

COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES SOLS GRANULAIRES HÉTÉROGÈNES À MATRICE

MECHANICAL BEHAVIOUR OF HETEROGENEOUS GRANULAR SOILS WITH MATRIX

N'guessan KOUAKOU^{1,2}, Olivier CUISINIER¹, Farimah MASROURI¹, Emmanuel LAVALLÉE², Tangi LE BORGNE²

¹ LEMTA (UMR 7563, Université de Lorraine – CNRS), Nancy, France

² Bouygues Travaux Publics, Guyancourt, France

RÉSUMÉ – L'objectif de cet article est d'évaluer la validité de l'approche par granulométrie parallèle pour estimer la résistance au cisaillement des matériaux granulaires hétérogènes à matrice. Les résultats indiquent que par cette approche, l'angle de frottement est correctement estimé et que la résistance au cisaillement du sol complet peut s'écrire en fonction de celle de ses fractions et de l'interaction entre les fractions.

ABSTRACT – This article investigates the validity of parallel gradation as an approach to estimate the shear strength of heterogeneous granular materials with matrix. The results indicate that the angle of friction is correctly estimated by this method, and the shear strength of the whole soil can be written according to that of its fractions and that due to the interaction between the fractions.

1. Introduction

Les sols granulaires hétérogènes à matrice sont des matériaux constitués d'éléments de quelques microns (particules argileuses) à plusieurs dizaines de centimètres (blocs rocheux). Les types de sols entrant dans cette catégorie sont les alluvions, les éboulis, les moraines, etc. Ces matériaux peuvent être utilisés entre autres dans la construction des digues et des remblais. Leur utilisation dans des projets géotechniques requiert la détermination en laboratoire de leurs caractéristiques mécaniques, ce qui représente un enjeu particulier en raison de la présence des grains de grande taille. En effet, la taille maximale des grains du sol est supérieure à la taille maximale admissible par les dispositifs de cisaillement courants de laboratoire. Une solution est alors d'utiliser des dispositifs de grandes dimensions. Par exemple, Estaïre et Olalla (2005) utilisent une boîte de cisaillement direct de 1 m³ de volume pour déterminer les paramètres de rupture des granulats de carrière et Ovalle et al. (2014) utilisent une cellule triaxiale de 1 m de diamètre. Cependant, ces appareillages, qui permettent de tester des sols de taille maximale de grain 160 mm, sont peu nombreux, complexes à mettre en œuvre et inadaptés aux matériaux comportant des grains de taille plus grande.

Des études se sont ainsi penchées sur la possibilité d'estimer les caractéristiques mécaniques de ces sols à partir d'essais sur leur fraction compatible avec les appareillages de cisaillement courants de laboratoire. Trois approches sont souvent utilisées pour constituer la granulométrie des éprouvettes : l'écrêtage, la substitution et la granulométrie parallèle.

L'écrêtage consiste à retirer du sol initial tous les grains de taille supérieure à la taille admissible par l'appareillage utilisé et à réaliser l'essai sur la fraction restante. Cette approche conduit à une sous-estimation de la résistance au cisaillement du sol initial

d'autant plus importante que le pourcentage de grains écrétés est élevé (Pedro, 2004; Seif El Dine, 2007; Zhang et al., 2016).

La substitution consiste à retirer du sol initial les grains dont la taille est supérieure à la taille admissible de l'appareillage et à les remplacer, à masse égale, par des grains de taille admissible. Selon Vallé (2001), la substitution conduit à une sous-estimation de la résistance mécanique du sol initial tandis que Pedro (2004) conclut que cette approche donne une estimation correcte de la résistance mécanique du sol initial. Ces conclusions contradictoires peuvent s'expliquer par l'écart entre la taille maximale de grain du sol initial et la taille admissible de l'appareillage. En d'autres termes, plus cet écart est important, plus l'approche sous-estime la résistance au cisaillement du sol initial.

L'approche la plus fréquemment utilisée est la granulométrie parallèle. Elle consiste à reconstituer, à partir des grains du sol de taille admissible par l'appareillage utilisé, un matériau de distribution granulométrique parallèle au sol initial. Selon Varadarajan et al., (2003), cette approche conduit malgré tout à une sous-estimation de la résistance au cisaillement du sol initial lorsque les grains sont arrondis et à une surestimation pour des grains anguleux. Marachi et al., (1969) obtiennent un angle de frottement identique au matériau initial pour un même taux de rupture des grains. Frossard et al. (2012) proposent une méthode analytique permettant de prendre en compte l'effet de la rupture des grains lors du cisaillement et ainsi avoir une estimation correcte des paramètres. Verdugo et De La Hoz (2006) quant à eux indiquent que l'augmentation importante du pourcentage de fines dans le matériau modèle (plus de 10%) conduit à une estimation erronée de la résistance au cisaillement du sol initial.

Ainsi, des interrogations demeurent sur l'estimation de la résistance mécanique d'un sol granulaire hétérogène à partir d'essais sur sa fraction fine. Dans le cadre de cette étude, la granulométrie parallèle a été retenue comme approche du fait de la conservation de la distribution granulométrique initiale du sol et de sa large utilisation dans l'étude des sols grossiers. L'objectif est d'approfondir les connaissances sur cette approche en étudiant deux volets. Le premier volet consiste à vérifier la validité de la méthode de granulométrie parallèle pour une augmentation importante du pourcentage de fines dans le matériau modèle. Pour ce faire, les critères de rupture de deux matériaux de granulométrie parallèle sont déterminés puis comparés. Le second volet se focalise sur l'établissement d'une corrélation entre la résistance mécanique des fractions de sol et celle du sol complet. Pour ce faire, à partir d'un matériau initial, deux fractions ont été reconstituées et leurs critères de rupture ont été déterminés.

2. Matériel et méthodes

2.1. Caractéristiques du matériau support de l'étude

Le matériau étudié est une grave naturelle villafranchienne de granulométrie 0-120 mm. Selon la classification GTR (2000), c'est un matériau de classe C₁B₄. De ce matériau, les grains de taille supérieure à 30 mm sont écartés et le matériau 0-30 mm obtenu par granulométrie parallèle a été choisi comme matériau de base pour les essais de cisaillement. Son poids volumique sec maximal déterminé à partir d'un essai Proctor est de 21,1 kN/m³ pour une teneur en eau correspondante de 8,3 %. À partir du matériau 0-30 mm, trois autres matériaux ont été reconstitués : un matériau 0-5 mm de granulométrie parallèle à celle de 0-30 mm et deux matériaux de granulométrie 0-5 et 5-30 mm obtenus par écrêtage du matériau 0-30 mm. Les courbes granulométriques des différents matériaux sont présentées sur la figure 1.

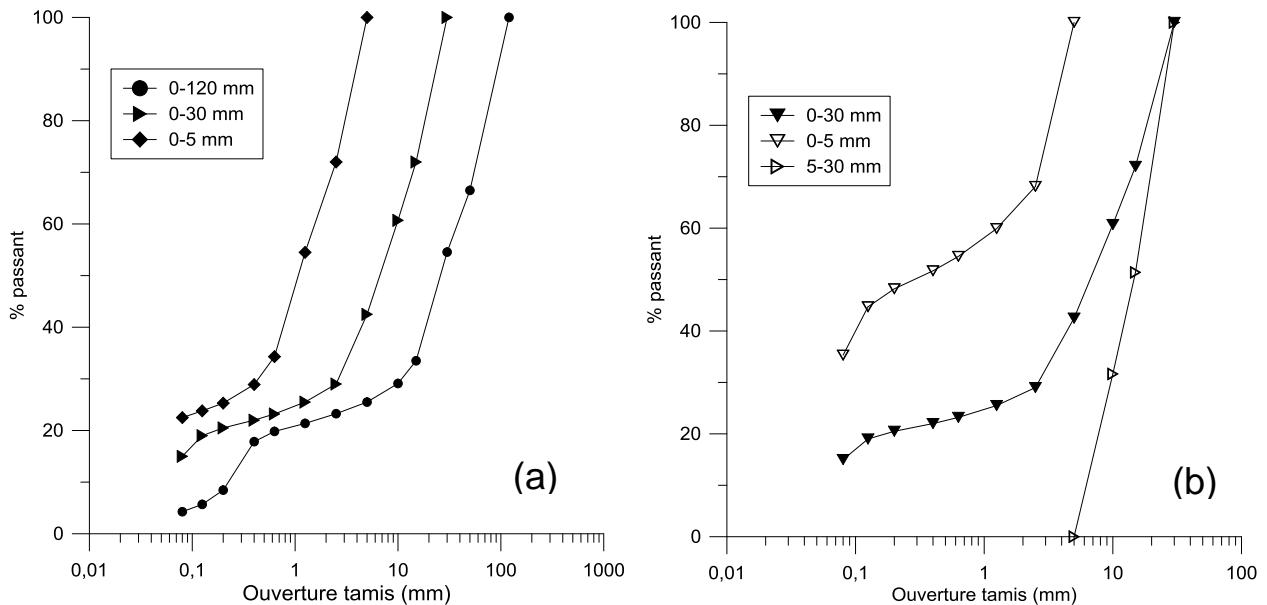


Figure 1 : Courbes granulométriques : (a) matériau initial et matériaux de granulométrie parallèle et (b) matériau 0-30 mm et ses fractions obtenues par écrêtelement

2.2. Appareillages de cisaillement

Dans le cadre de cette étude, deux boîtes de cisaillement direct ont été utilisés : une petite boîte de dimensions $60 \times 60 \times 45 \text{ mm}^3$ et une grande boîte de dimensions $300 \times 300 \times 180 \text{ mm}^3$. La petite boîte est une boîte classique de cisaillement direct de mécanique des sols.

La grande boîte de cisaillement direct est constituée de deux demi-boîtes : la demi-boîte inférieure est fixe tandis que la demi-boîte supérieure est entraînée par un moteur à vitesse constante. Un système constitué d'un bâti et d'un piston hydraulique de capacité maximale 100 kN permet d'exercer un effort normal constant pendant l'essai. Des capteurs de déplacement de type LVDT sont installés afin de suivre les mouvements horizontaux et verticaux de l'éprouvette. Ces capteurs ont une étendue de 50 mm avec une précision de 0,2%. L'effort de cisaillement est mesuré par un capteur de force de capacité 100 kN. L'effort vertical est mesuré par un capteur de précision 0,15% placé entre le bâti et la plaque supérieure. Un inclinomètre installé sur la plaque supérieure permet de suivre les mouvements d'inclinaison de la plaque supérieure en cours d'essai. Les capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition qui transmet les données à un logiciel pour enregistrement et visualisation.

2.3. Stratégie expérimentale

Le but des essais est d'étudier la validité de la méthode de granulométrie parallèle et d'établir une corrélation entre la résistance mécanique des fractions et celle du sol complet.

Afin d'étudier la validité de la méthode de granulométrie parallèle, les matériaux modèles 0-5 et 0-30 mm de distribution granulométrique parallèle au matériau initial ont été testés à la même masse volumique sèche de 2 Mg/m^3 . Les critères de rupture de ces matériaux ont été déterminés à partir d'essais consolidés et drainés puis comparés.

Pour établir une corrélation entre la résistance mécanique des fractions et celle du sol complet, le matériau 0-30 mm a été séparé en deux fractions : 0-5 et 5-30 mm. La masse volumique sèche de ces fractions a été fixée à celle qu'elles avaient dans le matériau 0-

30 mm. Cette masse volumique est calculée à partir de celle des éprouvettes 0-30 mm et du pourcentage massique des grains écrêtés par l'équation 1 (Pedro, 2004) :

$$\rho_{sol-\text{écrété}} = \frac{\frac{1-f}{1-f}}{\frac{\rho_{0-30}}{\rho_s}} \quad (1)$$

$\rho_{sol-\text{écrété}}$: masse volumique sèche du sol obtenu par écrêtement ;

ρ_{0-30} : masse volumique sèche du sol 0-30 mm ;

ρ_s : masse volumique solide des grains écrêtés prise égale à 2,7 Mg/m³ ;

f : pourcentage massique des grains écrêtés.

Ainsi, la fraction 0-5 mm représentant 42,5% du matériau 0-30 mm a été testée à une masse volumique de 1,48 Mg/m³ et la fraction 5-30 mm représentant 57,5% à une masse volumique de 1,68 Mg/m³.

2.4. Préparation des éprouvettes

Afin de reconstituer la granulométrie voulue pour les éprouvettes, la fraction 0-30 mm de l'échantillon reçu a été séparé en différentes fractions granulométriques par tamisage : < 0,08 ; 0,08-0,2 ; 0,2-0,4 ; 0,4-0,63 ; 0,63-1,25 ; 1,25-2,5 ; 2,5-5 ; 5-10 ; 10-15 et 15-30 mm. Les différentes fractions ont été mélangées selon les proportions données par la courbe granulométrique pour la confection des éprouvettes. Les matériaux sont humidifiés à la teneur en eau optimale (8,3%) et conservés dans des sacs hermétiques pendant au moins une nuit pour permettre une bonne homogénéité de l'eau dans l'échantillon. Les éprouvettes sont compactées statiquement en trois couches dans la grande boîte de cisaillement et en une couche dans la petite boîte jusqu'à atteindre la densité souhaitée. La saturation des éprouvettes se fait en remplissant le bac de l'appareillage de cisaillement et en laissant reposer pendant 3h minimum. Après la saturation, les éprouvettes sont consolidées sous l'effort normal voulu puis cisaillées à une vitesse constante de 0,05 mm/min.

3. Résultats

3.1. Courbes de cisaillement des matériaux de granulométrie parallèle

Les résultats des essais de cisaillement des matériaux de granulométrie parallèle 0-5 et 0-30 mm sont présentés sur la figure 2. La courbe de cisaillement admet des valeurs au pic et résiduelle bien distinctes dans le cas du matériau 0-5 mm. Dans le cas du matériau 0-30 mm, il n'y a pas de pic apparent alors que les deux matériaux sont testés à la même densité. L'absence de pic pour le matériau 0-30 mm pourrait s'expliquer par les grandes dimensions de la boîte de cisaillement utilisée. En effet, Gotteland et al., (2000) ont constaté que lorsque les dimensions de la boîte de cisaillement augmentent, l'écart entre la résistance au pic et la résistance résiduelle se réduit jusqu'à disparaître complètement.

Les courbes de variation de volume débutent par une phase de contractance suivie d'une phase de dilatance caractéristiques de l'état surconsolidé des éprouvettes dans les deux boîtes. La contractance du matériau 0-5 mm est très faible quelle que soit la contrainte normale avec une valeur maximale de 0,05% alors qu'elle intervient sur un intervalle de déformation plus long et avec une valeur plus élevée pour le matériau 0-30 mm pour les contraintes normales de 100 et 200 kPa. À l'opposé, la dilatance a une valeur plus élevée pour le matériau 0-5 mm comparativement au matériau 0-30 mm.

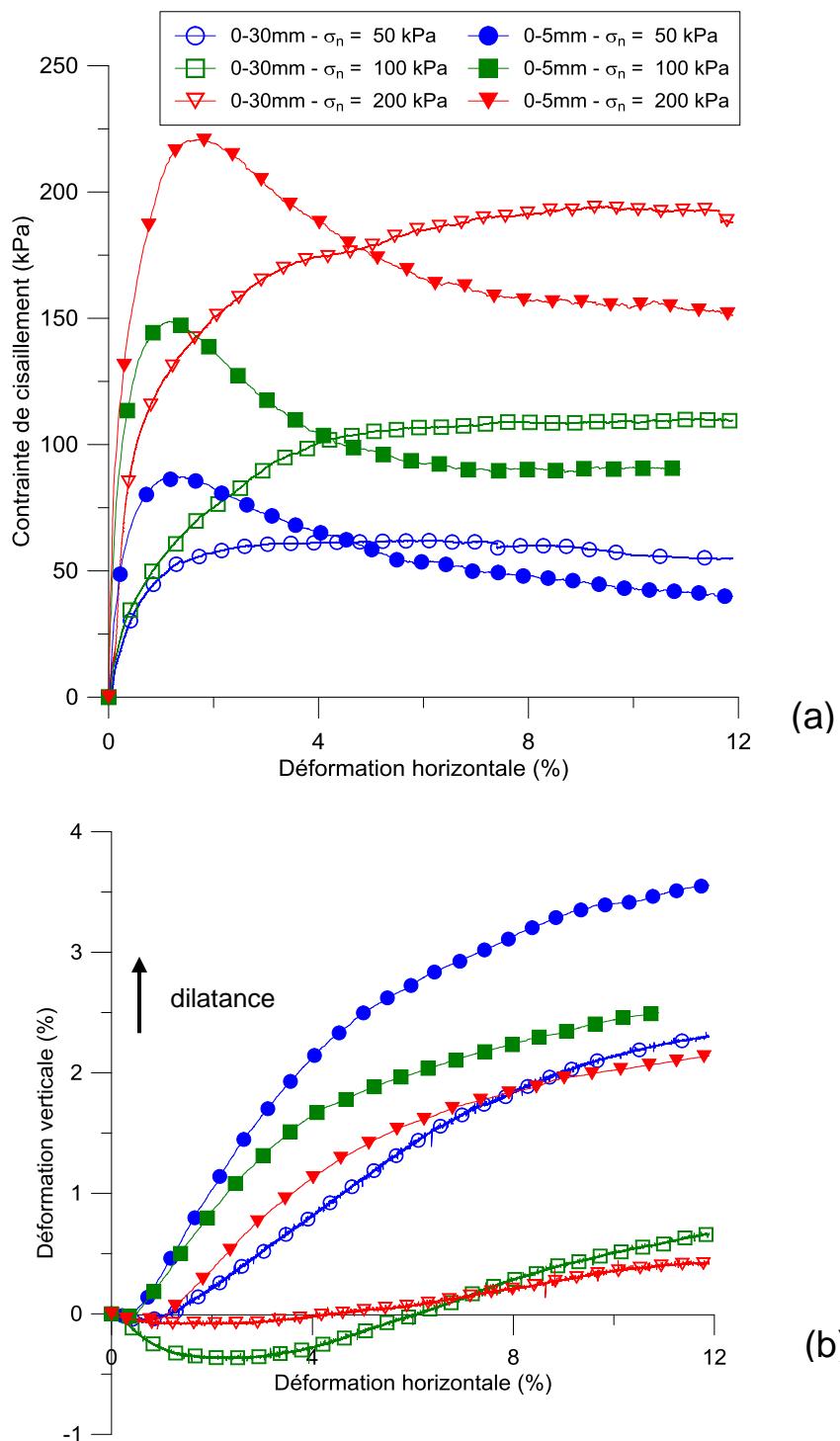


Figure 2 : Courbes de résistance au cisaillement (a) et de contractance-dilatance (b)

3.2. Résistances au cisaillement du matériau complet et ses fractions

Les courbes de cisaillement sous contraintes normales fixes de 50, 100 et 200 kPa des fractions 0-5 et 5-30 mm du sol modèle 0-30 mm sont présentées sur les figures 3 et 4. Il apparaît que la fraction 0-5 mm est dans un état lâche tandis que la fraction 5-30 mm est dans un état dense. Les paramètres de rupture des fractions sont résumés dans le tableau 1. L'angle de frottement de la fraction 5-30 mm est supérieur à l'angle de frottement du mélange, ce qui indique que le frottement entre les grains grossiers est plus important que celui entre les grains fins et les grains grossiers. En revanche, la cohésion du mélange est plus forte car le pourcentage de fines est plus important.

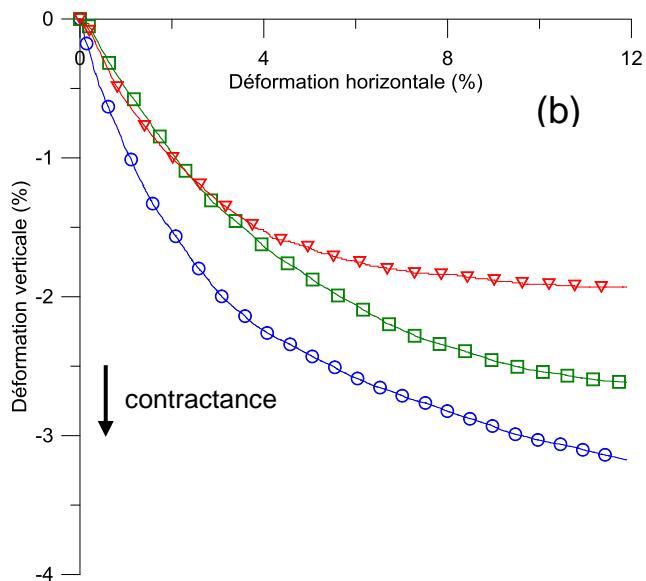
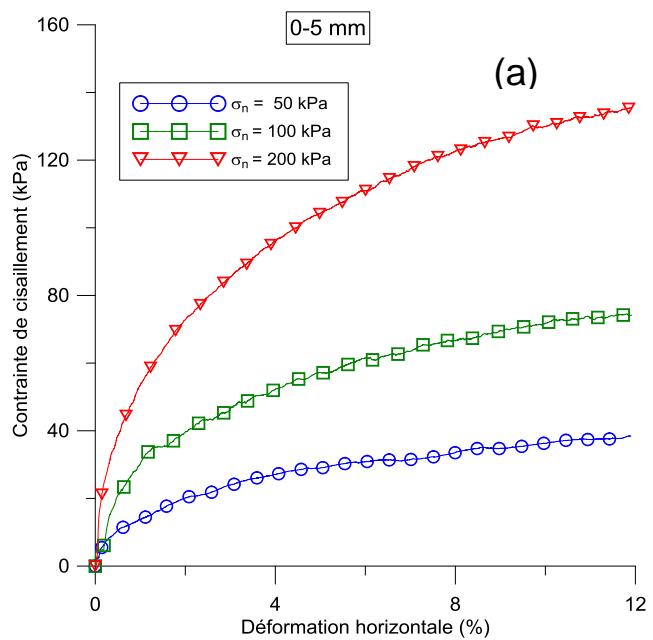


Figure 3 : Courbes de résistance au cisaillement (a) et de variation de volume (b) de la fraction 0-5 mm

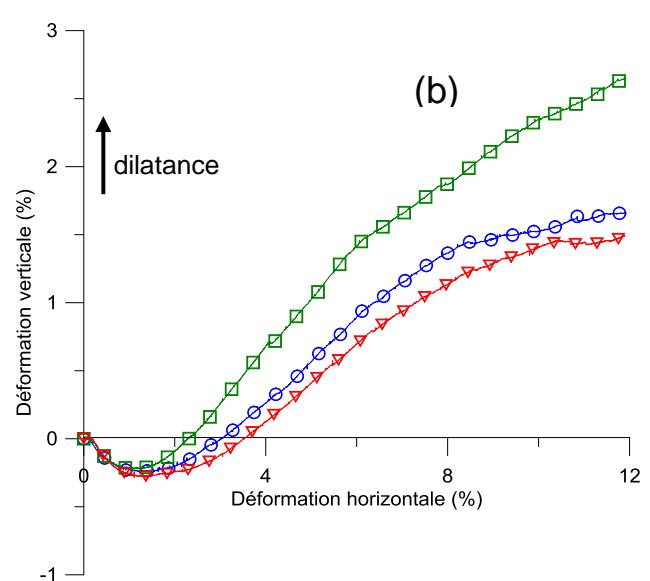
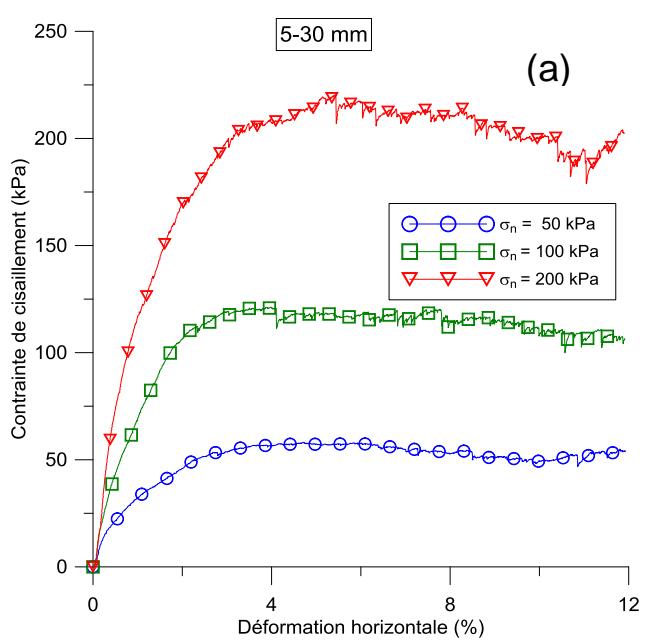


Figure 4 : Courbes de résistance au cisaillement (a) et de variation de volume (b) de la fraction 5-30 mm

Tableau 1 : Paramètres de cisaillement du matériau 0-30 mm et de ses fractions 0-5 et 5-30 mm

Matériau	ρ_d (Mg/m^3)	σ_n (kPa)	τ_{\max} (kPa)	c' (kPa)	φ' ($^\circ$)
0-5 mm	1,48	50	37,8		
		100	76,2	6,3	34,1
		200	141,0		
5-30 mm	1,68	50	58,1		
		100	121,2	0,0	48,4
		200	220,5		
0-30 mm	2,00	50	61,1		
		100	111,8	20,6	41,0
		200	192,8		

3.3. Validité de la méthode de granulométrie parallèle

Le tracé des critères de rupture des matériaux de granulométrie parallèle (figure 5) conduit à une valeur d'angle de frottement maximal quasi identique pour les deux matériaux. L'approche permet donc de prédire l'angle de frottement du matériau initial. Cette conclusion est en accord avec les travaux de Verdugo et De la Hoz (2006). En revanche, la cohésion du sol modèle 0-5 mm est supérieure de 31 kPa à celle du sol modèle 0-30 mm. Cette différence pourrait s'expliquer par le pourcentage important de la fraction < 0,08 mm dans le sol modèle 0-5 mm (22,5% contre 15% dans le sol 0-30 mm). En effet, les fines dans le matériau servent de lien entre les grains plus gros ; ainsi l'augmentation de leur pourcentage contribue à améliorer la cohésion du sol.

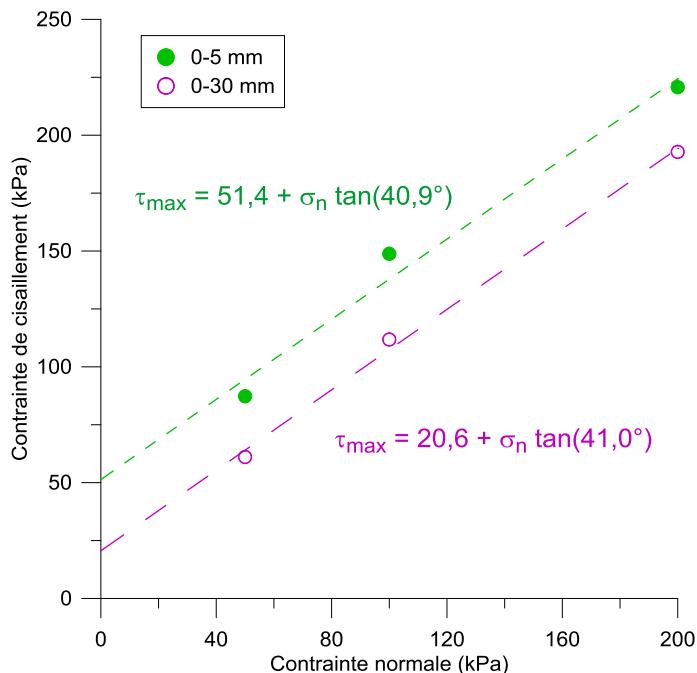


Figure 5 : Critères de rupture des matériaux à granulométrie parallèle 0-5 et 0-30 mm

3.4. Corrélation entre la résistance mécanique des fractions et celle du sol complet

Une régression linéaire multiple permet d'écrire la résistance au cisaillement du matériau modèle 0-30 mm en fonction de celles de ses fractions 0-5 et 5-30 mm :

$$\tau_{0-30} = 0,21\tau_{0-5} + 0,68\tau_{5-30} + 13,54 \quad (2)$$

Cette relation indique que la fraction 0-5 mm participe à hauteur de 21% à la résistance au cisaillement du sol complet tandis que la fraction 5-30 mm contribue à hauteur de 68%. Le terme constant rend compte de la résistance au cisaillement due à l'interaction entre les deux fractions. Cette interaction contribue à hauteur de 11% et est égale à 123,1 kPa. La part de chaque fraction dans la résistance au cisaillement du sol complet n'est pas égale à son pourcentage dans celui-ci. La fraction 5-30 mm est dans un état dense, tandis que la fraction 0-5 mm est dans un état lâche. Ce qui indique que la plupart des grains de taille comprise entre 5 et 30 mm sont en contact dans le sol complet et les grains de taille comprise entre 0 et 5 mm remplissent les vides entre ces derniers. La

fraction 5-30 mm impose donc son squelette au sol complet ; ce qui explique son important apport dans la résistance au cisaillement du mélange.

4. Conclusions

L'objectif de cette étude était de proposer une méthode permettant d'estimer la résistance mécanique d'un sol granulaire hétérogène à matrice à partir d'essais sur sa fraction fine. Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

La méthode de granulométrie parallèle permet d'estimer correctement l'angle de frottement des matériaux granulaires hétérogènes à matrice. Par contre, la cohésion est surestimée du fait de l'augmentation importante du pourcentage de particules < 0,08 mm dans le sol modèle.

La résistance au cisaillement du sol complet peut s'écrire en fonction de la résistance au cisaillement de ses fractions et d'une résistance au cisaillement constante due à l'interaction entre les fractions. Des essais supplémentaires sont nécessaires pour déterminer la relation entre le pourcentage de la fraction dans le mélange et son apport dans la résistance au cisaillement du sol complet.

5. Références bibliographiques

- Estaire, J., and Olalla, C. (2005). Analysis of shear strength of armourstone based on 1m³ direct shear tests. WIT Trans. Built Environ. vol. 78, 10p.
- Frossard, E., Hu, W., Dano, C., and Hicher, P.-Y. (2012). Rockfill shear strength evaluation: a rational method based on size effects. Géotechnique vol. 62, pp.415–427.
- Gotteland, P., Tacnet, J.M., and Aboura, A. (2000). Caractérisation des sols grossiers, application aux sols de torrents. Rev. Fr. Génie Civ. vol. 4, pp.325–338.
- LCPC, and SETRA (2000). Guide des terrassements routiers (GTR).
- Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B., and Duncan, J.M. (1969). Strength and deformation characteristics of rockfill materials (University of California, Berkeley: Department of Civil Engineering/Geotechnical Engineering).
- Ovalle, C., Frossard, E., Dano, C., Hu, W., Maiolino, S., and Hicher, P.-Y. (2014). The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data. Acta Mech vol. 225, pp.2199–2216.
- Pedro, L.S. (2004). De l'étude du comportement mécanique de sols hétérogènes modèles à son application au cas des sols naturels. Sciences de l'ingénieur. École des ponts ParisTech. 195p.
- Seif El Dine, B. (2007). Etude du comportement mécanique des sols grossiers à matrice. École des ponts ParisTech. 198p.
- Vallé, N. (2001). Comportement mécanique d'un sol grossier d'une terrasse alluvionnaire de la Seine. Université de Caen. 300p.
- Varadarajan, A., Sharma, K.G., Venkatachalam, K., and Gupta, A.K. (2003). Testing and modeling two rockfill materials. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. vol. 129, pp.206–218.
- Verdugo, R., and De La Hoz, K. (2006). Strength and stiffness of coarse granular soils. In Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis, (Roma: Ling et al.), pp. 243–252.
- Zhang, Z.-L., Xu, W.-J., Xia, W., and Zhang, H.-Y. (2016). Large-scale in-situ test for mechanical characterization of soil–rock mixture used in an embankment dam. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 86, pp.317–322.