :

- $\tan \varphi_\mu = 0,72$

- $\rho_{d \min} = 1,88 \text{ t/m}^3$, pour $(c' - c_0) = 0$, d'après la **figure 17**.

La **figure 18** présente deux résultats d'essais triaxiaux de précision en diamètre 150 mm. Généralement, les valeurs de modules tangents initiaux (E_{\tan}) 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 légèrement lorsque l'on s'intéresse aux modules E_{cycl} de déchargement-rechargement (**tableau 3**). Cette différence ne peut être totalement expliquée par l'objectif de compactage (98 % de l'OPN pour les reconstitutions en laboratoire et 95 % de l'OPN pour les remblais) car les densités finales observées sont très proches comme on le verra plus loin.

figure 18
Essai triaxial de précision
CD non saturé - $\sigma'_3 = 50$,
100 et 150 kPa.

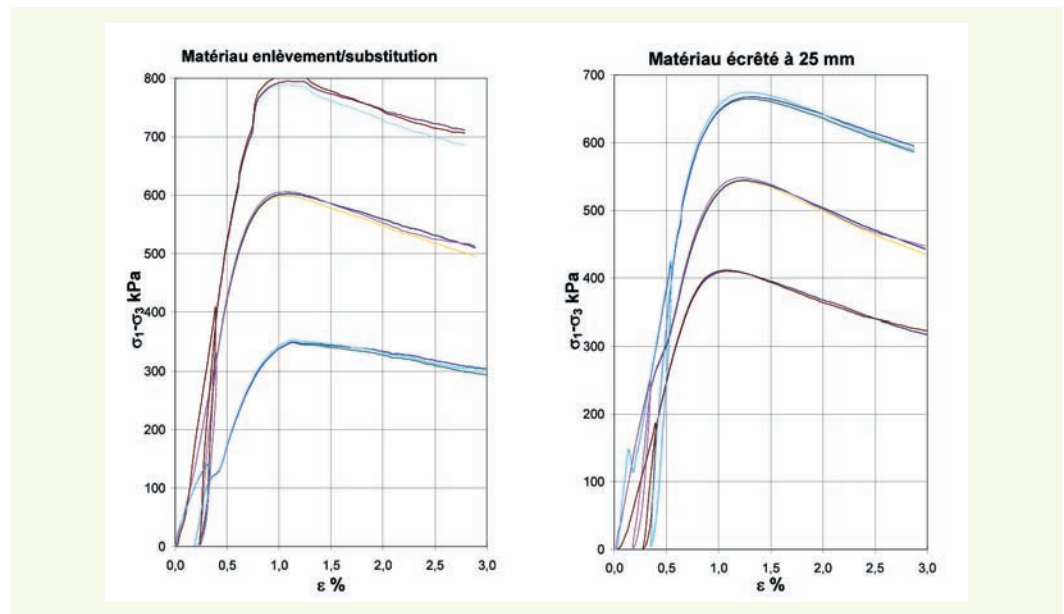


tableau 3
Résultats des essais
triaxiaux $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$
($d_{\max} = 25 \text{ mm}$).

Matériau	Compactage	E_{\tan} (MPa)	E_{cycl} (MPa)
Remblai - 2 ^e couche	rouleau	33,8	117,3
Remblai - 1 ^{re} et 2 ^e couche	rouleau	24,7	-
Matériau du Remblai	statique	66,5	134,0
Écrêté laboratoire	statique	73,1	141,5
Enlèv./subst. laboratoire	statique	92,8	178,6

■ Influence de la teneur en eau sur la rupture

Pour tester l'influence de la teneur en eau sur les résultats d'essai de cisaillement à la boîte, le matériau a été compacté à différentes teneurs en eau. Les caractéristiques Proctor de la fraction $0/d_{\max} = 0/50 \text{ mm}$ sont une teneur en eau $w_{\text{OPN}} = 7,1 \%$ et une densité optimale $\gamma_{\text{OPN}} = 2,13$. L'espacement entre les boîtes est maintenu à $t = 25 \text{ mm}$.

Les résultats du **tableau 4** montrent, sur la boîte de cisaillement du CER, une diminution de l'angle de frottement de pic de l'ordre de 6 degrés et une diminution de la cohésion, voisine de 18 kPa

tableau 4
Résultats des essais de cisaillement à la boîte.

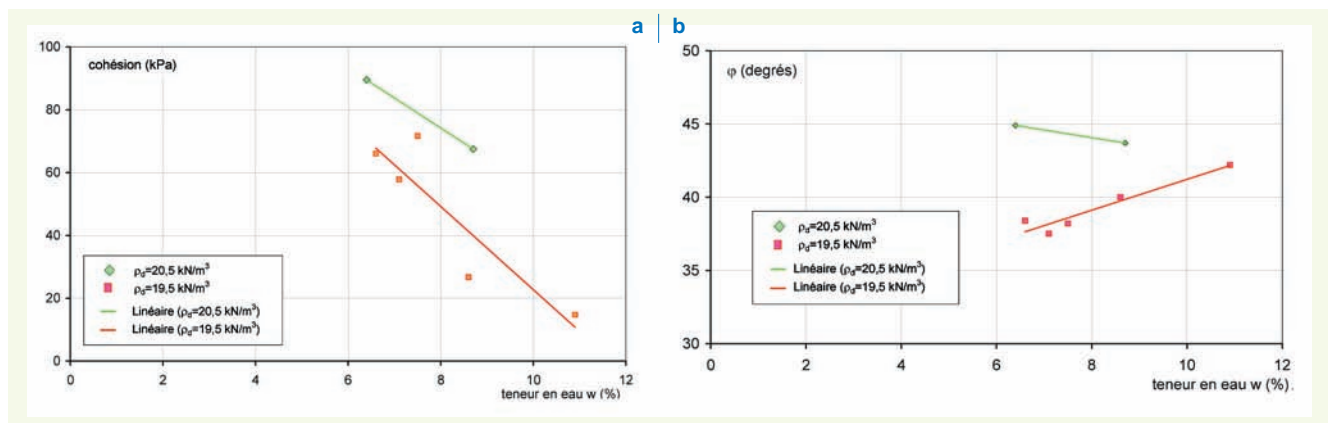
Essai	Opérateur	Boîte (mm)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	c (kPa)	φ (degrés)
CER-4	Vallé	500	6,3	20,9	65,3	45,6
CER-7	Afriani	500	7,5	19,5	46,0	39,4
LRL-1	Subrin	600	7,1	19,5	57,8	37,5
LRL-2	Subrin	600	6,6	19,5	66,0	38,4
LRL-3	Subrin	600	8,7	20,7	67,5	43,7
LRL-6	Subrin	600	6,4	20,5	89,5	44,9
LRL-7	Subrin	600	7,5	19,5	71,6	38,2
LRL-10	Subrin	600	8,6	19,4	26,7	40,0
LRL-11	Subrin	600	10,9	19,6	14,7	42,2

pour une augmentation de la teneur en eau de l'ordre de 6,3 à 7,5 %. Cette évolution avait déjà été observée par Shirdam *et al.* [11] avec une diminution de 2,1 degrés et 39 kPa pour une augmentation de la teneur en eau de 6,9 à 9,25 % pour des éboulis calcaires compactés dans la boîte de cisaillement de section circulaire de 600 mm à une densité sèche relativement proche.

Les résultats obtenus par Subrin et Chapeau [25] sont présentés sur la **figure 19**, où la cohésion et l'angle de frottement sont représentés en fonction de la teneur en eau. L'angle de frottement montre une variation contradictoire, mais de faible amplitude, entre les deux séries d'essai avec des poids volumiques de 19,5 et 20,5 kN/m³. Au contraire, la chute de cohésion est très nette, atteignant 50 kPa pour une augmentation de la teneur en eau de 4,5 %, à poids volumique constant (on note que l'essai LRL-7 du **tableau 4** met en défaut cette observation).

Au-delà de l'artefact produit par le dispositif lui-même, les valeurs élevées de la cohésion, de l'ordre de 50 à 100 kPa pour des faibles valeurs de la teneur en eau, peuvent également s'expliquer en partie par l'effet de non-saturation qui engendre des phénomènes de capillarité et de succion au sein des échantillons. L'augmentation de la teneur en eau conduit en outre à passer qualitativement d'un comportement dilatant du matériau au cours du cisaillement (pic marqué avec augmentation de volume) à un comportement de type contractant (pic atteint en résiduel et diminution de volume). Ces observations sont liées à la contrainte de consolidation du matériau générée par le compactage, phénomène que l'on retrouve *in situ* comme au laboratoire.

figure 19
Influence de la teneur en eau sur les paramètres de résistance au cisaillement :
- a : cohésion,
- b : angle de frottement.



■ Influence du mode de compactage sur la densité

Pour vérifier l'homogénéité de la masse volumique sur toute la hauteur des éprouvettes triaxiales, celles-ci ont été auscultées au banc gammadensimétrique avec des mesures espacées d'un centimètre suivant une génératrice. On observe alors de manière évidente les zones d'intercouches avec

des pics de densité. Les densités sont plus élevées pour les compactages avec le « marteau vibrant » et le « Proctor » et plus faibles pour la vibrocompression, mais toutes sont proches de la valeur de l'OPN $\rho_d = 2,03$. L'éprouvette taillée dans le remblai voit sa densité chuter en fond de couche, ce qui est habituel (figure 20).

Pour s'assurer de la qualité du remblai après sa réalisation, il a été ausculté 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 %, tout comme la masse volumique de 1,86 à 2,03 Mg/m³ en points individuels avec une moyenne de 1,96 Mg/m³ et un taux de compactage (TC) de 96,7 %.

Les trois pénétrogrammes obtenus sur le remblai indiquent tous les mêmes tendances et montrent que le compactage obtenu est de qualité parce que les courbes obtenues sont à droite de la courbe de référence q_4 tout au long du profil (figure 21) [19].

figure 20
 Profils de masse volumique :
 - a : pour le remblai,
 - b : pour les éprouvettes
 triaxiales.

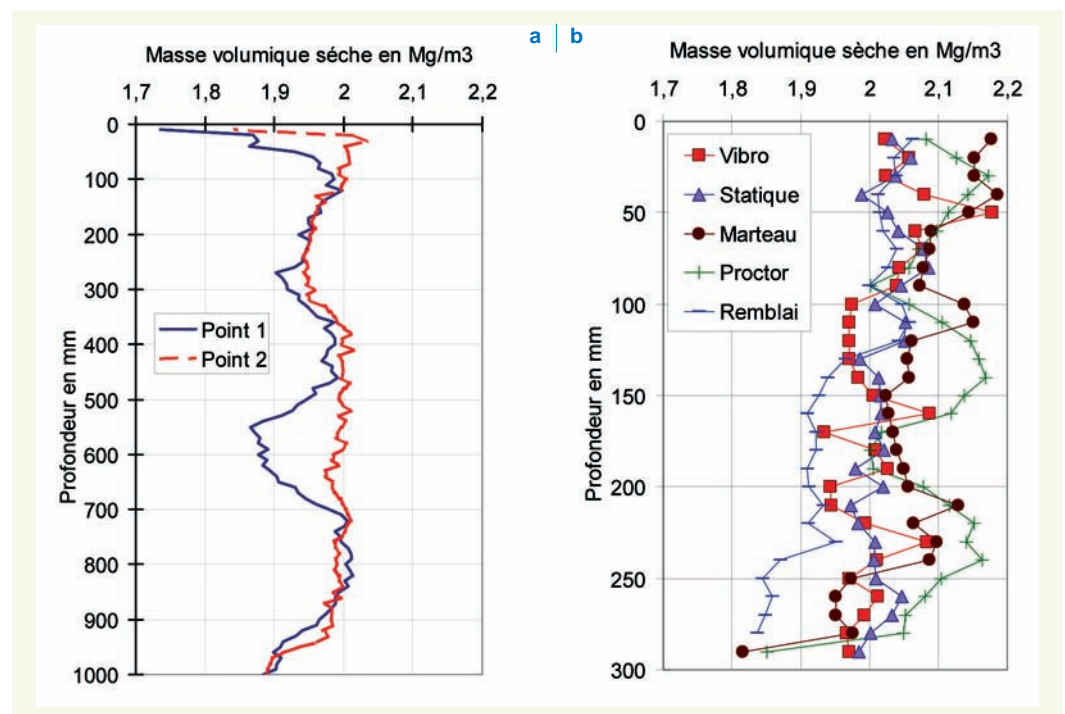
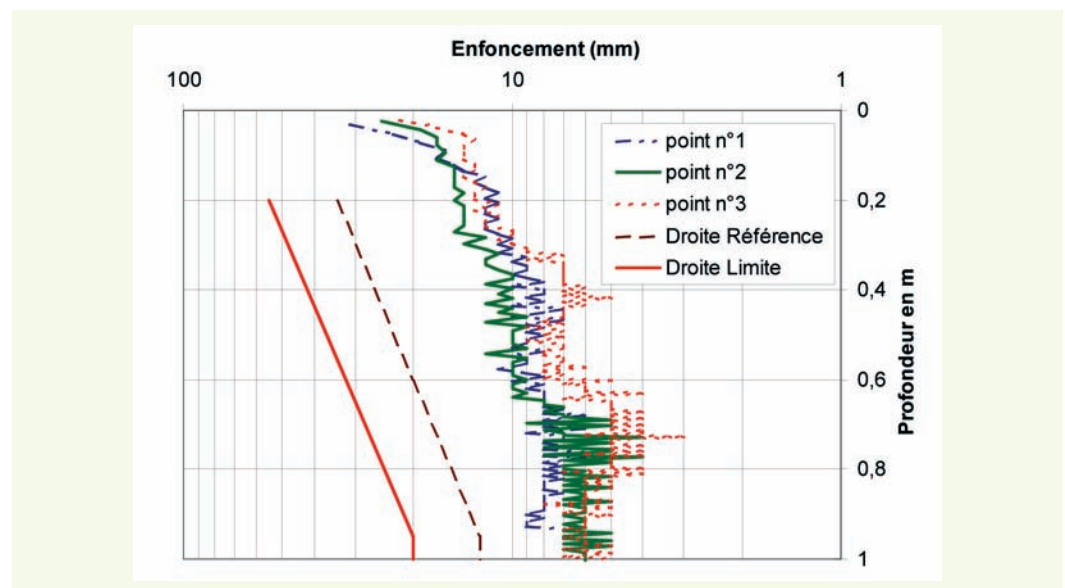


figure 21
 Profils pénétrométriques
 et courbes de référence
 (d'après [19]).



■ Influence du mode de compactage sur les paramètres mécaniques

Les courbes contrainte-déformation des essais triaxiaux sont présentées sur la **figure 22**, pour chaque modalité de compactage, pour les éprouvettes confectionnées en laboratoire et celles issues du remblai.

Les courbes intrinsèques de la **figure 23** montrent l'évolution de la cohésion et de l'angle de frottement interne du matériau obtenus à partir des résultats d'essais triaxiaux pour différents modes de compactage.

D'après le **tableau 5** et la **figure 23**, 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, les matériaux sont de même origine mais légèrement différents du fait de la variabilité naturelle du site [4].

La résistance au cisaillement du sol étudié est donc 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 22**

figure 22

Courbes contrainte-déformation obtenues à l'essai triaxial de 150 mm de diamètre, CU Non Saturé - $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$.

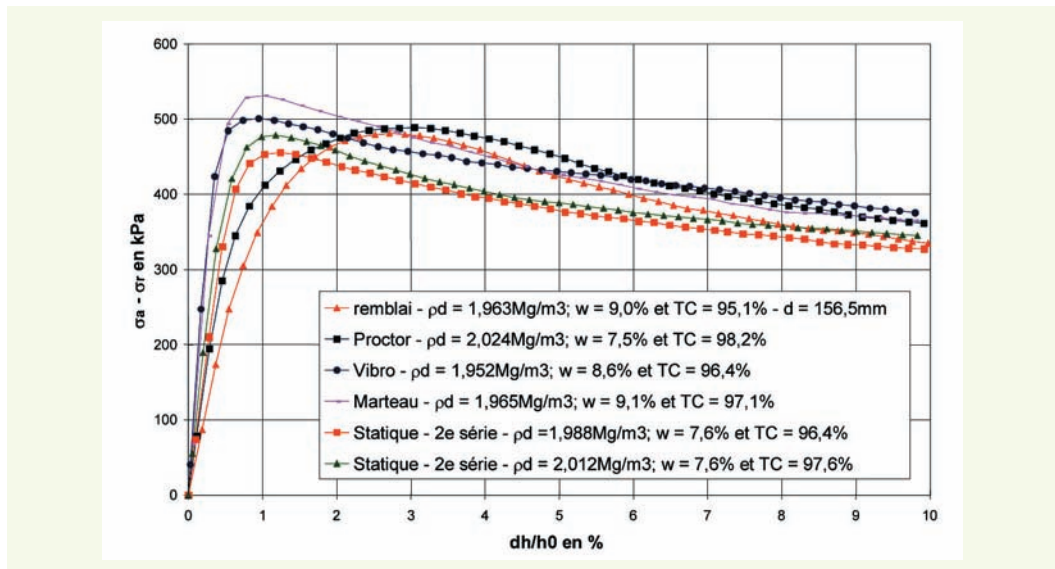


figure 23

Courbes intrinsèques pour l'essai triaxial.

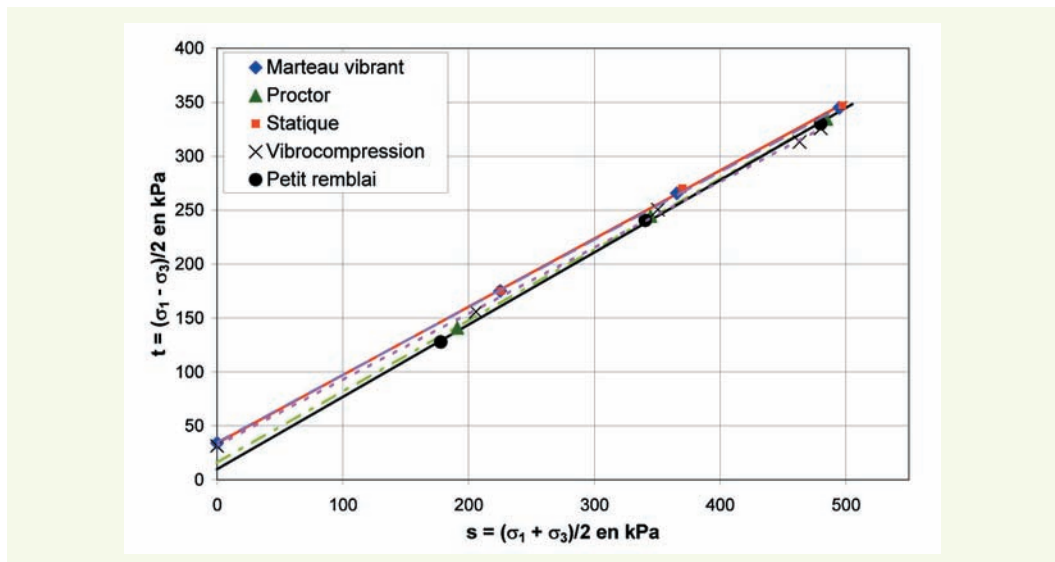


tableau 5
Résultats des essais
triaxiaux pour
 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$
(résistance au pic).

Mode	c (kPa)	φ (degrés)	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

et **tableau 5**). Ceci montre que la façon de compacter un matériau agit d'une manière importante sur son comportement en déformation. Des phénomènes d'érouissage ou de surconsolidation sont probablement mis en jeu dans ces différents modes de compactage. Des essais de répétitivité non présentés ici ont été réalisés par ailleurs et se sont révélés satisfaisants [4, 25-26].

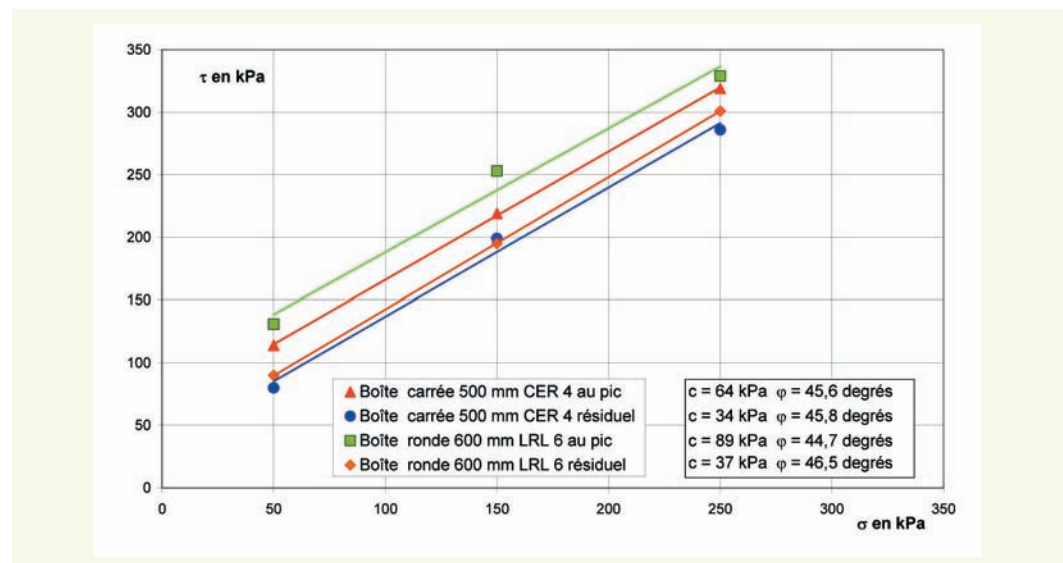
■ Influence de la forme de l'appareillage

Les essais réalisés avec la boîte de cisaillement direct de section carrée du CER ont été reproduits dans la boîte de cisaillement direct de section circulaire du LR de Lyon. Toutefois, ces essais ne sont pas strictement identiques, avec des variations de teneur en eau w et de poids volumique γ_d par rapport aux valeurs du CER. Par ailleurs, un domaine de contraintes de confinement plus large a été proposé par le LR de Lyon.

Les conditions initiales de l'essai LRL-6 le rendent comparable à l'essai CER-4 de Vallé [4] (cf. **tableau 4**). La **figure 24** récapitule les critères des deux essais en termes de résistance de pic et de résistance résiduelle pour un même domaine de contrainte verticale. Au pic, les contraintes de cisaillement mesurées à la boîte de section circulaire de 600 mm sont systématiquement plus élevées que celles mesurées à la boîte de section carrée de 500 mm, de l'ordre de 10 à 30 kPa, malgré un poids volumique sec légèrement plus élevé pour l'essai de Vallé [4]. L'interprétation au pic de résistance conduit à un écart sur la cohésion de l'ordre de 25 kPa et à un écart sur l'angle de frottement inférieur à 1 degré.

En terme de résistance résiduelle, les résultats sont similaires, exceptés pour une contrainte verticale $\sigma_v = 250 \text{ kPa}$ pour laquelle on enregistre un écart de 20 kPa sur la résistance au cisaillement. La répercussion sur les valeurs des caractéristiques mécaniques se traduit par un écart de l'ordre de 10 kPa pour la cohésion et inférieur à 2 degrés pour l'angle de frottement. Si ce dernier est évalué

figure 24
Courbes intrinsèques
obtenues pour différents
appareillages.



de manière cohérente entre les deux dispositifs, la cohésion reste un paramètre très variable selon que l'interprétation est faite en terme de résistance de pic ou de résistance résiduelle.

Les résultats de l'essai LRL-6 sont influencés par la rugosité de la boîte de cisaillement. En effet, la mise en place d'un chemisage périphérique en téflon, limitant le frottement à l'interface entre la boîte et l'échantillon, conduit systématiquement à réduire la résistance au cisaillement et donc à obtenir des résultats similaires avec les deux dispositifs.

Avec ces essais comparatifs, on met en évidence les divergences liées à la répétabilité des essais, en particulier sur les valeurs des contraintes de cisaillement. En revanche, l'interprétation globale d'un essai de cisaillement mène à des résultats assez cohérents. Des écarts de l'ordre de 10 à 20 kPa pour la cohésion et de 1 à 2 degrés pour l'angle de frottement sont à noter entre les deux dispositifs.

■ Influence de la taille de l'appareillage

La réalisation d'essais à la boîte de cisaillement et au triaxial pour différentes géométries d'éprouvettes permet de tirer quelques conclusions en ce qui concerne l'influence de la taille de l'appareillage sur les résultats d'essai sur matériaux grossiers. Les essais réalisés au CER avec deux tailles de boîte de cisaillement direct de section carrée (cf. [tableau 2](#) et [figure 15](#)) donnent des résultats très proches. On constate des écarts de l'ordre de quelques kPa pour la cohésion et de 1 à 2 degrés pour l'angle de frottement entre les deux tailles.

Le [tableau 6](#) présente la référence et les caractéristiques des éprouvettes fabriquées en laboratoire pour la réalisation des essais triaxiaux de révolution sur des éprouvettes constituées de matériau écrêté à 25 mm en diamètre 150 mm et 300 mm. Ces deux séries d'essais portent sur un matériau d'origine identique, même si les variations naturelles du site de prélèvement sont à considérer.

Les courbes contrainte-déformation, surpression interstitielle en fonction de la déformation axiale, rapport σ'_1/σ'_3 , ainsi que la représentation dans le plan de Lambe ([figure 25](#)) permettent d'obtenir pour l'essai sur le diamètre 300 mm, avec la grave de Criquebeuf-sur-Seine écrêtée à 25 mm, une cohésion de 9 kPa et un angle de frottement de 36,5 degrés, soit une diminution de 10 kPa de la cohésion et de 4,6 degrés pour l'angle de frottement par rapport aux essais sur l'éprouvette de 150 mm.

Les éprouvettes de 150 mm présentent un plan de rupture assez bien défini et l'angle d'inclinaison varie de 50 à 56 degrés pour toutes les éprouvettes ([figure 26a](#)). Dans le cas des compactages réalisés en trois couches, le plan de rupture passe parfois par l'interface située entre la première et la deuxième couche.

Cette localisation de la rupture n'est pas observée sur les éprouvettes de 300 mm, toutes choses égales par ailleurs : granulométrie, mode de compactage, nombre de couches ([figure 26b](#)). De ce fait, l'absence d'influence des plus gros grains sur le désenchevêtrement des particules dans le plan d'une surface de rupture lors de l'atteinte de l'état critique peut expliquer l'aspect des courbes du déviateur en fonction de la déformation, qui ne présentent pas de pic, ainsi que l'absence de cohésion lors de l'analyse dans le plan de Mohr-Coulomb. Une autre explication possible est bien sûr une densité plus faible obtenue sur les éprouvettes de grandes dimensions ; toutefois, les masses volumiques des éprouvettes sont comprises entre 1,95 et 2,09 t/m³, ce qui est comparable aux masses volumiques variant de 1,96 à 2,02 t/m³ pour les éprouvettes de 150 mm. De plus, cette conclusion, liant l'évolution des paramètres à la taille des éprouvettes, semble être corroborée par la diminution de la cohésion constatée par Vallé [4] lors des essais à la boîte de cisaillement avec des valeurs décroissantes du diamètre d'écrêtage du matériau ([tableau 2](#)). Cette constatation n'est par ailleurs pas possible lorsque l'on compare les essais avec différentes tailles de boîte, présentés plus haut, car l'espacement (t) est maintenu constant. Cette évolution de la cohésion avec l'espacement a été confirmée par plusieurs études [4, 12, 25-27].

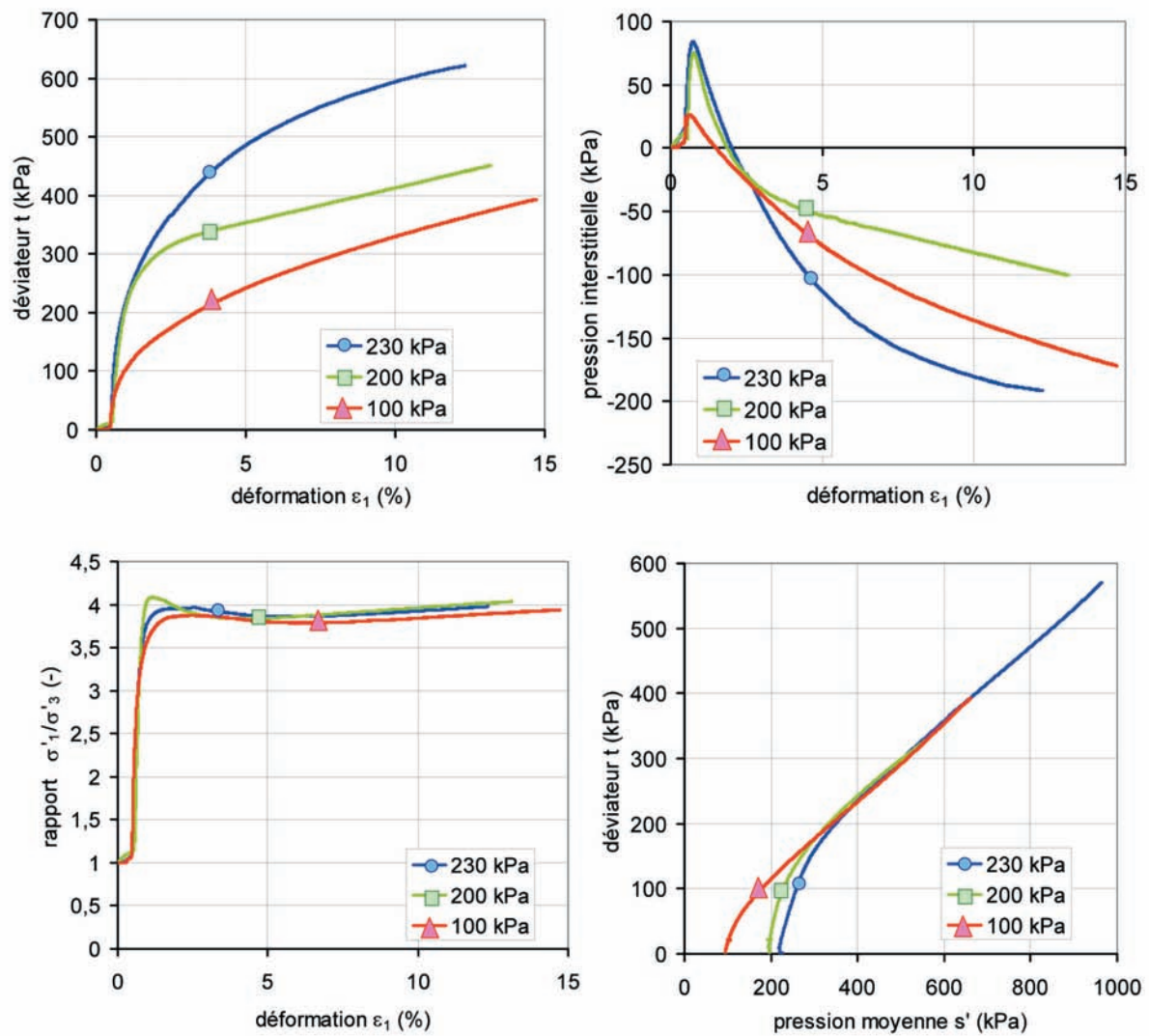


figure 25

Résultats de l'essai triaxial en diamètre 300 mm pour le matériau de Criquebeuf-sur-Seine écrêté à 25 mm.

figure 26

Éprouvettes déformées après essais au triaxial de 150 mm (a) et 300 mm (b).



a | b

25
26

■ Influence du type d'essai de cisaillement

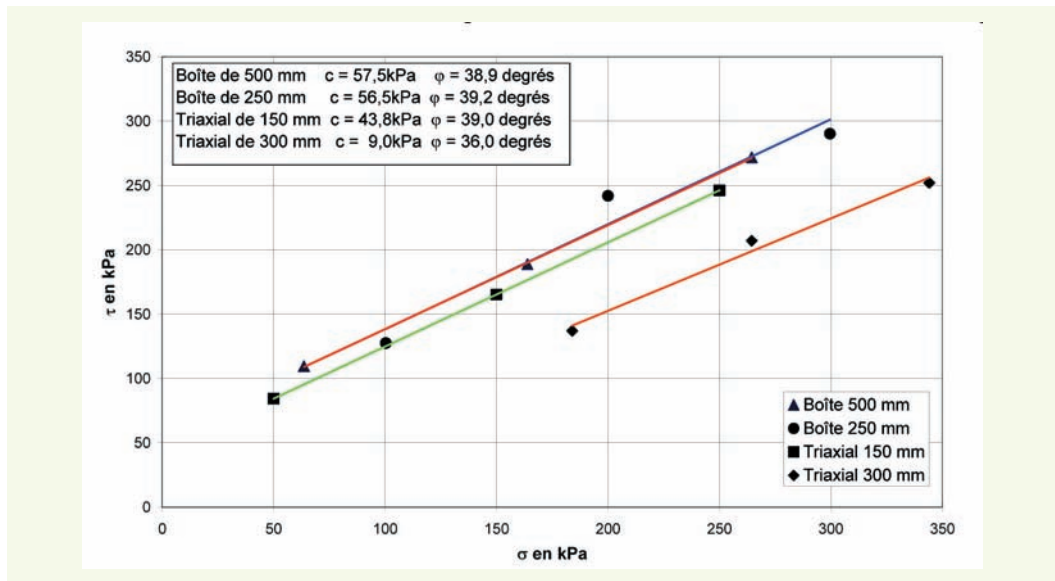
Le **tableau 6** indique les paramètres obtenus à partir de tous les essais réalisés. On constate une grande cohérence de ces résultats (**figure 27**).

tableau 6
Résultats pour différents types d'essais sur le matériau du remblai (Compactage au rouleau sauf pour la boîte : marteau).

Essai	c (kPa)	φ (degrés)	E_{tan} (MPa)	E_{cycl} (MPa)
Boîte carrée 500 mm	57,5	38,9	-	-
Triaxial 150 mm	43,8	39,0	37	117
Triaxial 150 mm *	-	-	17,5	42,2
Triaxial 300 mm	9,0	36,0	95	-
Plaque	-	-	19,9	41,9
Pressiomètre	-	-	13,8	37,2

* Modules estimés comme le module à la plaque

figure 27
Courbes intrinsèques pour différents appareillages ($d_{max} = 25$ mm - compactage au marteau).



On constate des différences au niveau des paramètres de déformation ou de rupture en fonction du mode de sollicitation de l'appareillage. On observe que, 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 plus difficilement reproductible car 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 du fait d'une influence trop importante de l'effet d'engrènement sur les résultats (tableau 6). La cohésion constatée à la boîte de cisaillement diminue quasi linéairement avec l'augmentation de l'espacement. Subrin et Chapeau ont observé une cohésion de l'ordre de 50 kPa pour $t = 25$ mm et une cohésion de 10 kPa pour $t = 50$ mm [23]. *A contrario*, l'angle de frottement est peu influencé par l'espacement t .

CONCLUSIONS

Ces recherches expérimentales montrent que le type d'appareil utilisé joue un rôle dans la résistance observée du matériau. Le rapport entre les dimensions de l'équipement destiné aux essais et la taille des grains doit avoir un seuil minimal pour qu'il n'influence pas les résultats. Les résultats présentés conduisent à préconiser que le rapport L_0/d_{max}^{-1} doit être supérieur à 15 ou 20 pour la boîte de cisaillement direct quand le matériau possède une courbe granulométrique étalée et le double quand la graduation est uniforme. Pour l'appareil triaxial, le rapport D_0/d_{max}^{-1} doit être au moins égal à 6 et être d'autant plus élevé que le matériau possède une graduation granulométrique uniforme.

Pour les essais effectués à la boîte de cisaillement direct, on a observé une augmentation des paramètres de résistance du sol ; les valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion augmentent avec la crois-

¹ L_0 est la dimension maximale de la boîte de cisaillement et D_0 le diamètre de l'éprouvette triaxiale.

sance du diamètre maximal des grains d_{max} . Cette croissance de d_{max} est accompagnée d'une augmentation du coefficient d'uniformité (C_U). Les matériaux écrêtés et reconstitués ont donné des valeurs relativement proches pour la cohésion et l'angle de frottement interne ; les valeurs obtenues vont de 56 à 65 kPa pour la cohésion et 39 à 45 degrés pour l'angle de frottement (pour $L_0 = 500$ mm). Les matériaux ont été testés avec les mêmes masses volumiques. L'essai à la boîte de cisaillement direct aboutit à des valeurs très fortes pour la cohésion, alors appelée « cohésion apparente ». Les essais comparatifs réalisés entre une grande boîte ronde et une grande boîte carrée mettent en évidence des écarts de l'ordre de 10 à 20 kPa pour la cohésion et de 1 à 2 degrés pour l'angle de frottement. L'écart pour la cohésion est de plus du double lorsque l'on fait varier l'espacement de $d_{max}/2$ à d_{max} . Que ce soit par la forme de la cellule de mesure ou la taille de celle-ci, l'influence de l'appareillage ne semble pas prépondérante par rapport à l'espacement entre les deux demi-boîtes. On en conclut donc que l'espacement préconisé de $d_{max}/2$ est insuffisant pour s'affranchir de la cohésion due à l'imbrication des grains. L'espacement nécessaire serait plutôt de l'ordre de d_{max} .

La résistance au cisaillement de pic du sol, mesurée à partir des essais triaxiaux, est peu affectée par le processus de confection des éprouvettes ; les valeurs obtenues vont de 13 à 44 kPa pour la cohésion et 38 à 42 degrés pour l'angle de frottement. Le module tangent est beaucoup plus sensible au mode de compactage des éprouvettes ; les valeurs obtenues vont de 30 à 130 MPa, selon leur origine (confectionnées en laboratoire ou taillées en place dans les remblais). Les valeurs de l'angle de frottement interne pour les matériaux écrêtés sont plus faibles que celles observées pour le matériau reconstitué par enlèvement et substitution. Les valeurs de la cohésion sont voisines. Le matériau reconstitué par enlèvement et substitution a été testé pour des masses volumiques plus élevées que celles des matériaux écrêtés. Ceci est dû à l'arrangement des différentes fractions granulométriques [28].

La distribution dimensionnelle des grains, à savoir la granulométrie d'essai, est un autre paramètre à prendre en compte quand on teste des sols grossiers en laboratoire. L'écrêtage est le processus le plus simple, mais une méthode de reconstitution par enlèvement de la partie la plus grossière du matériau et substitution pour le matériau entre 5 mm et d_{max} a été utilisée. Des résultats issus des essais à la boîte et des essais triaxiaux, on constate que, pour l'écrêtage et la reconstitution par enlèvement et substitution, les valeurs des paramètres de résistance sont différentes si la masse volumique l'est aussi ; sinon, les valeurs obtenues sont similaires. Cependant, les processus pour obtenir une granularité donnée peuvent conduire à arranger et enchevêtrer les grains différemment dans la masse du sol. Ceci peut conduire à des comportements différents.

Globalement, on a observé au cours de cette étude expérimentale que les valeurs de la cohésion obtenues à partir des essais à la boîte de cisaillement direct sont plus élevées que celles issues des essais triaxiaux. Pour l'angle de frottement, les valeurs sont proches.

Il semble donc nécessaire, à la suite de cette étude, de proposer la rédaction de documents normatifs limitant le recours à l'écrêtage ou à la substitution de la fraction granulométrique la plus grossière dans les essais de caractérisation mécanique. Ceci pourrait être fait dans le cadre des travaux menés actuellement par le comité technique 341 du comité européen de normalisation pour élaborer une norme d'essai de densité OPN spécifique aux essais de mécanique des sols.

Cette recherche a permis de mettre en évidence le risque de surestimation de la cohésion lors de l'utilisation d'un mode de compactage conduisant à une densité trop importante ou lors d'essais à la boîte de cisaillement avec une géométrie inadaptée. Il est donc nécessaire d'adapter la pratique expérimentale aux sols grossiers afin de conserver un dimensionnement sécuritaire des pentes et ouvrages géotechniques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier leurs collègues Nilton Vallé, Jean-Claude Blivet, Lusmeila Afriani, Dominique Lozach et Assia Ghemmour du CETE Normandie-Centre, ainsi que Simon Pouget du laboratoire régional des ponts et chaussées de Lyon, qui ont contribué par leurs travaux ou leurs conseils à la réalisation de cette recherche.

Références Bibliographiques

- 1 **PERROT A.**, *Étude de la résistance au cisaillement des sols grossiers*, étude bibliographique 68.B.113, **1968**, LCPC, 50 pages.
- 2 **URSAT P., SAINT R.**, *Étude de la résistance au cisaillement d'une grave argileuse*, rapport du Laboratoire régional de Rouen, **1970**, 30 pages.
- 3 **CAMAPUM DE CARVALHO J., MIEUSSENS C., QUEIROZ DE CARVALHO J.-B.**, Problèmes de reconstitution des éprouvettes de sol en laboratoire - Proposition d'une méthode, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **1985**, **135**, pp. 77-83.
- 4 **VALLÉ N.**, *Comportement mécanique d'un sol grossier d'une terrasse alluvionnaire de la Seine*, Thèse de doctorat, université de Caen/Basse Normandie, **2001**, 287 pages.
- 5 **FRY J.-J., FLAVIGNY E.**, Classification et propriétés des enrochements : le cas d'un grès, *Proceedings of the twelfth international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Rio de Janeiro, **1989**, vol. **1**, pp. 713-714.
- 6 **SANTOS, MARTINEZ, GARCIA**, Efecto en los ensayos de laboratorio de propiedades resistentes de materiales granulares, *Simposio sobre geotecnia de presas de materiales sueltos*, Zaragoza, **1993**, pp. 117-122.
- 7 **FUMAGALLI E.**, Tests on cohesionless materials for rockfill dams, *Journal of the soil mechanics and foundations division*, Trans. American society of civil engineers (ASCE), **1969**, vol. **95**, n° SM1, pp. 313-330.
- 8 **HOLTZ W.-G., GIBBS J.**, Triaxial mechanics tests on previous gravelly soils, *Journal of the soil mechanics and foundation division*, ASCE, **1956**, vol. **82**, paper **867**, pp. 1-22.
- 9 **LARÉAL P., BOURDEAU Y., LAMBERT P., COTTEREAU CL.**, Essais de cisaillement *in situ* sur des sols alluvionnaires de la vallée du Rhône, *Travaux*, **1973**, n° **459-460**, pp. 52-59.
- 10 **BOURDEAU Y., LARÉAL P., MARCHAL J.**, Résistance au cisaillement des alluvions du Rhône, *Proceedings of the twelfth international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Rio de Janeiro, **1989**, vol. **1**, pp. 695-696.
- 11 **SHIRDAM R., FAURE R.-M., MAGNAN J.-P.**, *Comportement mécanique des matériaux superficiels des versants naturels*, **2001**, ERLPC, **GT71**, 210 pages.
- 12 **SHIRDAM R.**, *Comportement mécanique des matériaux superficiels des versants naturels*, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, **1998**.
- 13 **Afnor**, norme **NF P 94-074**, *Essai à l'appareil triaxial de révolution - Appareillage, préparation des éprouvettes*, essais UU, CU + u, CD, **1994**.
- 14 **CHARLES H.**, Triaxial géant, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **1968**, **35**, pp 20-22.
- 15 **VALLÉ N., BLIVET J.-C., KHAY M., REIFFSTECK PH.**, Méthode de compactage appliquées aux matériaux alluvionnaires, *6^e journées nationales Génie civil - Génie côtier*, Caen, **2000**, tome **2**, pp. 337-348.
- 16 **REIFFSTECK PH., BLIVET J.-C., VALLÉ N., KHAY M.**, Écueils de la mesure en laboratoire du comportement mécanique des sols grossiers, *15th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Istanbul, Balkema, **2001**, pp. 255-259.
- 17 **BERTAINA G., BLIVET J.-C., REIFFSTECK PH., CHAPEAU C., HERVÉ S., CANOU J., KHAY M., MESTAT PH., GARCIA P.**, *Opération 1J991 Comportement des matériaux grossiers*, Rapport final d'opération, **2004**, 120 pages.
- 18 **DUPLA J.-C., PEDRO L.-S., CANOU J., DORMIEUX L.**, Comportement mécanique des sols grossiers de référence, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **2007**, **268-269**, pp. 31-58.
- 19 **SÉTRA-LCPC**, *Guide des terrassements routiers. Réalisation des remblais et des couches de forme*, **1992**, 90 pages.
- 20 **HINTZY**, *Triaxial grand modèle, expérimentation*, **1969**, PV n° **4310**, 57 pages.
- 21 **GHEMMOUR A.**, *Sols hétérogènes : caractérisation et comportement mécanique*, diplôme de Master 2 recherche option Génie côtier, université de Caen/Basse Normandie, **2005**, 91 pages.
- 22 **ARBAUT J.**, *Caractérisation mécanique des matériaux hétérogènes*, mémoire d'ingénieur CNAM, **2007**, 50 pages (à paraître).
- 23 **JAMIOLKOWSKI M.-B., Lo PRESTI D.C.F.**, Shear strength of coarse soils from in situ tests a compendium, *the fourth international geotechnical engineering conference*, Cairo, **2000**, pp. 1-41.
- 24 **MONNET J., KHLIF J.**, Étude théorique et expérimentale de l'équilibre élasto-plastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre, *Revue française de géotechnique*, **1994**, n° **67**, pp. 3-12.
- 25 **SUBRIN D., CHAPEAU C.**, *Essais à la grande boîte de cisaillement pour sols grossiers, Essais croisés sur la grave alluvionnaire de Criquebeuf-sur-Seine*, rapport LCPC, **2006**, 102 pages.
- 26 **AFRIANI L.**, *Essais de cisaillement direct des sols grossiers : incidences des procédures d'essai et effets d'échelle*, Thèse de doctorat, université de Caen, **2003**.
- 27 **LEVACHER D., KHAY M., LOZACH D., AFRIANI L.**, Caractérisation de la résistance au cisaillement d'un sol grossier – Application à une grave alluvionnaire, In Shahrour I., Kazan Y., Gambin M., Lancelot L. Eds, *Proceedings of the international conference on geotechnical engineering*, Beyrouth, **2004**, pp. 703-709.
- 28 **REIFFSTECK PH., NGUYEN PHAM P.-T., ARBAUT J.**, Influence de la répartition granulométrique sur le comportement mécanique d'un sol, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **2007**, **268-269**, pp. 83-104.

