

ESTIMATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS GROSSIERS À MATRICE

ESTIMATION OF THE SHEAR STRENGTH OF COARSE-GRAINED 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 – Dans cet article, la courbe granulométrique obtenue par la méthode de granulométrie parallèle est modifiée en vue d'une meilleure estimation de la cohésion du sol grossier initial. Les résultats indiquent que la modification effectuée n'a pas d'effet sur l'angle de frottement et conduit à une cohésion plus faible que celle obtenue par la méthode de granulométrie parallèle.

ABSTRACT – In this paper, the grain size distribution curve obtained by the parallel gradation approach was modified to better estimate the cohesion of the initial coarse-grained soil. The results showed that this modification had no effect on the estimated friction angle and led to a lower cohesion than that obtained by the parallel gradation approach.

1. Introduction

Les sols granulaires hétérogènes à matrice sont des matériaux constitués d'éléments de quelques microns à plusieurs dizaines de centimètres. Ces matériaux peuvent être rencontrés dans divers projets : l'utilisation de granulats pour améliorer la stabilité des barrages et des digues ou des projets de remblais avec une disponibilité de sols grossiers naturels à proximité. Ainsi, la détermination de leurs caractéristiques mécaniques est essentielle. Cependant, la présence des grains de grande taille requiert l'utilisation de dispositifs de grandes dimensions. Par exemple, Ovalle et al. (2014) ont utilisé une cellule triaxiale de 1 m de diamètre pour déterminer la résistance au cisaillement de granulats de carrière. Toutefois, 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 reconstituer la granulométrie des éprouvettes : l'écrêtement, la substitution et la granulométrie parallèle.

Parmi ces approches, la granulométrie parallèle est la plus utilisée. Cette approche conserve la forme de la courbe granulométrique du sol initial, donc le rapport entre les tailles de grains afin de créer un modèle réduit du sol initial. 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. Plusieurs auteurs ont montré que le matériau reconstitué par granulométrie parallèle avait un angle de frottement identique ou légèrement supérieur à celui du sol grossier initial en fonction la contrainte de confinement (Marachi et al., 1972; Indraratna et al., 1993; Hu et al., 2011; Ovalle et al., 2014; Xiao et al., 2014). Cette différence de résistance mécanique est due à un taux de rupture des grains plus important

lorsque les grains sont de plus grande taille (Frossard et al., 2012; Ovalle et al., 2014). Ainsi, pour de faibles contraintes de confinement, la méthode de granulométrie parallèle apparaît comme un moyen d'estimer de manière satisfaisante la résistance au cisaillement du sol grossier. Cependant, lorsque le sol grossier initial contient des fines (particules de taille inférieure à 0,08 mm), la méthode de granulométrie parallèle entraîne une augmentation du pourcentage de fines dans le sol reconstitué. L'influence de cette augmentation a été étudiée par Kouakou et al. (2018, 2019). Les auteurs ont montré que l'augmentation du pourcentage de fines dans le sol reconstitué par la méthode de granulométrie parallèle aboutit à une bonne estimation de l'angle de frottement et une surestimation de la cohésion du sol grossier initial. Cette étude s'inscrit dans la continuité de ces résultats. L'objectif est de savoir si en limitant l'augmentation du pourcentage de fines dans le sol reconstitué, la cohésion et de l'angle de frottement du sol grossier initial seraient bien estimés. Ainsi, la résistance au cisaillement de deux matériaux à granulométrie parallèle et celle de ces mêmes matériaux modifiés sont déterminées et comparées afin de mettre en évidence l'effet de cette modification sur les paramètres de rupture du sol.

2. Matériel et méthodes

2.1. Appareillages de cisaillement

Dans le cadre de cette étude, deux boîtes de cisaillement direct ont été utilisées : une grande boîte de dimensions 300 x 300 x 180 mm³ et une moyenne boîte de dimensions 150 x 150 x 180 mm³.

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. Les capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition qui transmet les données à un logiciel pour enregistrement et visualisation.

La moyenne boîte de cisaillement est obtenue en plaçant dans la grande boîte des adaptateurs afin de réduire sa section. Sa hauteur est fixée de sorte à avoir un rapport longueur / hauteur équivalent à celui de la grande boîte.

2.2. Stratégie expérimentale et caractéristiques du matériau support de l'étude

La méthode de granulométrie parallèle induit une augmentation du pourcentage de fines dans le sol reconstitué. Les résultats obtenus par Kouakou et al. (2018) ont montré que cette augmentation n'impacte pas l'estimation de l'angle de frottement. En revanche, elle aboutit à une surestimation de la cohésion du sol initial. Cette étude se propose de limiter l'augmentation du pourcentage de fines dans le sol reconstitué en vue d'une meilleure estimation de la cohésion du sol initial. Pour ce faire, quatre éprouvettes ont été reconstituées (deux par la méthode de granulométrie parallèle et deux par la méthode de granulométrie parallèle modifiée) et leurs résistances au cisaillement ont été comparées. Le matériau étudié est une grave naturelle de granulométrie 0-120 mm (GN120). Les dimensions des dispositifs disponibles acceptant une taille maximale de grains de 30 mm, les grains de taille supérieure à 30 mm sont écartés. Puis, les éprouvettes GN30 (15 % de fines) et GN15 (19,8 % de fines) de granulométrie parallèle au sol initial GN120 (4,3 % de

fines) sont reconstituées. Les éprouvettes GN30m et GN15m ont été reconstituées en modifiant les courbes granulométriques de GN30 et GN15 de la manière suivante :

- Les pourcentages des 70 % des grains les plus gros sont conservés afin d'avoir les mêmes types de contacts inter-particules que les matériaux originaux. En effet, il n'y a pas de modification de l'arrangement initial des grains du sol tant que le pourcentage la fraction grossière est supérieur à 70 % (Vallejo et Mawby, 2000; Monkul et Ozden, 2007).
- Le pourcentage de fines de GN30m et GN15m est pris identique à celui du sol initial GN120 (4,3 %).
- Le pourcentage des fractions restantes est calculé en conservant le ratio qu'ont ces mêmes fractions dans le sol initial GN120.

Les courbes granulométriques des différents matériaux sont présentées sur la Figure 1.

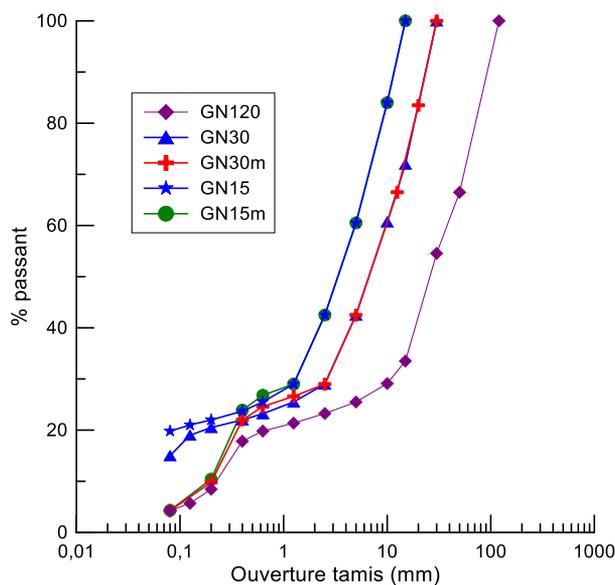


Figure 1 : Courbes granulométriques des matériaux étudiés

2.3. 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 une teneur en eau de 8 % pour GN30 et GN30m (teneur en eau optimale de GN30) et 9,6 % pour GN15 et GN15m (teneur en eau optimale de GN15). Ces échantillons sont ensuite conservés dans des sacs hermétiques pendant au moins un jour pour permettre une bonne homogénéisation de l'eau. Les éprouvettes sont compactées statiquement en trois couches jusqu'à atteindre la densité sèche de 2 Mg/m³. La saturation des éprouvettes se fait en remplissant le bac de l'appareillage de cisaillement et en laissant reposer pendant 24h minimum. Après la saturation, les éprouvettes sont consolidées sous l'effort normal voulu puis cisillées à une vitesse de déformation constante de 0,017 %/min.

3. Résultats

3.1. Estimation par la méthode de granulométrie parallèle

Les résultats des essais de cisaillement des matériaux de granulométrie parallèle GN15 et GN30 sont présentés sur la Figure 2. La forme des courbes de cisaillement des deux éprouvettes est similaire sous toutes les contraintes appliquées : une forte augmentation de la résistance au cisaillement jusqu'à 2 à 4 % de déplacement relatif, puis la résistance au cisaillement atteint progressivement une valeur constante après 4 à 6 % de déplacement relatif suivant la contrainte normale appliquée. La résistance au cisaillement de GN15 est supérieure de 11 à 20 % à celle de GN30.

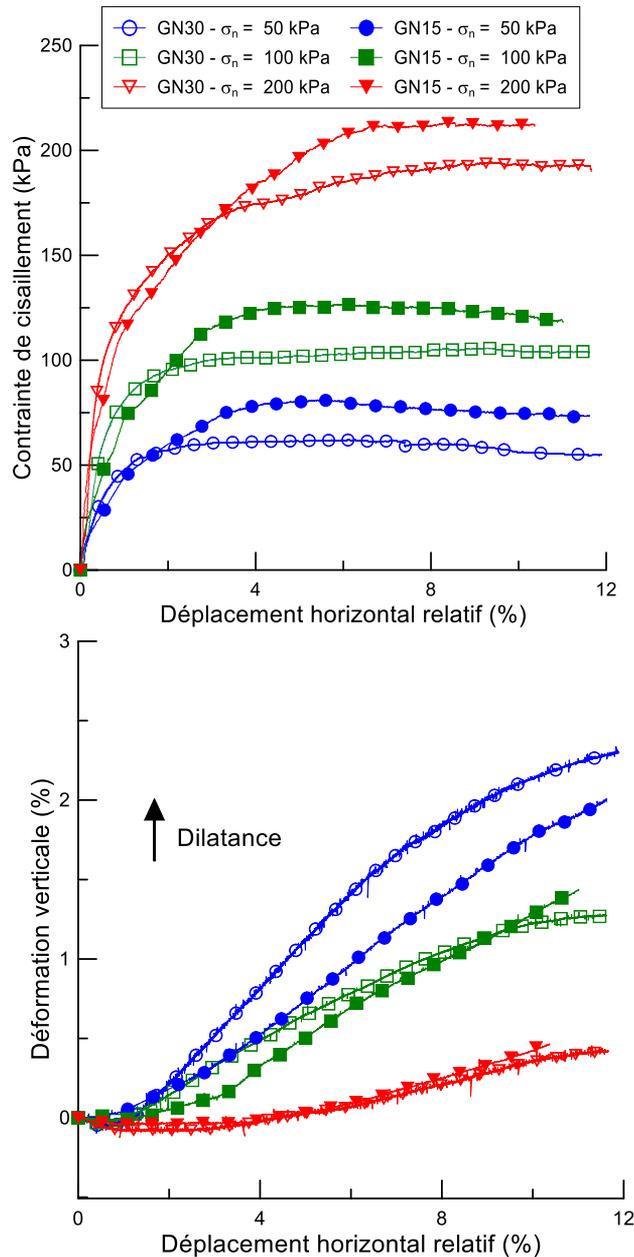


Figure 2 : Résistance au cisaillement des éprouvettes à granulométrie parallèle GN30 et GN15

Les courbes de variation de volume des deux éprouvettes sont constituées d'une phase de contractance se terminant entre 1 et 3 % de déplacement relatif et d'une phase de dilatance s'étendant jusqu'à la fin de l'essai. Sous 50 kPa de contrainte normale, la dilatance

de GN30 est supérieure d'environ 0,2 % à celle de GN15. En revanche, les courbes des deux éprouvettes sont proches sous les contraintes normales de 100 et 200 kPa.

Le critère de rupture communément utilisé pour analyser la rupture des sols est celui de Mohr-Coulomb avec une cohésion et un angle de frottement constants. Cependant, la résistance au cisaillement réelle du sol est incurvée aux faibles contraintes normales. Le critère de De Mello (1977), parabolique, rend mieux compte de ce comportement. Ce critère se présente sous la forme :

$$\tau = A\sigma_n^b \quad (1)$$

Dans la suite, les critères de rupture des matériaux selon présentés selon le modèle de Mohr-Coulomb et celui de De Mello.

Les critères de rupture des éprouvettes GN30 et GN15 selon le modèle de Mohr-Coulomb sont présentés sur la Figure 3. Il apparaît que l'angle de frottement des deux matériaux sont similaires, tandis que la cohésion de GN15 est supérieure d'environ 15 kPa à celle de GN30. Ce résultat est en accord avec celui de Kouakou et al (2018), qui indique que l'augmentation du pourcentage de fines dans le sol reconstitué par granulométrie parallèle induit une surestimation de la cohésion du sol grossier initial.

Les critères de rupture représentés selon le modèle de De Mello (Figure 3) indiquent des valeurs similaires du paramètre b et une augmentation du paramètre A avec le pourcentage de fines. Ainsi, le paramètre b évolue comme l'angle de frottement et le paramètre A comme la cohésion du critère de Mohr-Coulomb.

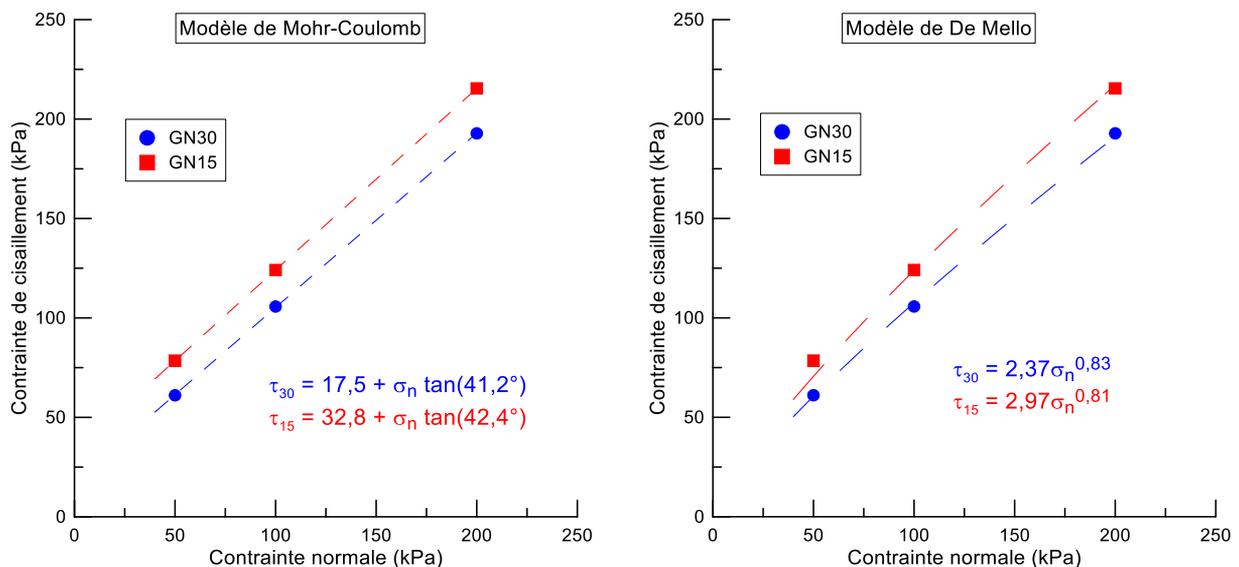


Figure 3 : Critères de rupture de GN30 et GN15 selon le modèle de Mohr-Coulomb (à gauche) et celui de De Mello (à droite)

3.2. Estimation par la méthode de granulométrie parallèle modifiée

Les résultats des essais de cisaillement des éprouvettes de granulométrie parallèle modifiée GN30m et GN15m sont présentés sur la Figure 4. La résistance au cisaillement de l'éprouvette GN30m augmente et atteint une valeur constante après 1 à 6 % de déplacement relatif en fonction de la contrainte normale appliquée. Quant à la résistance au cisaillement de GN15m, elle augmente jusqu'à une valeur maximale puis baisse d'environ 8 kPa à la fin de l'essai pour toutes les contraintes appliquées. Les contraintes de cisaillement maximales de GN15m sont supérieures de 10 à 20 % à celles de GN30m.

Les courbes de variation de volume des deux éprouvettes admettent une phase de contractance suivie d'une phase de dilatance sauf celle de GN30m sous 200 kPa de contrainte normale qui est contractante durant tout l'essai. Les valeurs de dilatance de GN15m sont supérieures de 1 à 1,5 % à celles de GN30m.

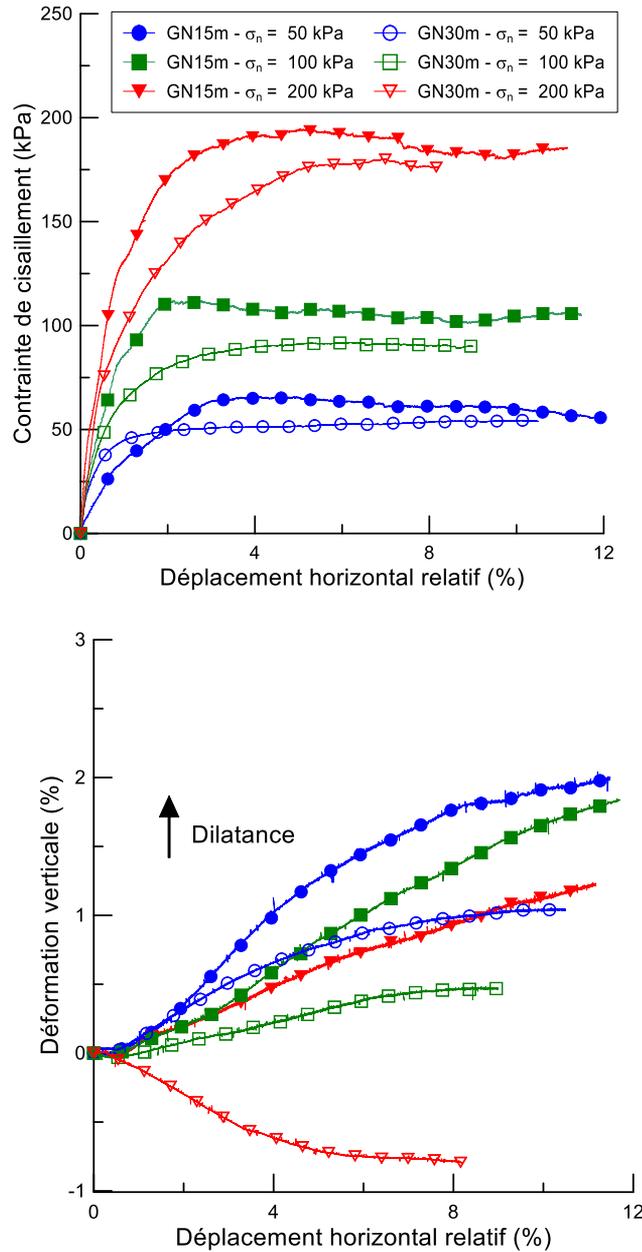


Figure 4 : Résistance au cisaillement des éprouvettes à granulométrie parallèle modifiée GN30m et GN15m

Les angles de frottement des éprouvettes GN30m et GN15m sont similaires, tandis que la cohésion de GN15m est supérieure de 9 kPa à celle de GN30m (Figure 5). Dans le modèle de De Mello, les valeurs de b sont similaires, et le paramètre A de GN15m est supérieur de 24 % à celui de GN30m. L'attribution du même pourcentage de fines aux deux éprouvettes n'a pas permis d'avoir la même cohésion.

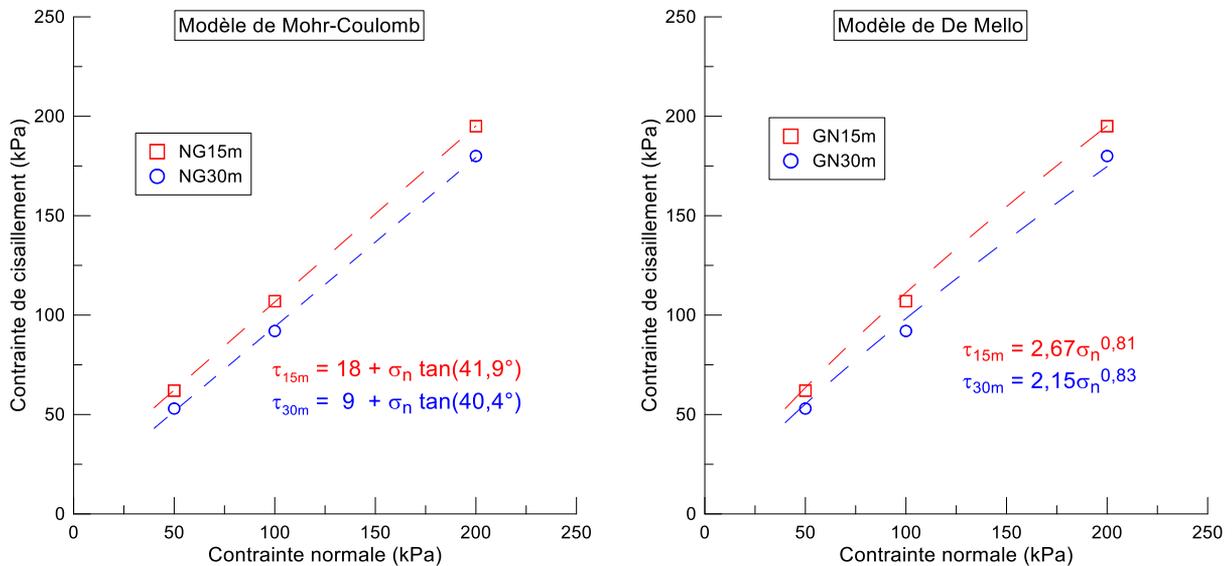


Figure 5 : Critères de rupture des éprouvettes GN15m et GN30m

3.3. Discussion sur l'effet de la modification de la courbe granulométrique

Les critères de rupture des matériaux GN30 et GN15 obtenus par la méthode de granulométrie parallèle ainsi que ceux de GN30m et GN15m obtenus par la méthode de granulométrie parallèle modifiée sont présentés sur la Figure 6. Les angles de frottement de toutes les éprouvettes sont similaires. En effet, l'angle de frottement est essentiellement dépendant des contacts intergranulaires dans le sol. La méthode de granulométrie parallèle garantit la similarité de ces contacts entre sols initial et reconstitué pour un pourcentage de fines ne modifiant pas la structure initiale du sol, soit inférieur à 30 % (Vallejo et Mawby, 2000; Monkul et Ozden, 2007). Ainsi, les quatre éprouvettes ont des structures similaires, conduisant à des angles de frottement similaires.

Avec la méthode de granulométrie parallèle, la surestimation de la cohésion s'explique par le pourcentage de fines plus élevé dans le sol reconstitué. Ainsi, Kouakou et al. (2020) ont proposé une corrélation permettant de déterminer la cohésion du sol grossier initial suivant son pourcentage de fines. Par ailleurs, la réduction du pourcentage de fines dans les éprouvettes modifiées a conduit à une cohésion plus faible. Cependant, les éprouvettes modifiées ont des cohésions différentes malgré leur pourcentage de fines identique. Cette différence pourrait être due au choix de la densité sèche des deux éprouvettes. En effet, les deux éprouvettes ont été testées à la même densité sèche. Cependant, les courbes de cisaillement des deux éprouvettes sont proches à la fin de l'essai. Ainsi, une étude paramétrique sur le choix de la densité sèche des éprouvettes pourrait éventuellement aboutir à une estimation satisfaisante de la résistance au cisaillement du sol grossier initial.

4. Conclusion

L'objectif de cette étude était de savoir si en modifiant la courbe granulométrique du sol reconstitué par granulométrie parallèle de sorte à limiter l'augmentation de son pourcentage de fines, la cohésion et l'angle de frottement du sol initial seraient mieux estimés. Les résultats ont montré que la modification granulométrique effectuée n'impacte pas l'angle de frottement du matériau initial. Elle aboutit même à une cohésion plus faible que celle obtenue par granulométrie parallèle. Cependant, la cohésion obtenue ne peut être directement considérée comme une estimation de la cohésion du sol grossier initial car les deux éprouvettes reconstituées ont des cohésions différentes malgré leur pourcentage de fines identique. Une étude paramétrique sur le choix de la densité sèche des éprouvettes

pourrait permettre de mieux estimer la résistance au cisaillement du sol grossier initial par la méthode de granulométrie parallèle modifiée.

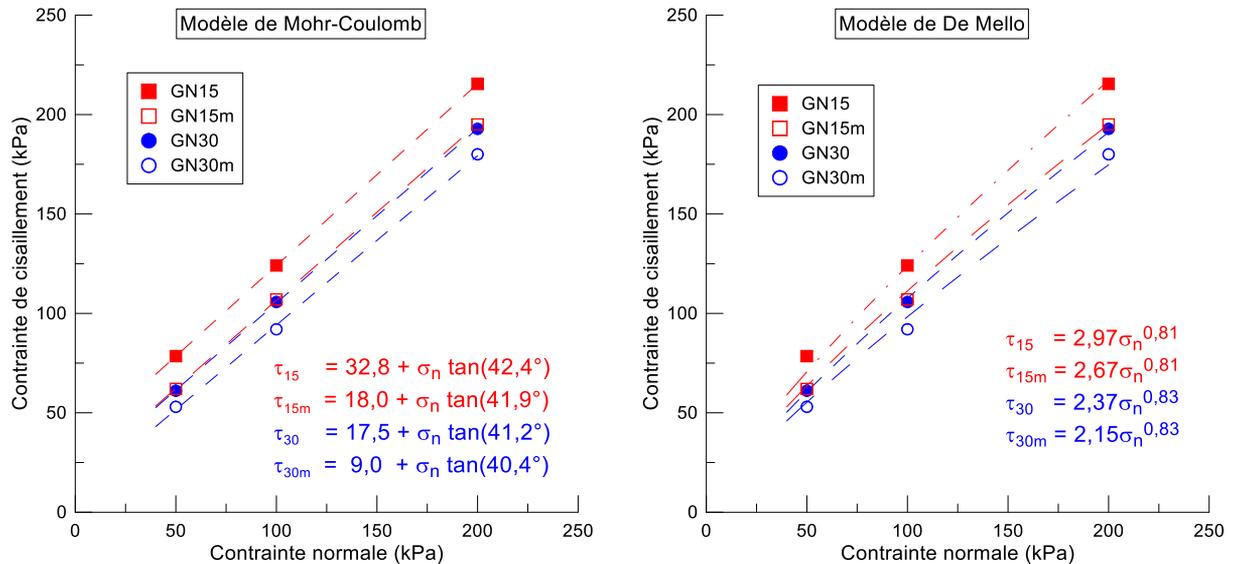


Figure 6 : Critères de rupture des éprouvettes GN30, GN15 (granulométrie parallèle), GN30m et GN15m (granulométrie parallèle modifiée)

5. Références bibliographiques

- De Mello, V.F.B. (1977). Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams. *Géotechnique* 27, 281–355.
- Frossard, E., Hu, W., Dano, C., and Hicher, P.-Y. (2012). Rockfill shear strength evaluation: a rational method based on size effects. *Géotechnique* 62, 415–427.
- Hu, W., Dano, C., Hicher, P.-Y., Le Touzo, J.-Y., Derkx, F., and Merliot, E. (2011). Effect of Sample Size on the Behavior of Granular Materials. *Geotech. Test. J.* 34, 186–197.
- Indraratna, B., Wijewardena, L.S.S., and Balasubramaniam, A.S. (1993). Large scale triaxial testing of greywacke rockfill. *Géotechnique* 43, 37–51.
- Kouakou, N., Cuisinier, O., Masrouri, F., Lavallée, E., and Le Borgne, T. (2018). Comportement mécanique des sols granulaires hétérogènes à matrice. *JNGG2018 (Champs-sur-Marne)*, 8p.
- Kouakou, N.M., Cuisinier, O., Masrouri, F., Lavallée, E., and Le Borgne, T. (2019). Estimation of the shear strength of a coarse soil with high fines content by parallel gradation method. In *E3S Web of Conferences, IS-Glasgow 2019*.
- Kouakou, N.M., Cuisinier, O., and Masrouri, F. (2020). Estimation of the shear strength of coarse-grained soils with fine particles. *Transp. Geotech.* 25.
- Marachi, N.D., Chan, C.K., and Seed, H.B. (1972). Evaluation of properties of rockfill materials. *J. Soil Mech. Found. Div.* 98, 95–114.
- Monkul, M.M., and Ozden, G. (2007). Compressional behavior of clayey sand and transition fines content. *Eng. Geol.* 89, 195–205.
- 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* 225, 2199–2216.
- Vallejo, L.E., and Mawby, R. (2000). Porosity influence on the shear strength of granular material–clay mixtures. *Eng. Geol.* 58, 125–136.
- Xiao, Y., Liu, H., Chen, Y., and Zhang, W. (2014). Particle size effect in granular soil under true triaxial conditions. *Géotechnique* 64, 667–672.