

# Etude de l'effet de l'écrêtage sur le comportement mécanique des sols grossiers non cohésifs

Nadine ALI HASSAN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institut GeM, Nantes Université, 58 rue Michel Ange, BP 420, 44606 Saint Nazaire Cedex, France

<sup>2</sup>CESI, Ecole d'Ingénieurs, 93 Bd de la Seine, 92000 Nanterre, France

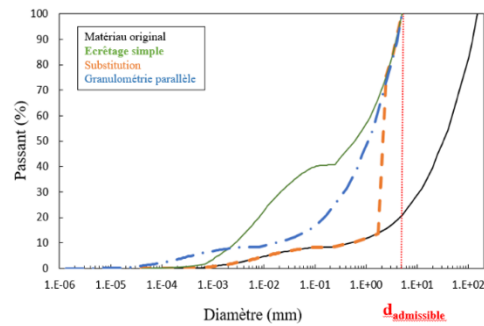
## RESUME

Les caractéristiques de résistance au cisaillement des sols grossiers peuvent être mesurées par la réalisation d'essais au laboratoire. Toutefois, ces mesures nécessitent souvent des procédures d'écrêtage, en raison de la présence de particules de grandes dimensions par rapport à la taille du dispositif d'essai. Ce travail vise à étudier les conséquences de trois procédures d'écrêtage (écrêtage simple et deux méthodes de substitution) sur les propriétés mécaniques des sols grossiers. Des échantillons numériques formés de mélanges granulaires ayant des distributions granulométriques discontinues sont testés à l'aide de la Méthode des Eléments Discrets (MED). Des essais expérimentaux de compression triaxiale sont également réalisés sur des mélanges de sable et de graviers, à l'aide de dispositifs triaxiaux de diamètres  $\Phi = 50$  et  $100$  mm. Les échantillons numériques et expérimentaux sont soit simplement écrêtés, soit écrêtés avec différentes substitutions. L'indice des vides global est contrôlé pour qu'il soit le même pour tous les échantillons. Les résultats montrent que l'écrêtage simple conduit à une surestimation, ou une sous-estimation de la résistance mécanique, en fonction de la teneur en fines d'origine. Par contre, la méthode de substitution Sub1 permet l'obtention d'une bonne estimation de la résistance au cisaillement. Les écarts de résultats de la méthode de substitution Sub2 sont liés à l'étalement granulométrique de la fraction grossière, ainsi qu'à la résistance du matériau remplaçant le matériau retiré.

**Mots-clefs** sols grossiers, écrêtage, substitution, résistance au cisaillement, compression triaxiale.

## I. INTRODUCTION

De très nombreux ouvrages en terre, ainsi que leur fondation sont constitués de sols grossiers. Nous pouvons notamment citer les remblais d'infrastructures de transport, les barrages et digues à finalité de production d'électricité ou de protection des inondations. Jusqu'à présent, aucune définition précise de ces sols grossiers n'existe dans la littérature. En effet, chaque auteur définit les sols grossiers, en fonction du domaine d'application et du dispositif utilisé pour les tester in situ ou en laboratoire. Cependant, tous ces sols ont pour caractéristique commune, une distribution granulométrique des particules très étalée, pouvant aller de quelques micromètres à plusieurs centimètres. La Fig. 1 présente un exemple d'une telle distribution, sol dénommé matériau original, qui provient d'une digue gérée par EDF. Pour caractériser mécaniquement les sols grossiers, les normes imposent un facteur d'échelle qui s'exprime par le rapport du diamètre de l'échantillon testé ( $\Phi$ ) et du diamètre maximal des particules ( $d_{\max}$ ) du sol à caractériser.



**FIGURE 1.** Sol grossier original avec les différentes méthodes d'écrêtage.

En fonction de la granulométrie du sol, l'Association Française de Normalisation AFNOR (NF P 94-074, 1994) impose un rapport  $(\Phi/d_{\max})$  supérieur à 5 ou à 10. Par contre, selon la norme américaine ASTM (ASTM D4767-88, 1988), ce rapport doit être supérieur ou égal à 6. En considérant le diamètre maximal des sols grossiers, leur caractérisation en laboratoire nécessite le recours à des dispositifs de grandes dimensions afin de déterminer leurs propriétés mécaniques. Cependant, la caractérisation des sols grossiers à l'aide de ces dispositifs présente de nombreux désavantages tels que: un mode opératoire long et difficile à mettre en œuvre, une difficulté à garantir la répétabilité des essais ainsi que des coûts financiers importants. Une solution alternative consiste à déterminer un diamètre admissible des particules ( $d_{\text{admissible}}$ ) et puis reconstituer le sol à travers l'une des trois méthodes présentées dans la Fig. 1. Ce  $d_{\text{admissible}}$  est calculé à partir de la taille du dispositif expérimental ( $\Phi$ ) et de la taille supérieure des particules de sol ( $d_{\max}$ ). La première méthode, l'écrêtage simple, consiste à retirer du sol toutes les particules de diamètre supérieur à  $d_{\text{admissible}}$  et reconstituer le sol avec les particules retenues. Dans le cas de la méthode de substitution, toutes les particules non admissibles sont remplacées par une masse équivalente de particules plus petites. Enfin, la méthode de reconstitution par granulométrie parallèle consiste à tester un sol modèle, de distribution granulométrique parallèle à celle du sol réel (Cuisinier et al., 2018). Cette dernière méthode suppose la similitude de la distribution granulométrique ainsi que celle des caractéristiques des grains. Or dans le cadre de notre étude, les sols testés contiennent des matériaux limoneux, de nature physicochimique bien différente de celle des argiles que cette méthode suppose de tester. Cette méthode est donc difficilement utilisable pour notre étude et seuls l'écrêtage simple et la méthode de substitution sont utilisés.

Dans le but de comprendre l'influence des méthodes d'écrêtage avec et sans substitution, une étude numérique à l'aide des éléments discrets est tout d'abord menée. Les résultats ainsi obtenus sont comparés par des résultats obtenus expérimentalement.

## II. Sols testés

Les sols testés sont des sols grossiers à distribution granulométrique discontinue composée d'une fraction fine et d'une fraction grossière. Cette dernière est subdivisée en grains grossiers admissibles et grossiers surdimensionnés. L'indice des vides global (rapport entre le volume des vides ( $V_v$ ) et le volume de la fraction solide ( $V_s$ )) est le paramètre choisi pour contrôler la densité des échantillons testés numériquement ou expérimentalement dans le cadre de cette étude. La

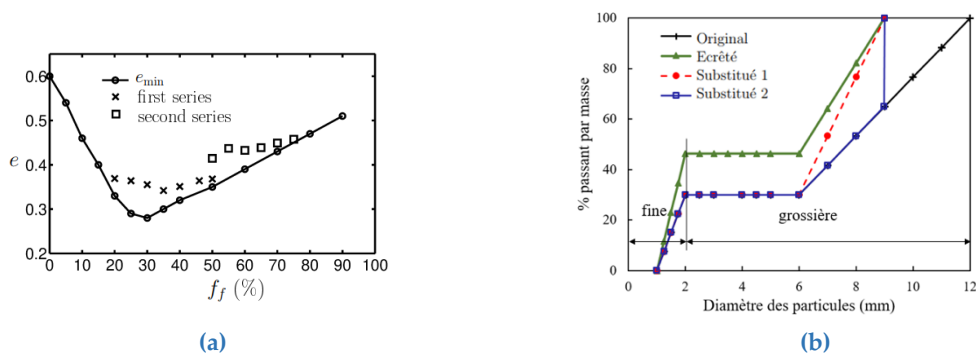
confrontation d'essais numériques et expérimentaux pour plusieurs paramètres de contrôle de densité (Ali-Hassan et al., 2021) a permis de souligner que l'indice des vides global est le paramètre qui limite les écarts entre la résistance au cisaillement du sol original et celle des échantillons écrêtés ou substitués. Ce paramètre a été également choisi par différents auteurs tels que Thevanayagam et al. (2002), Seif El Dine (2007) et Andrianatrehina et al. (2016) pour contrôler la densité des échantillons testés.

### III. Etude numérique

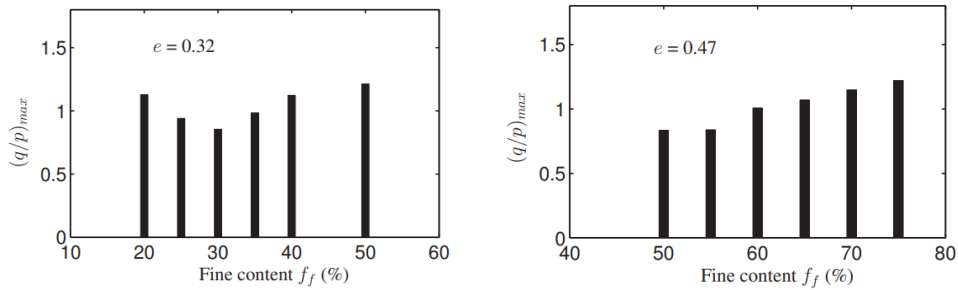
La Méthode des Eléments Discrets (MED) est utilisée avec le logiciel Yade, pour simuler des échantillons numériques de distribution granulométrique discontinue avec différents teneurs en fines. Les particules choisies sont parfaitement sphériques pour optimiser le temps de calcul. De plus, ils sont souvent utilisés grâce à la facilité dans la détection des contacts et dans la définition de la géométrie au contact entre deux particules. La résistance à la compression triaxiale est étudiée en fonction de la teneur en fines et de la méthode d'écrêtage choisie. Chaque échantillon numérique contient 100 000 particules pour garantir la répétabilité des résultats obtenus. Ce nombre est choisi à partir de la réalisation des essais de répétabilité sur des échantillons de même teneur en fines générés d'une façon aléatoire à chaque fois.

#### A. Influence de la teneur en fines

La méthode d'écrêtage simple conduit à un accroissement de la teneur en fines. Dans ce contexte, il apparaît important d'étudier l'influence de la teneur en fines ( $f_f$ ) sur la résistance au cisaillement du sol. Suivant cet objectif, deux séries d'essais ont été simulées en contrôlant l'indice des vides global et pour une teneur en fines comprise entre 20 et 50% pour la première série et entre 50 et 75% pour la seconde série. La Fig. 2 (a) présente l'indice des vides minimal  $e_{min}$  en fonction de la teneur en fines ( $f_f$ ). Il convient de noter la décroissance de  $e_{min}$  pour une teneur en fines de 0 à 30%, puis son accroissement pour  $f_f$  supérieure à 30%. En conséquence, quelle que soit la teneur en fines, l'indice des vides ne peut être contrôlé pour une valeur unique. Pour la première série, la valeur visée d'indice des vides est de 0,32 et de 0,47 pour la seconde série (cf. Fig. 2). Le rapport maximal de contraintes déviatorique et moyenne  $(q/p)_{max}$  est tracé en fonction de la teneur en fines  $f_f$  dans la Fig. 3 pour les deux séries de simulations.



**FIGURE 2.** (a) Evolution de l'indice des vides minimal et de l'indice des vides en fonction de la teneur en fines et (b) Distributions granulométriques du sol original avec  $f_f = 30\%$  et celles des sols écrêtés et substitués correspondants.



**FIGURE 3.** Rapport de contraintes maximal  $(q/p)_{max}$  en fonction de la teneur en fines  $f_f$  lorsque l’indice des vides global  $e$  est contrôlé.

Les résultats de simulation numérique des essais triaxiaux montrent l’existence d’une teneur en fines optimale autour de 30%, en-dessous de laquelle les mélanges deviennent moins résistants et moins dilatants avec l’augmentation de la teneur en fines. Par contre, au-delà de cette teneur en fines optimale, les mélanges deviennent plus résistants et plus dilatants avec l’augmentation de la teneur en fines. Ces résultats sont en accord avec les résultats expérimentaux de Thevanayagam et al. (2002). Par contre, ces résultats sont opposés aux résultats numériques obtenus par Taha et al. (2019) qui ont réalisé des simulations avec la densité relative  $D_R$  contrôlée. Cette opposition peut s’expliquer en comparant les valeurs de l’indice des vides global  $e$ , avec celles de l’indice des vides minimal  $e_{min}$  pour chaque mélange. En effet, la différence  $(e - e_{min})$  augmente avec la teneur en fines pour  $f_f < 30\%$  mais diminue quand  $f_f > 30\%$ . Ce constat explique pourquoi la résistance au cisaillement diminue avec  $f_f < 30\%$  mais augmente lorsque  $f_f > 30\%$ .

*B. Conséquences des méthodes d’écraçage*

Pour étudier les conséquences des méthodes d’écraçage sur les caractéristiques des sols, trois matériaux originaux de teneurs en fines de 20, 30 et 60% sont testés avec un diamètre maximal de 12 mm. Chaque sol original est écraçé et substitué en retirant 35% des particules non admissibles. Le diamètre admissible est déterminé à partir de la distribution granulométrique et correspondant à 75% de particules passant. Les caractéristiques de ces sols sont présentées dans le tableau 1.

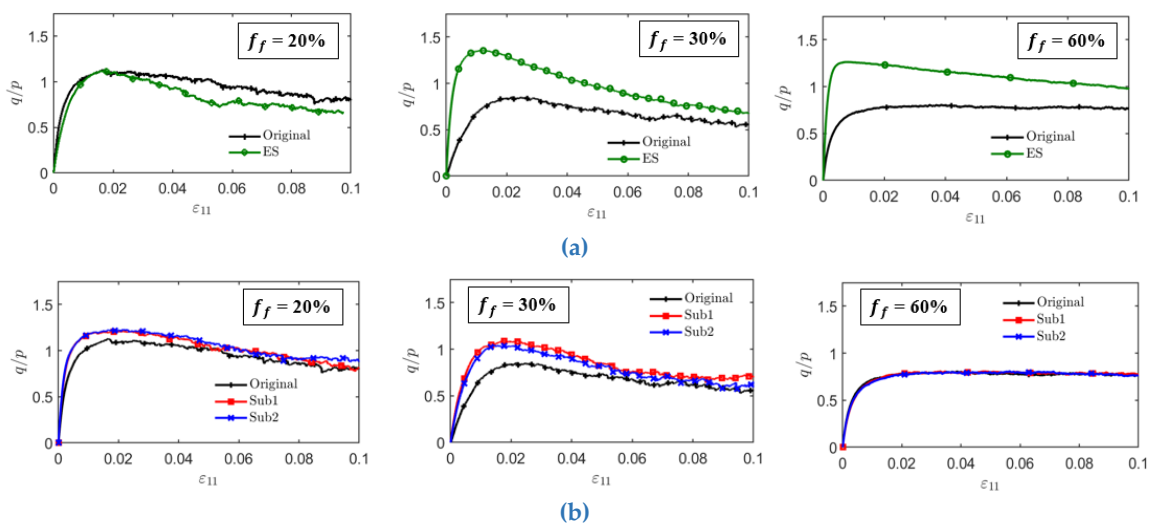
**TABLEAU 1.** Caractéristiques des matériaux testés.

Sol	$f_f$ (%)	$d_{max}$ (mm)
<b>Original</b>	<b>20</b>	<b>12</b>
Ecrêté	30	9.375
Sub1 et Sub2	20	9.375
<b>Original</b>	<b>30</b>	<b>12</b>
Ecrêté	46	9
Sub1 et Sub2	30	9
<b>Original</b>	<b>60</b>	<b>12</b>
Ecrêté	95	6.75
Sub1 et Sub2	60	6.75

La distribution granulométrique du sol original avec une teneur en fines de 30% et celles des sols écraçés et substitués correspondants sont présentées par la Fig. 2 (b). Cette figure présente également les distributions obtenues à l’aide des deux méthodes de substitution utilisées. La

première (Sub1) consiste à remplacer le matériau retiré par une masse égale de particules plus petites appartenant à toutes les classes granulaires de la fraction grossière. Par contre, avec la deuxième méthode (Sub2), seule la classe granulaire la plus proche du diamètre admissible est utilisée pour remplacer le matériau retiré. Il est important de noter que la teneur en fines augmente lorsque la méthode d'écrtage simple est utilisée (ici pour  $f_f = 30$ , l'écrtage induit son accroissement à 45%), par contre elle reste constante avec les deux méthodes de substitution.

La Fig. 4 présente les variations du rapport de contraintes déviatorique et moyenne en fonction de la déformation axiale. Les résultats montrent l'obtention d'une bonne estimation de la résistance au cisaillement pour  $f_f = 20\%$  et une surestimation pour  $f_f = 30$  et 60%.



**FIGURE 4.** Comportements mécaniques (a) des sols écrêtés et (b) des sols substitués avec les teneurs en fines originales de 20, 30 et 60%.

Ce résultat de simulation numérique peut s'expliquer par d'une part, l'influence de la teneur en fines sur la résistance au cisaillement de sol présentée par la Fig. 3 et d'autre part, par l'accroissement de la teneur en fines induit par l'écrtage simple. En effet, la méthode d'écrtage simple amène un accroissement de la teneur en fines qui passe de 20 à 30%, de 30 à 45% et de 60 à 95%. En ce qui concerne les sols substitués, les résultats sont similaires pour les deux méthodes de substitution : une surestimation pour  $f_f = 20$  et 30% et une bonne estimation pour  $f_f = 60\%$ . La surestimation de la résistance au cisaillement est expliquée par les résultats obtenus par l'étude numérique de Ali Hassan et al. (2021) et l'étude expérimentale de Seif El Dine (2007). Ces résultats montrent effectivement que la réduction de l'étalement granulométrique de la fraction grossière conduit à une augmentation de la résistance au cisaillement. Par contre, pour une teneur en fines importante ( $f_f = 60\%$ ), le comportement mécanique du sol est piloté par les fines et le changement de l'étalement granulométrique de la fraction grossière a un effet négligeable sur la résistance mécanique du sol.

#### IV. Etude expérimentale

A partir des précédents résultats et pour compléter l'étude numérique, des essais de compression triaxiale sont réalisés sur des sols de distribution granulométrique discontinue. Les sols testés sont des mélanges de sable et de graviers. Le sable utilisé est du sable de Fontainebleau avec des pourcentages égaux à 20, 30 ou 60%. Les graviers de la fraction 1,6-5mm proviennent de la sablière Palvadeau et pour la fraction 5-10mm les graviers proviennent d'une digue. Cette dernière fraction représente 30% de la masse totale du sol original. Pour l'écrêtage ou la substitution, tous les graviers de la digue sont retirés. Pour les deux méthodes de substitution, les graviers de la digue retirés sont remplacés par des graviers Palvadeau. La forme des particules utilisées dans cette étude est analysée à l'aide du logiciel ImageJ. Aucune différence significative n'est trouvée en termes de paramètres de forme tels que la circularité, la rondeur et la convexité, pour le sable de Fontainebleau, les graviers Palvadeau et les graviers de la digue. Les dispositifs triaxiaux utilisés permettent de tester des échantillons de deux tailles distinctes : petite ( $\Phi = 50$  mm et  $H = 100$  mm) et moyenne ( $\Phi = 100$  mm et  $H = 200$  mm). Enfin comme précédemment, l'indice des vides global est contrôlé.

Afin de vérifier la répétabilité des résultats obtenus avec les différentes cellules triaxiales, 10 essais triaxiaux drainés sont réalisés sur le sable de Fontainebleau en utilisant une fois la cellule  $\Phi = 50$  mm et une autre fois la cellule  $\Phi = 100$  mm, en contrôlant l'indice des vides global. Les résultats montrent une bonne répétabilité en termes de résistance au cisaillement avec une variation du rapport maximal de contraintes  $q/p$  autour de 1% de la valeur moyenne et une variation de l'angle de frottement au pic inférieur à  $1^\circ$ . De plus, aucun effet d'échelle n'a été remarqué.

##### A. Influence de la teneur en fines

Quatre mélanges avec des teneurs en fines de 20, 30, 45 et 60% sont testés. Les distributions granulométriques de ces sols et leurs comportements mécaniques sont présentés par la Fig. 5.

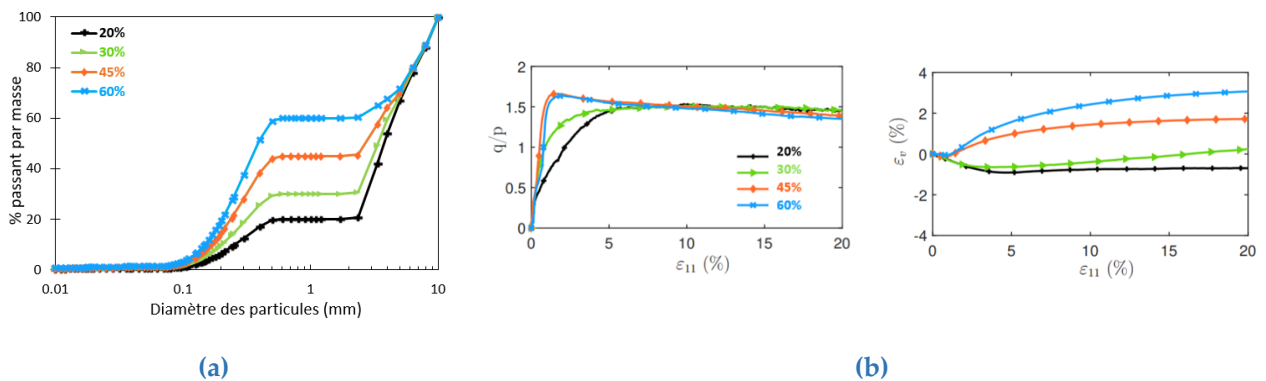


FIGURE 5. (a) Distributions granulométriques des sols testés et (b) variations du rapport de contraintes et de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale.

La variation du rapport de contraintes en fonction de la déformation axiale montre une convergence avec les résultats numériques déjà présentés. Nous pouvons effectivement noter un accroissement de la résistance mécanique avec l'augmentation de la teneur en fines. En ce qui concerne les déformations volumiques, il est difficile de trouver une corrélation avec la résistance au cisaillement. En effet, les sols ayant des teneurs en fines de 45 et 60% ont un comportement identique en contrainte, alors que leur déformation volumique est assez différente.

### B. Conséquences des méthodes d'écrêtage

La Fig. 6 présente le comportement des sols écrêtés et substitués en comparaison de celui des sols originaux. Concernant les sols écrêtés, une bonne estimation de la résistance au cisaillement est obtenue pour  $f_f = 60\%$ , ce qui diverge du résultat obtenu numériquement. Par contre, comme dans le cas des simulations numériques, une surestimation et une sous-estimation de la résistance au cisaillement sont respectivement obtenues pour  $f_f = 30$  et  $20\%$ . Cela corrobore donc la présence d'une teneur en fines optimale autour de  $30\%$ , en-dessous de laquelle le mélange devient plus résistant avec l'augmentation de la teneur en fines et au-delà de laquelle il devient moins résistant.

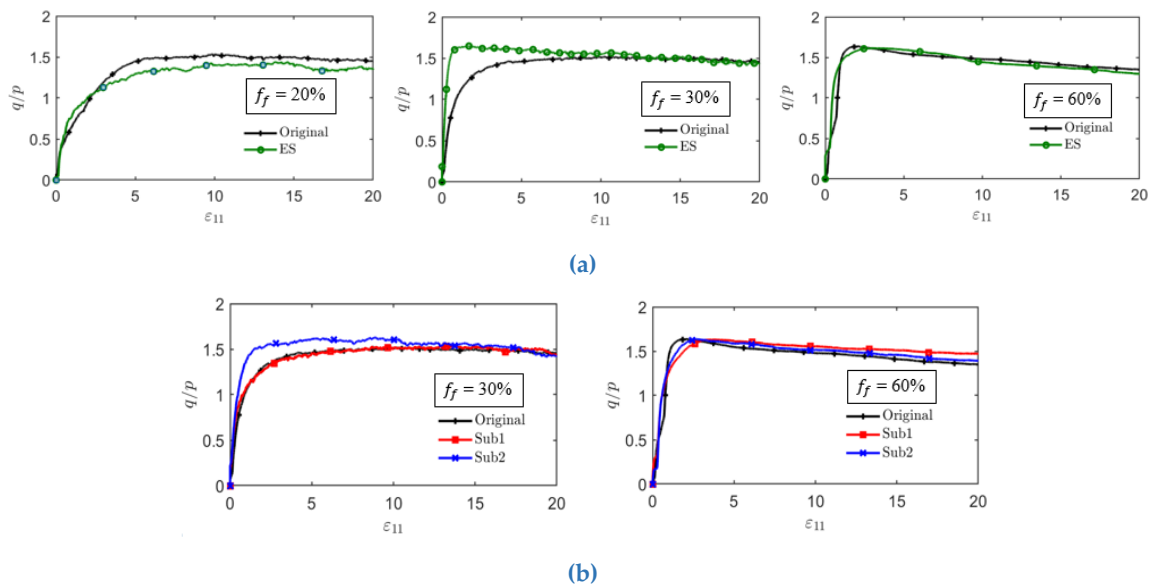


FIGURE 6. (a) Comportements des sols écrêtés et (b) des sols substitués avec les différents teneurs en fines.

Avec les deux méthodes de substitution, une bonne estimation de la résistance au cisaillement est obtenue pour  $f_f = 60\%$ . Pour  $f_f = 30\%$ , la première méthode de substitution (Sub1) permet d'obtenir une bonne estimation de la résistance au cisaillement. Par contre, la deuxième méthode de substitution (Sub2) conduit à une surestimation. Cette différence entre les effets des deux méthodes de substitution est attribuée à la discontinuité dans l'étalement granulométrique de la fraction grossière, qu'introduit la deuxième méthode de substitution. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour  $f_f = 30\%$ , indique que la surestimation obtenue numériquement avec la méthode (Sub1) n'apparaît pas expérimentalement. A ce stade, il convient de noter les effets opposés de deux facteurs : d'une part l'augmentation de la résistance mécanique avec la réduction de l'étalement granulométrique et d'autre part, la réduction de la résistance mécanique pour un matériau remplaçant (graviers Palvadeau) moins résistant que le matériau retiré (graviers de la digue). Or ce second facteur n'est pas pris en compte par les simulations numériques.

## V. Conclusion

Dans ce papier sont présentés les résultats d'une étude numérique et expérimentale sur l'influence de différentes méthodes d'écrêtage sur le comportement mécanique des sols grossiers non cohésifs. Les sols originaux testés ont une distribution granulométrique discontinue, avec différentes teneurs en fines. La méthode d'écrêtage simple et deux méthodes de substitution sont utilisées. Globalement, les résultats numériques et expérimentaux convergent. Les résultats montrent que pour un indice des vides global contrôlé, la méthode d'écrêtage simple aboutit à une surestimation ou une sous-estimation de la résistance au cisaillement du sol en fonction de la teneur en fines du sol original. Les conséquences de cette méthode sont essentiellement dues à l'augmentation de la teneur en fines. Les résultats de l'étude indiquent aussi la possibilité d'obtenir une bonne estimation à l'aide de la méthode de substitution Sub1. Par contre, des écarts de résistance apparaissent avec la méthode de substitution Sub2. Ces écarts sont essentiellement dus à la réduction de l'étalement granulométrique de la fraction grossière et à la différence de résistance entre le matériau retiré et le matériau remplaçant.

## VI. Remerciements

L'auteur tient à remercier les entreprises EDF et Verbund qui ont contribué au financement de ces travaux de recherche.

## REFERENCES

ASTM D4767-88 (1988), 'Standard test method for consolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils', *Standard ASTM 04.08*.

Cuisinier, O., Masrouri, F., Lavallée, E., Le Borgne, T. et al. (2018), 'Comportement mécanique des sols granulaires hétérogènes à matrice', *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*.

Ali Hassan, N., Nguyen, N. S., Marot, D. and Bendahmane, F. (2021), 'Effect of scalping on the mechanical behavior of coarse soils', *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering* 15(1), 64-74.

Andrianatrehina, N. L., Souli, H., Rech, J., Fry, J.-J., Fleureau, J.-M. and Taibi, S. (2016), 'Influence of the percentage of sand on the behavior of gap-graded cohesionless soils', *Comptes Rendus Mécanique* 344(8), 539-546.

NF P 94-074 (1994), 'Sols : reconnaissances et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution', *AFNOR (Association Française de Normalisation)*.

Seif El Dine, B. (2007), Etude du comportement mécanique des sols grossiers à matrice, *PhD thesis, Marne-la-Vallée, ENPC*.

Taha, H., Nguyen, N.-S., Marot, D., Hijazi, A. and Abou-Saleh, K. (2019), 'Micro-scale investigation of the role of finer grains in the behavior of bidisperse granular materials', *Granular Matter* 21(2), 1-17.

Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S. and Liang, J. (2002), 'Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts', *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 128(10), 849-859.