

Essais de ségrégation en laboratoire sur de la pierre concassée en utilisant la table vibrante

Zahia Makkeb, Robert P. Chapuis
Département CGM, Polytechnique Montréal, Montréal (Québec), Canada
Djaouida Chenaf
Département de génie civil, RMC, Kingston (Ontario), Canada



GeoCalgary
2022 October
2-5
Reflection on Resources

RÉSUMÉ

De nombreux sols granulaires sont sujets au phénomène de ségrégation. Ce phénomène peut se produire facilement pendant le déchargement, le transport, le stockage, le mélange, la mise en place et le compactage des matériaux. Dans les ouvrages en remblai, la ségrégation peut conduire à un fonctionnement défectueux de différentes zones, telles que les filtres, les transitions et les drains, ce qui peut menacer la sécurité et la durabilité de ces ouvrages. Cet article présente une méthodologie et une procédure de laboratoire pour réaliser des essais de ségrégation sur des sols granulaires. Quinze granulométries différentes de pierre concassée ont été testées. La méthode expérimentale utilise une table vibrante suivant la norme ASTM D4253. La quantification de la ségrégation repose sur l'analyse granulométrique en fonction de la profondeur dans le matériau sec qui a été soumis aux vibrations. Les résultats expérimentaux révèlent que les matériaux à courbes granulométriques serrées font peu ou pas de ségrégation, tandis que les matériaux à courbes granulométriques étalées peuvent faire de la ségrégation. La ségrégation apparaît comme une forme d'instabilité interne qui, selon les résultats obtenus, est prévisible par les critères connus d'instabilité interne et de mobilité des fines.

ABSTRACT

Many granular soils are prone to the phenomenon of segregation. Segregation can occur easily during unloading, transport, storage, mixing, placement and compaction of materials. In backfill structures, segregation can lead to defective behaviour of various zones, such as filters, transitions and drains, which can threaten the safety and durability of these structures. This paper presents a methodology and laboratory procedure to perform segregation tests on granular soils. Fifteen different grain sizes of crushed stone were tested. The experimental method uses a vibrating table according to standard ASTM D4253. The quantification of segregation is based on particle size analysis as a function of depth in the dry material that has been subjected to vibrations. Experimental results reveal that materials with a narrow grain size distributions do not segregate, whereas materials with a spread grain size distribution can segregate. This internal instability was predictable from fines mobility criteria. Segregation appears to be a form of internal instability which, according to the results obtained, is predictable by the known criteria for internal instability and mobility of fines.

1 INTRODUCTION

Dans les structures en remblai, la fonctionnalité mécanique et hydraulique de chaque zone dépend principalement du sol construit, qui à son tour est considérablement sensible à la structure et à la distribution granulométrique du sol (Fell et al. 2014). Par conséquent, toute ségrégation ou séparation de particules peut rendre le sol inefficace pour répondre à ses exigences (remplir ses fonctions).

Des altérations de la fonctionnalité hydromécanique du sol, à savoir la perméabilité, l'érodabilité, la stabilité interne et la capacité de rétention, peuvent résulter directement de la ségrégation. Le fonctionnement approprié et réussi des filtres et des transitions dépend du placement et de la construction corrects de ces couches de matériau granulaire dans le corps de la structure (Fema, 2011; USBR, 2011).

Dans les solutions théoriques de drainage et dans les critères de filtres couramment utilisés, il est implicitement supposé que les couches adjacentes ont des courbes granulométriques invariables, sont homogènes et stables. Ce qui n'est pas toujours vrai dans les conditions de terrain,

car elles peuvent devenir hétérogènes en raison de la ségrégation des particules. Les sols sujets à la ségrégation peuvent être ceux constituant les noyaux des barrages ainsi que leurs zones de transitions, d'épaulement et d'enrochements, mais aussi les corps de chaussées et leurs accotements, les drains formés de filtres autour des tuyaux, etc.

Jusqu'à présent, des règles et des directives simples ont été proposées et adoptées pour minimiser les risques de ségrégation dans les matériaux granulaires (Fema, 2011; USBR, 2011). Des études expérimentales limitées concernant la ségrégation des matériaux routiers sont disponibles dans la littérature. En outre, une approche unifiée pour définir et quantifier la ségrégation du sol n'est pas disponible, et il manque des procédures de test universellement acceptées.

Cet article présente les résultats d'un programme d'essais conçu pour évaluer le potentiel de ségrégation de la pierre concassée 0-20 mm. Des tests de compaction à sec ont été réalisés à l'aide de la table vibrante. La procédure des essais était basée sur la norme (ASTM, 2006b) D4253. L'article commence par la présentation des matériaux

granulaires sélectionnés pour l'étude, suivie de la description du montage expérimental et de la procédure. Enfin, les résultats sont présentés et discutés.

2 MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Le Cahier des Charges et Devis généraux (CCDG) du Ministère des Transports du Québec (MTQ) présente les fuseaux granulométriques à respecter pour les matériaux utilisés en enrobage de conduites, que ce soit pour les égouts, l'eau potable, les câbles électriques ou les conduites de gaz naturel. Ces matériaux sont identifiés par les lettres CG, pour coussin granulaire, suivi de la taille maximale nominale des granulats. Le CG 14 est utilisé comme coussin et enrobage de conduites. Le CG 20 est utilisé comme enrobage de conduites et d'ouvrages d'art. Le CG 20 c sert comme coussin et enrobage de conduites sous la ligne de gel.

Pour cette étude, 5 courbes granulométriques ont été testées pour chacun des 3 fuseaux prescrits par le CCDG; la maximale (T), la minimale (B), la moyenne (M) et deux courbes croisées (X, Y). La Figure 1 présente les courbes granulométriques testées. Au total 15 granulométries ont été reconstituées à partir des fractions granulométriques stockées dans des chaudières (Figure 1).

La densité des grains solides (G_s) est déterminée par pycnomètre à eau pour $d < 5$ mm (D854 (ASTM, 2006a) et par la méthode de la pesée hydrostatique des échantillons submergés pour $d \geq 5$ mm (C127 (ASTM, 2012)). Les valeurs de G_s varient de 2.75 à 2.76 pour la pierre concassée 0-20 mm (Tableau 1).

2.1 Procédure expérimentale

La norme D4253 (ASTM, 2006b) a été utilisée comme référence dans la réalisation des essais de ségrégation.

Après la reconstitution des granulométries, le spécimen de 11 kg est mélangé et homogénéisé à son état sec. L'homogénéisation est faite de façon à produire le moins possible de ségrégation. L'échantillon est placé dans un moule standard, d'une capacité de 2830 cm³ et de diamètre de 151 mm, par le moyen d'une cuillère de laboratoire pour $d_{max} \geq 10$ mm ou par un entonnoir pour $d_{max} < 10$ mm. Une fois le moule rempli, la surface de l'échantillon est arasée au niveau du rebord en utilisant une règle métallique, puis le moule est placé et fixé sur la table vibrante. Le niveau initial du sol est relevé manuellement par le lecteur comparateur (Dial Gauge) avant chaque début d'essai. Ensuite une charge de 25.9 kg est placée sur le plateau de surcharge dans le manchon-guide par le moyen d'un dispositif de soulèvement (Figure 2). Le spécimen sec a été soumis à des vibrations verticales d'une durée totale de 8 min à une fréquence de 60 Hz.

Les trois premiers échantillons ont été soumis à des vibrations entrecoupées par des mesures de tassement espacées de 30 s, puis 10 s, puis 1 s dans le but de déterminer le pas de temps qui décrit le mieux l'évolution de la courbe de tassement.

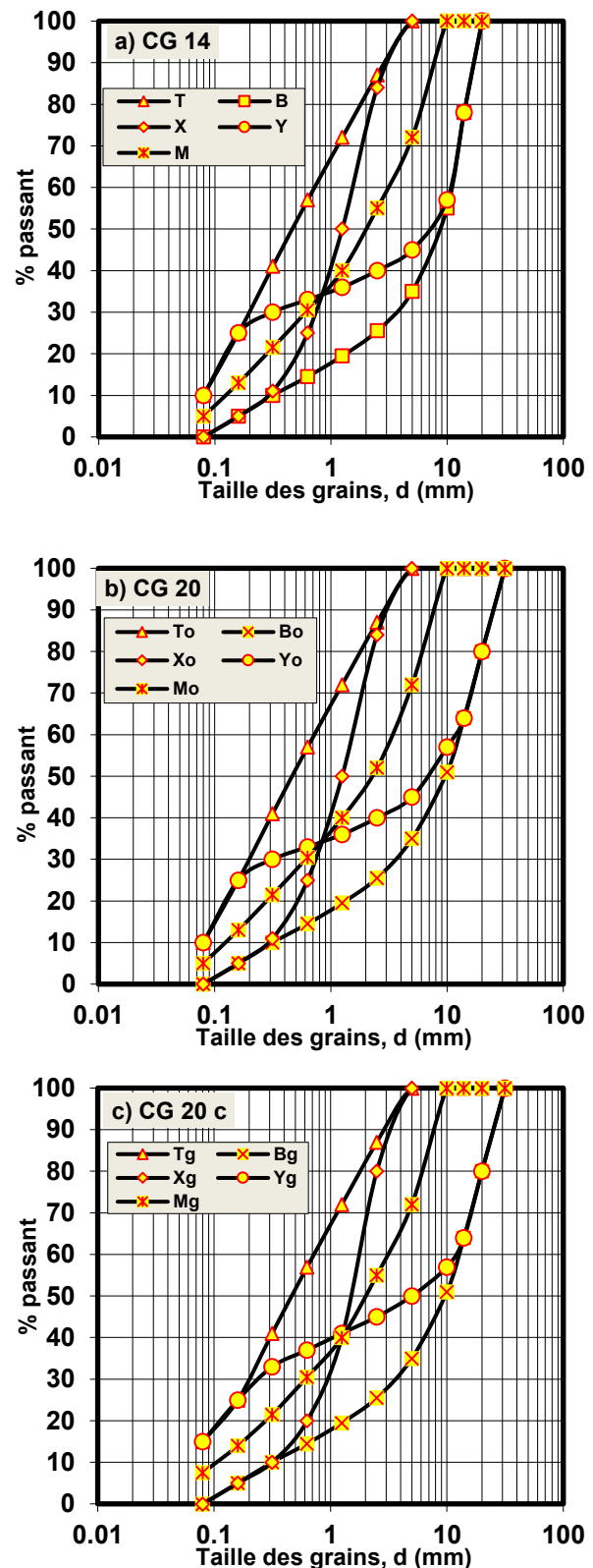


Figure 1: Les courbes granulométriques sélectionnées a) CG14, b) CG20, c) Cg 20 c

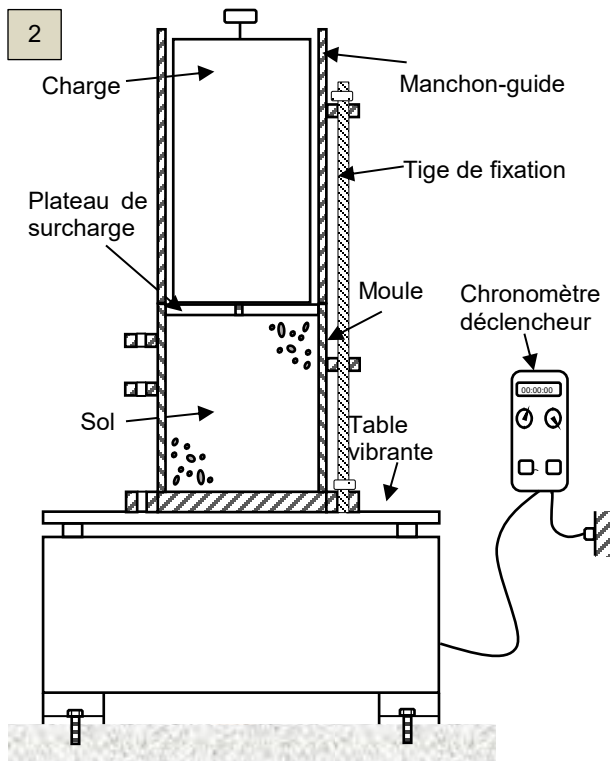
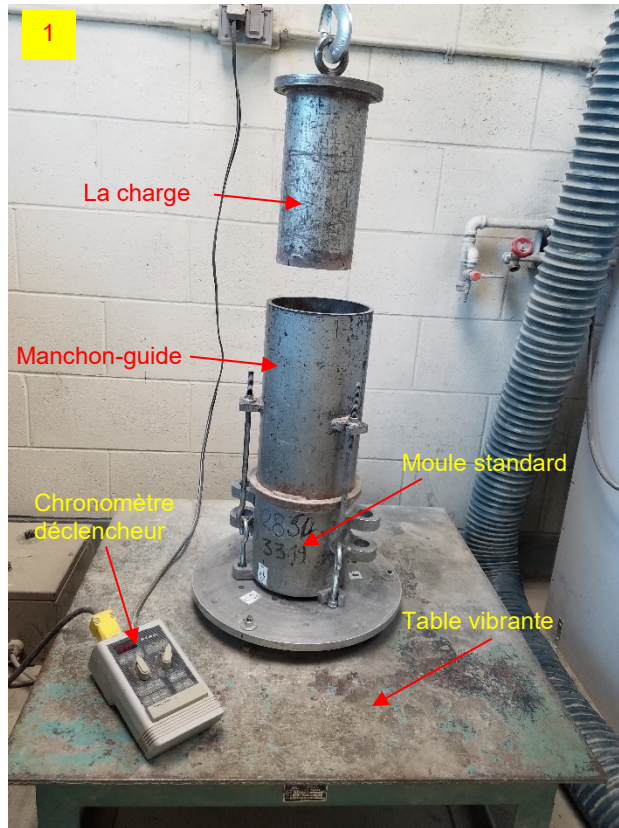


Figure 2: 1) Dispositif expérimental 2) Schéma du dispositif expérimental

À la fin de l'essai, l'échantillon est divisé en trois fractions : la fraction supérieure du moule (T), la fraction centrale (C) et la fraction inférieure du moule (B). Ensuite, chaque fraction de l'échantillon est tamisée séparément pour obtenir trois courbes granulométriques qui seront comparées à la distribution granulométrique initiale de l'échantillon afin d'avoir des renseignements sur le déplacement des particules fines du matériau.

2.2 Validation de l'essai

Chaque essai de ségrégation a été reproduit deux fois pour la validation. Une comparaison est faite entre les courbes granulométriques des deux essais de vibration tout en vérifiant la précision de l'analyse granulométrique (Contant, 1989; Keyser, 1975), si non satisfaite, un troisième essai est reproduit.

2.3 Stabilité interne

La stabilité interne des granulométries étudiées est évaluée par les critères usuels (Kenney et al., 1985; Kezdi, 1969; Sherard, 1979) modifiés par (Chapuis, 1992) et améliorés par (Chapuis et Tournier, 2006). Ces critères graphiques sont rapides à vérifier, ainsi la méthode de Kezdi (1969) signifie que si une partie de la courbe granulométrique a une pente inférieure à 24.9% par cycle log, le sol ne peut pas retenir les solides plus petits que la taille à laquelle cette condition se produit (Chapuis 1992). La méthode de Sherard (1979) signifie que si une partie de la courbe granulométrique a une pente inférieure à 21.5% par cycle log, le sol ne peut pas retenir les solides plus petits que la taille à laquelle cette condition se produit (Chapuis 1992). La méthode de Kenney and Lau (1985) consiste à choisir un point d'abscisse d_x et d'ordonnée y_x sur la distribution granulométrique tel qu'en ce point, la pente de la courbe granulométrique soit plus grande que celle de la courbe de l'Équation 1 :

$$y/y_x = (d/d_x)^{0.7213} \quad [1]$$

En appliquant ces critères à chacun des 3 fuseaux du CCDG, on constate que la limite inférieure des coussins granulaires est vulnérable à la suffosion contrairement à la limite supérieure qui relativement aurait une stabilité interne (Tableau 1).

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Essais de ségrégation

La ségrégation est quantifiée par l'analyse granulométrique après avoir divisé chaque échantillon, préalablement soumis aux vibrations, en trois parties.

Les échantillons ayant les granulométries B, Y, B₀, Y₀, B_g, Y_g et X_g présentent de la ségrégation. En revanche, les courbes M, T, T₀ et T_g ne présentent pas ou peu de ségrégation. Ces résultats étaient anticipés par les critères d'érosion interne.

Tableau 1: Résultats des essais

	Sol	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c	G _s	USCS	Stabilité interne		
									Kezdi	Sherard	Expérimental
CG14	B	0.315	3.7	11.3	35.87	3.85	2.76	GP	NON	NON	NON
	M	0.125	0.62	3.17	25.36	0.97	2.75	SP-SM	OUI	OUI	OUI
	T	0.08	0.2	0.73	9.13	0.68	2.75	SP-SM	OUI	OUI	OUI
	X	0.29	0.75	1.55	5.34	1.25	2.75	SP	NON	NON	OUI
	Y	0.08	0.315	7.3	91.25	0.17	2.76	GP-GM	NON	NON	NON
CG20	Bo	0.315	3.7	13.1	41.59	3.32	2.76	GP	NON	NON	NON
	Mo	0.125	0.62	3.42	27.36	0.90	2.75	SP-SM	OUI	OUI	NON
	To	0.08	0.2	0.73	9.13	0.68	2.75	SP-SM	OUI	OUI	OUI
	Xo	0.29	0.75	1.55	5.34	1.25	2.75	SP	NON	NON	OUI
	Yo	0.08	0.315	12.22	152.75	0.10	2.76	GP-GM	NON	NON	NON
CG20c	Bg	0.315	3.7	13.1	41.59	3.32	2.76	GP	NON	NON	NON
	Mg	0.11	0.62	3.17	28.82	1.10	2.75	SP-SM	OUI	OUI	NON
	Tg	0.06	0.2	0.73	12.17	0.91	2.75	SP-SM	OUI	OUI	OUI
	Xg	0.315	0.95	1.78	5.65	1.61	2.75	SP	NON	NON	NON
	Yg	0.06	0.24	12.4	206.67	0.08	2.76	GP-GM	NON	NON	NON

L'analyse granulométrique, des trois parties de chaque échantillon dont la ségrégation a été détectée, montre que la partie supérieure de l'échantillon dans le moule est dépourvue des fines contrairement à sa partie inférieure qui est riche de particules fines. Par contre, la distribution granulométrique de la couche centrale est, entre autre, similaire à la distribution initiale de l'échantillon. Ceci s'explique par le fait que les particules libres de petites tailles ont migré sous la sollicitation mécanique de la table vibrante, à l'intérieur de la matrice primaire de l'échantillon.

À l'opposé, les granulométries stables ont subi des variations insignifiantes du pourcentage passant de chacun des tamis pour les trois parties. Il est donc possible de présumer que ces granulométries ne présentent pas de problème de ségrégation.

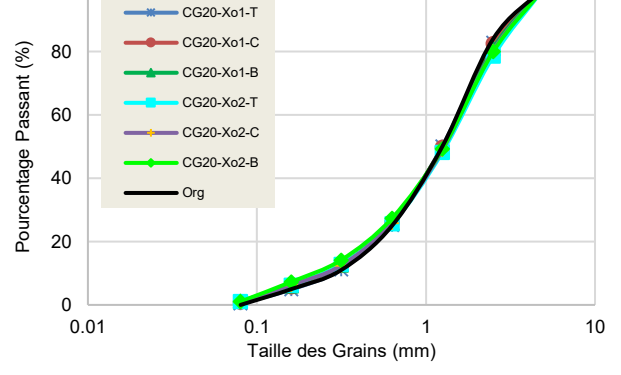
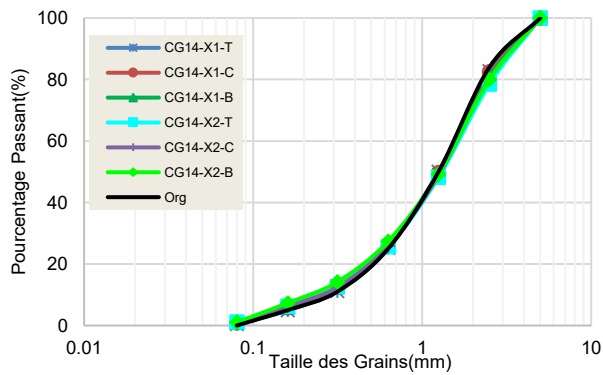
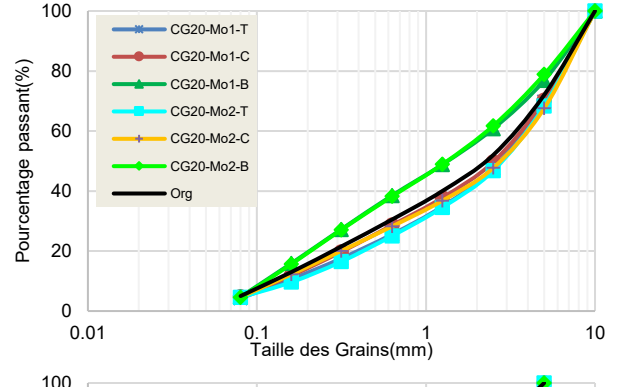
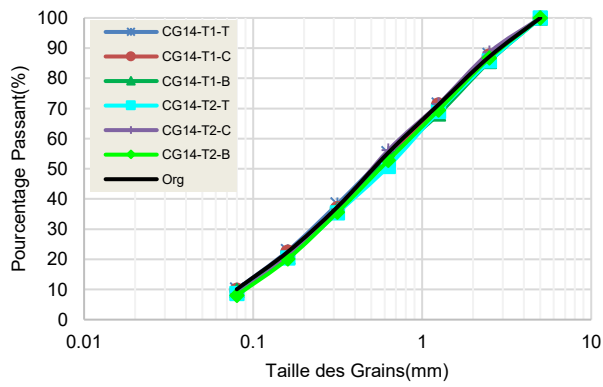
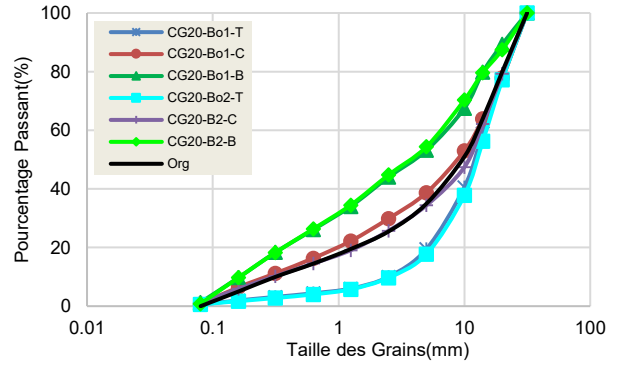
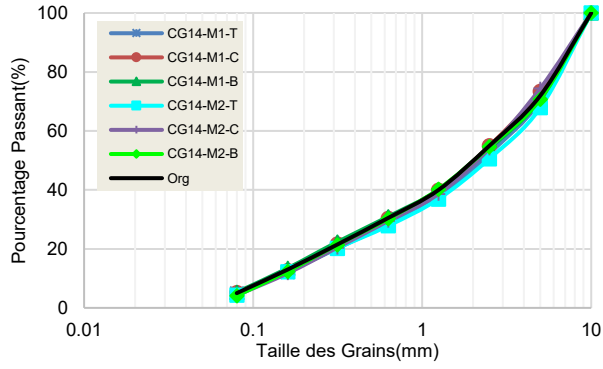
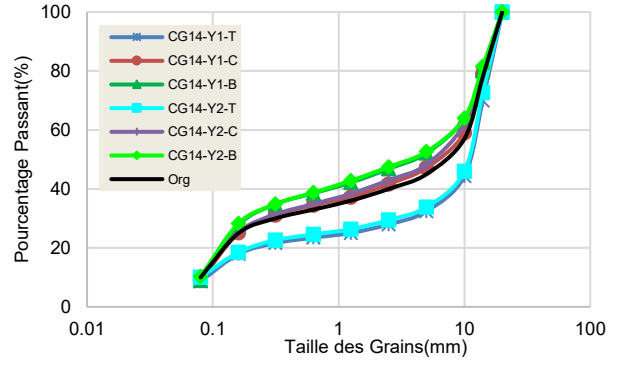
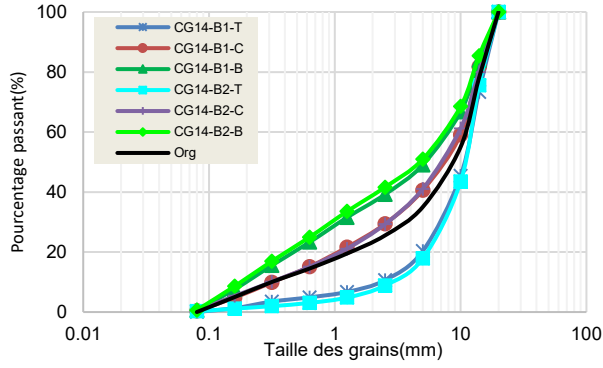
Par ailleurs, les échantillons ayant les granulométries M₀ et M_g sont classés stables à l'érosion interne et les essais démontrent que ces granulométries font de la ségrégation à l'état sec lors des vibrations. À l'inverse, les critères de stabilité classent les granulométries X et X₀ sujettes à l'érosion interne, alors qu'elles ne présentent pas de ségrégation à la table vibrante. Ces échantillons n'ont pas respecté les anciens critères d'érosion interne, la ségrégation s'est produite dans des conditions sèches. Des forces capillaires d'intensités faibles sont capables de contrecarrer la tendance à la ségrégation, ce qui apparaît comme une indication précoce du potentiel d'érosion interne (Chapuis, et al. 1996). Des essais d'érosion interne devront être faits pour confirmer ou infirmer ces résultats.

Les résultats observés lors des essais de laboratoire montrent que les coussins granulaires, qui sont utilisés pour l'enrobage des conduits, sont très hétérogènes. L'hétérogénéité des matériaux au placement, et suite aux vibrations, cause une migration et des accumulations localisées des petits solides mobiles (Chapuis et al, 2020). Après un certain degré de ségrégation, le matériau se tasse et cause des dommages à la structure. Tout dommage peut favoriser l'infiltration et la circulation des eaux qui amplifient les hétérogénéités par érosion interne. Il en résulte des problèmes de drainage, des affaissements et des fissurations localisées.

En outre, il a été constaté une faible augmentation en particules fines (moins de 2% ≤ 80 μm) dans les échantillons après la compaction à la table vibrante. De ce fait, la pierre concassée n'a pas subi de dégradation et ainsi la granulométrie globale de chaque échantillon n'a pas changée.

3.2 Essais de tassement

Les essais de tassement des CG14 ont été réalisés pour les trois intervalles de temps choisis et il a été observé que l'échantillon CG14-B a atteint 82% du tassement en 30 s de vibration, 46 % en 10 s et 30% en 1 seconde (Figure 4). Ce qui fait que pour la pierre concassée, le tassement final est atteint en un temps relativement court. Pour ce faire, la suite des essais est réalisée à des pas de temps d'une seconde pour un meilleur suivi de la courbe de tassement.



*T : haut du moule, C : centre du moule, B : base du moule. Org : granulométrie initiale de l'échantillon.

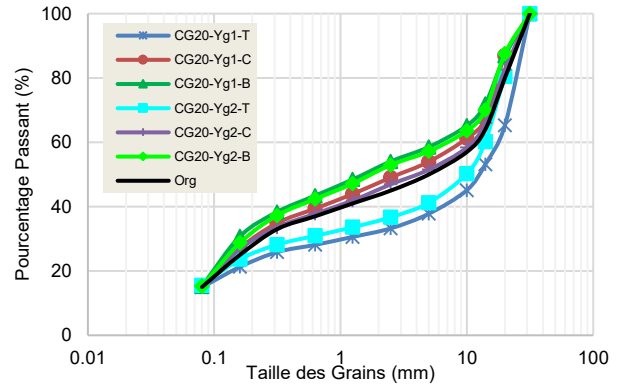
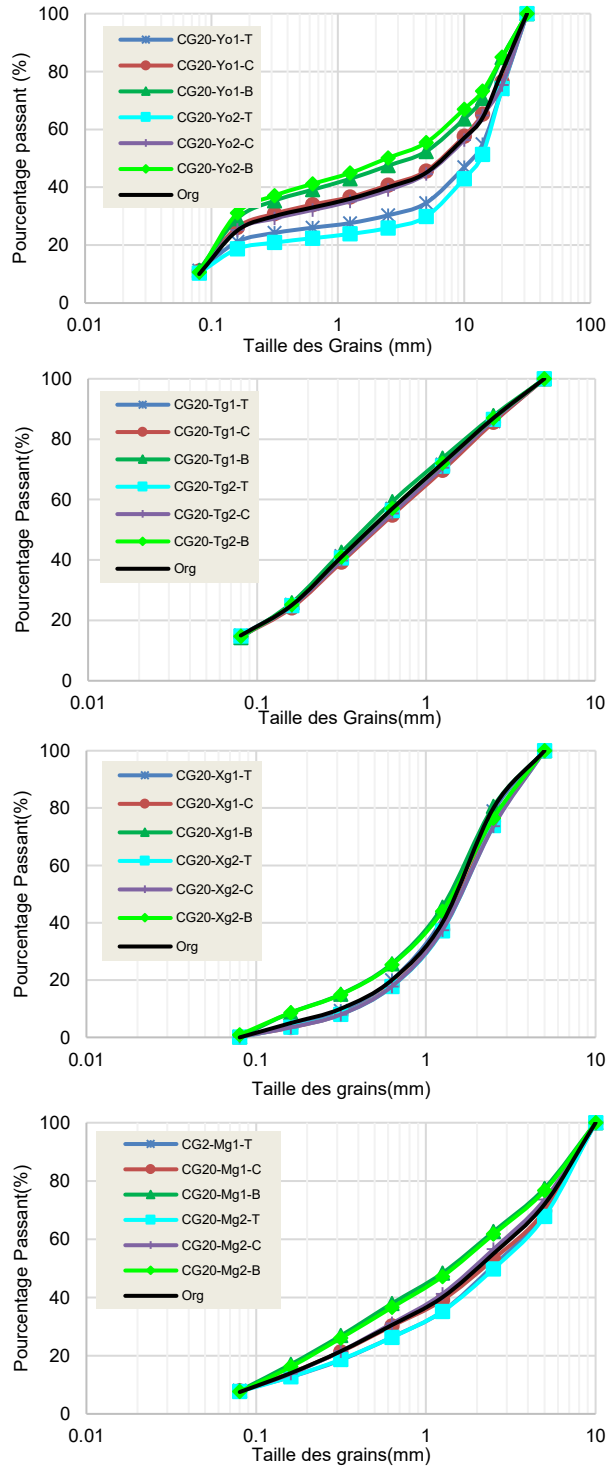


Figure 3: Analyse granulométrique pré-test et post-test des coussins granulaires.

La Figure 5 montre la déformation verticale $\Delta h/h$ de la pierre concassée des coussins granulaires, où h représente la hauteur initiale de l'échantillon. À l'observation de ces figures, on ne note pas de différence significative entre le comportement des courbes.

La déformation des CG20 et CG 20 c, varie de 6 à 7% et de 6 à 10% respectivement. Au cours des premières vibrations, les courbes CG20-Mg, CG20-Xg et CG20-Tg ont subi les plus grandes déformations 10% et 8% respectivement. Tandis que le reste des courbes ont subi une déformation inférieure à 7%.

À l'observation de la Figure 5, il semble que le squelette solide des courbes CG20-Y₀, CG20-Yg, CG20-M₀, CG14-Y, CG20-B₀ et CG20-Bg est plus rigide parce qu'elles présentent des déformations inférieures à celles des courbes CG20-Mg, CG20-Xg et CG20-Tg.

Il est à noter que la majorité des courbes qui ont relativement une faible déformation, ont subi de la ségrégation.

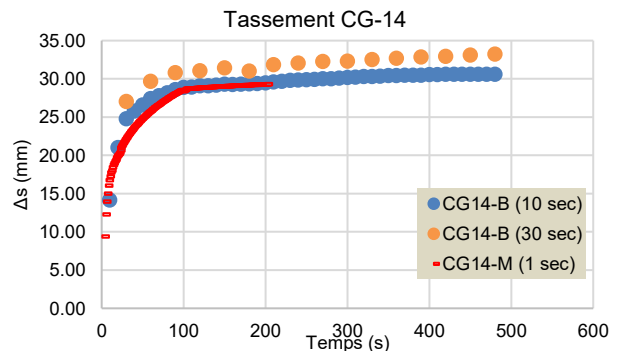


Figure 4: Évolution du tassement du CG14 à différents pas de temps.

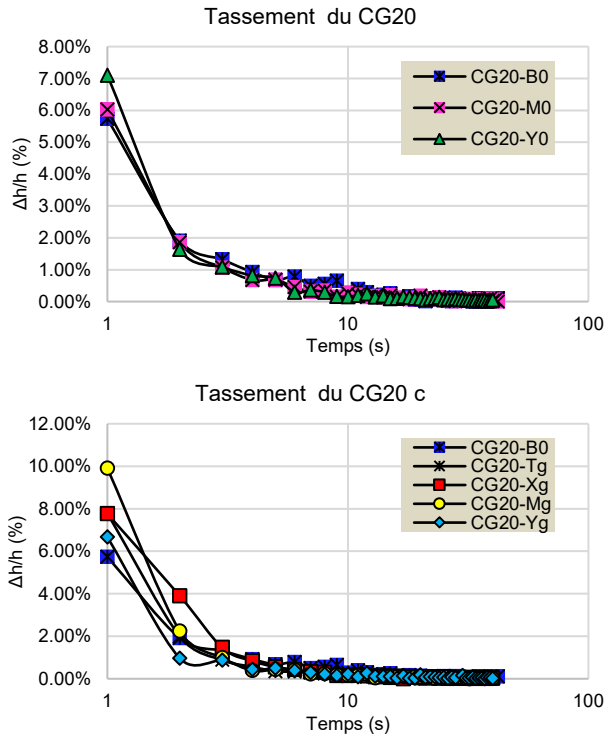


Figure 5: Déformations verticales des coussins granulaires

4 CONCLUSION

Cette étude a présenté une nouvelle méthodologie expérimentale pour quantifier le potentiel de ségrégation des sols granulaires. La configuration expérimentale est basée sur la norme ASTM D4253. La table vibrante est utilisée pour reproduire le mode de transport, de placement et de compactage sur le terrain des coussins granulaires. Quinze courbes granulométriques conformes au CCDG du MTQ ont été testées. Les résultats présentés semblent démontrer que la forme de la courbe granulométrique a un effet significatif sur la ségrégation de la pierre concassée employée comme coussin granulaire. L'augmentation de la courbure et de l'étalement des courbes est propice à une ségrégation plus élevée dans les sols granulaires. En outre, il a été démontré que les coussins granulaires, qui sont utilisés pour l'enrobage des conduits, sont hétérogènes. Par ailleurs, il est à noter, pour le tassement, qu'il n'y avait pas de différence de comportement des courbes de tassement. Pour la pierre concassée, le tassement final sous vibration est atteint en un temps relativement court.

5 REMERCIEMENTS

Le soutien financier reçu par le CRSNG pour le travail en cours est chaleureusement remercié.

6 RÉFÉRENCES

- ASTM. (2006a). D854 - 06. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer., 1-7.
- ASTM. (2006b). D4253- Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.
- ASTM. (2012). C 127-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
- Chapuis, R. P., & Tournier, J. (2006). *Simple graphical methods to assess the risk of internal erosion*. Communication présentée à TRANSACTIONS OF THE INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS (vol. 22, p. 319).
- Chapuis, R. P. (1992). Similarity of internal stability criteria for granular soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 711-713.
- Chapuis, R. P., Contant, A., & Baass, K. A. (1996). Migration of fines in 0-20 mm crushed base during placement, compaction, and seepage under laboratory conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1), 168-176. doi:DOI 10.1139/t96-032
- Chapuis, R. P. R., Makke., Z., & Chenaf, D. (2020). *Chaussées et nids-de-poule : explications. Communication présentée à Geo-Calgary 2020. Communication présentée à Geo-Calgary 2020.*
- Contant, A. (1989). Amélioration de la longévité des chaussées souples par l'optimisation des propriétés hydrauliques des agrégats de la fondation. *Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal.*
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. (2014). *Geotechnical Engineering of Dams*: CRC Press.
- Fema, A. (2011). Whole community approach to emergency management: Principles, themes, and pathways for action. *Federal Emergency Management Agency, US Department of Homeland Security, Washington DC.*
- Kenney, T., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G., Orange, G., & Ume (1985). Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal* 22(1), 32-43.
- Keyser, J. H., Aubin, R. M. (1975). Evaluation des méthodes de stockage et d'essais d'agrégats. *Centre de développement technologique, École Polytechnique de Montréal.*
- Kezdi, A. (1969). *Soil Physics—Developments in Geotechnical Engineering—Selected Topics*: Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Sherard, J. L. (1979). Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils. *Transactions, 13th International Congress on Large Dams*, 2, 25-34.
- USBR, U. S. B. o. R. (2011). Chapter 5: Protective Filters," Design Standards No. 13, Embankment Dams. *U.S. Department of the Interior, Washington, DC., pp. 5-81–85-126.*