

EFFET DE LA GRANULOMÉTRIE SUR LE COMPACTAGE DES COUCHES DE FONDATION DES CHAUSSÉES

EFFECT OF GRANULOMETRY ON THE COMPACTION OF PAVEMENT FOUNDATION LAYERS

Réception : 21/01/2023

Acceptation : 04/06/2023

Publication : 20/06/2023

BAHMED Loundja¹, MELBOUCI Bachir²

¹Laboratoire Géo-matériaux Environnement et Aménagement, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. – email : lli467070@gmail.com

²Laboratoire Géo-matériaux Environnement et Aménagement, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. – email : melbouciba@hotmail.fr

Résumé - Les matériaux granulaires sont probablement les matériaux de chaussées dont les bases et connaissances scientifiques sont les plus limitées. Leur mise en place, leur contrôle, leur dimension et leur mélange reposent sur des approches n'ayant que peu évoluées depuis des dizaines d'années. En effet, la combinaison optimale des classes granulaires dépend autant de la forme des grains que de leurs tailles respectives décrites par leur granulométrie. Dans cette étude expérimentale basée sur des granulométries composées par des combinaisons de classes granulaires et d'essais Proctor, on cherche à mieux comprendre comment la granulométrie influence la performance des matériaux granulaires utilisés dans les fondations de chaussées. En effet, la possibilité d'appréhender leur comportement en n'en testant qu'une fraction granulométrique réduite reste donc de première importance pour la pratique. Les différentes combinaisons testées ont pour objectif d'arriver à optimiser la granulométrie à partir des classes granulaires afin d'améliorer la performance du compactage de ce type de matériau.

Mots - clés : Classe granulaire, Granulométrie, Combinaisons, Compactage, Chaussées.

Abstract- Granular materials are probably the pavement materials for which the scientific bases and knowledge are the most limited. Their implementation, their control, their size and mix are based on approaches that have evolved little over decades. In effect, the optimal combination of granular classes depends as much on the shape of the grains as on their respective sizes described by their granulometry. In this experimental study based on particle sizes composed by combinations of granular classes and Proctor tests, we sought to better understand how grain size influences the performance of granular materials used in pavement foundations. Indeed, the possibility of understanding their behaviour by testing only a reduced granulometric fraction is of primary importance for practical use. The different combinations tested aim at optimizing the granulometry from the granular classes in order to improve the compaction performance of this type of material.

Keywords : Granular classes, Grain size distribution, Combinations, Compaction, Pavements.

1-Introduction

Les routes recouvertes de matériaux granulaires sont susceptibles d'être affectées par plusieurs types de détériorations. En effet, la formation d'ondulations, d'ornières et de nids-de-poule est fréquente. En effet, les sollicitations créent un désordre entre les granulats des différentes couches de manière à ce que ceux-ci

perdent leur cohésion initiale et ne jouent plus efficacement leur rôle de transmetteur de charges à la fondation. La rapidité de cette évolution et les désordres qui apparaissent sont également liés à la nature et aux dimensions des grains des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre.

Au cours des dernières décennies, peu d'efforts ont été investis pour améliorer et maximiser la

performance des matériaux granulaires des couches de chaussées [1]. Cependant, la plupart des études ont utilisé des granulats naturels et se sont penchés essentiellement à l'effet des charges et de l'environnement extérieur [2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 et 7] sur la dégradation de ces couches et très peu se sont souciés de leur granulométrie [8 et 9].

La granulométrie permettra ainsi de comprendre la répartition des différentes classes granulaires dans le matériau et de détecter la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes classes granulaires constituant la couche de chaussée.

La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants :

- Les limites d et D de la classe granulaire en question ;
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins ;
- La continuité ou la discontinuité de la granularité ;

L'importance de la taille des grains sur les propriétés des matériaux est mise en évidence par l'influence de la distribution granulométrique. Cette distribution de la taille des grains est restreinte par un fuseau granulométrique sur lequel certaines études se sont déjà penchées [10]. En outre, la taille relative des gros et des petits grains est un facteur influençant le mélange dans une classe granulaire. La combinaison optimale des classes granulaires dépend autant de la forme des grains que de leurs tailles respectives décrites par leur granulométrie. Cette évidence a été niée par un grand nombre d'études antérieures.

Le compactage est le moyen le plus efficace et le plus rentable d'améliorer les propriétés d'une couche de chaussée, y compris sa densité, sa résistance au cisaillement, sa résistance à l'humidité et la réduction du potentiel de gonflement. Il a aussi une grande influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux (Los Angeles, Micro-Deval, fragmentation dynamique).

Le compactage peut provoquer la rupture ou l'écrasement des grains et créer des changements dans leur taille et dans la distribution des pores [11]. Cette distribution de la taille des pores, a été largement reconnue comme étant liée aux propriétés mécaniques, telles que la résistance au cisaillement, la compressibilité et la capacité de

rétenion d'eau. En effet, la compacité augmente avec l'étalement de la distribution granulométrique car les petites particules peuvent se loger dans les interstices créés entre les plus grosses [12 ; 13]. Ainsi, La distribution granulométrique a une influence majeure sur le compactage et les caractéristiques mécaniques des matériaux des chaussées. En outre, tout défaut de compactage affecte la rigidité du matériau et par suite suscite une augmentation de la sollicitation induite au passage surtout des charges lourdes.

Le mélange d'agrégat doit être bien calibré de particules grossières avec suffisamment de fines pour maximiser la densité. En effet, la densité des particules dicte les performances mécaniques du matériau granulaire. D'autres études ont indiqué que l'agrégat le plus dense n'est pas nécessairement le plus performant [14]. Trois travaux ont été développés sur la base de la théorie des mélanges [15 ; 16 ; 17] Ces travaux évaluent les performances de l'agrégat et identifient la structure porteuse afin de prédire les performances du matériau non lié.

La chaussée est constituée par la superposition de couches de caractéristiques mécaniques croissantes (couche de forme, de fondation, de base et de surface). De nos jours, les entreprises de travaux publics algériennes construisent les chaussées sur deux à trois couches uniquement et jouent surtout sur leurs épaisseurs. A titre d'exemple, certaines chaussées au Sud algérien sont constituées uniquement d'une couche de fondation et de la couche de roulement et au Nord, les chaussées sont constituées en majorité sans couche de forme. D'après Liu et Dave [18 et 19], la destruction précoce d'une chaussée est affectée par le non-respect de la construction de sa structure. En effet, toute sous épaisseur d'une couche induit un excès de sollicitation dans la zone sous dimensionnée, qui se traduit par l'apparition prématurée des fissures ou de faïençage [20]. Si les épaisseurs des couches sont irrégulières, la route subira des dommages et n'atteindra pas la durée de vie souhaitée.

La problématique est qu'il est difficile de prévoir la nature des causes de ces désordres. Les entreprises spécialisées ne respectent souvent pas les normes. Et lorsque les normes sont respectées, il y a souvent des problèmes dans les différentes couches dues essentiellement au compactage des couches, ou à la nature ou à la granulométrie du matériau utilisé.

Dans le but de remédier à ces situations de détériorations de la route, nous tenterons de faire varier uniquement la granulométrie et le compactage des couches. Une granulométrie continue est souhaitable pour l'utilisation efficace des classes granulaires. Étant donné que la qualité des couches de chaussées dépend des granulats (taille, forme et qualité des grains), nous nous proposons dans ce travail d'étudier l'influence des grosses, des moyennes et des fines sur le compactage des couches de chaussée par l'intermédiaire des différentes classes granulaires.

mélanges ternaires, et (2/4), (4/6.3), (6.3/10), (10/14) et 14/20 pour les mélanges mixtes.

Les principaux résultats sont regroupés dans le tableau 1.

2-Identification des matériaux étudiés

Plusieurs essais en laboratoire sont nécessaires afin de déterminer si la qualité d'un granulat est acceptable pour un ouvrage routier.

L'analyse granulométrique permet d'évaluer si la distribution granulométrique des granulats respecte les exigences associées à son usage. La dureté des granulats est évaluée par l'essai Micro-Deval (NF P 18-572) qui permet de mesurer la résistance des granulats à l'usure par frottement et par un essai de résistance à la fracturation et l'abrasion, nommé Los Angeles [21] (NF P 18-573) qui permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs des boulets et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Le paramètre de dureté est important, car la granulométrie d'un granulat de moins bonne qualité peut changer lors de la mise en place des couches granulaires et ainsi ne plus correspondre aux normes. Les granulats sont aussi caractérisés par les essais de fragmentabilité et de dégradabilité. L'essai de fragmentabilité (NF P 94-066) permet d'apprécier et de mesurer la sensibilité d'un matériau rocheux à se fragmenter sous la sollicitation des engins de terrassements et l'essai de dégradabilité (NF P 94 067) permet d'apprécier les potentialités d'un matériau à évoluer après sa mise en œuvre sous l'action des cycles immersions-séchage (cycles climatiques).

Les granulats exploités sont issus d'un matériau local dont les grains ont leurs dimensions comprises entre 0 et 20mm. Ils sont répartis en classes granulaires : (3/8) et (8/15) pour les mélanges binaires, 3/8, 8/15 et 15/20 pour les

Tableau 1 : Caractéristiques des essais routiers.**Table 1:** Characteristics of road tests.

Nature des essais							
Los Angeles		Micro-Deval		Fragmentabilité		Dégradabilité	
Classe	Valeur	Classe	Valeur	Classe	Valeur	Classe	Valeur
4 - 6.3	24.47	4 - 6.3	17.83				
6.3 - 10	24.72	6.3 - 10	22.66	10 - 20	2.2	10 - 20	0.95
10 - 14	25.05	10 - 14	23.98				

D'après les résultats obtenus, les coefficients de Los-Angeles (LA) des classes élémentaires du gravier (4/6.3), (6.3/10) et (10/14) sont tous proches et sont compris entre 24 et 25%. D'après le tableau 1, ce matériau présente une bonne à moyenne résistance à la fragmentation.

Les valeurs de Micro-Deval du tableau 1 indiquent que plus la taille des grains (classe granulaire) est élevée, plus le coefficient Micro-Deval MDE augmente et les granulats deviennent sensibles à l'usure. Ce coefficient MDE (%) (tableau 1) de la classe élémentaire (4/6.3), varie entre de 10% et 20% avec une appréciation (bonne à moyenne). Ce sont donc des matériaux acceptables pour tous les corps de chaussée. Pour les classes élémentaires (6.3/10) et (10/14) de graviers, le MDE varie entre de 20% et 35% avec une appréciation (moyenne à faible), mais leurs valeurs obtenues sont très proches de 20%. On peut donc considérer ces granulats avec une appréciation moyenne. Ce sont donc des matériaux acceptables pour la couche de forme.

La valeur du coefficient de fragmentabilité (FR) trouvée est largement inférieure à la valeur seuil de 7 proposée par la norme NF P11-300. Le matériau peut donc être considéré comme peu fragmentable.

La valeur du coefficient de dégradabilité DG est quasiment égale à 1, ce qui signifie que le matériau testé est peu dégradé sous l'action de sollicitations hydriques.

Le matériau étudié comportant plusieurs classes granulaires est peu dégradé aux sollicitations hydriques, peu fragmentable, avec une appréciation moyenne au Micro-Deval et avec une résistance à la fragmentation bonne à moyenne à l'essai Los Angeles, ce qui dénote sa

possibilité d'utilisation dans les couches de chaussée.

3-Essais de compactage

Cet essai consiste à déterminer, pour un compactage normalisé d'intensité donnée, la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Les essais sont réalisés au moule CBR et la dame du Proctor modifié (NF P 94 093). Cette étude permet d'évaluer la compacité des mélanges sur des granulats (sables et graviers) dont laquelle nous avons fait varier 3 paramètres : les mélanges des classes granulaires, la granulométrie et le nombre de couches. En outre, le rôle de plusieurs paramètres a été examiné :

- les diamètres minimum et maximum ;
- les pourcentages respectifs des fractions granulométriques ;
- la forme de la courbe granulométrique.

Trois types de mélange ont été considérés : mélange à deux classes granulaires (binaire), à trois classes granulaires (ternaire) et à cinq classes granulaires (pentanaire ou mixte). Pour chaque mélange, trois combinaisons ont été adoptées (tableau 2).

Tableau 2 : mélanges de classes granulaires étudiés**Table 2** : Granular class mixtures studied

Mélanges	Binaire (2 classes)		Ternaire (3 classes)			Mixte (5 classes)				
	3/8	8/15	3/8	8/15	15/20	2/4	4/6.3	6.3/10	10/14	14/20
Classes granulaires										
Combinaison 1	25%	75%	25%	50%	25%	20%	20%	20%	20%	20%
Combinaison 2	50%	50%	25%	25%	50%	10%	10%	25%	25%	30%
Combinaison 3	75%	25%	-	-	-	10%	15%	15%	35%	25%

Les courbes granulométriques des trois combinaisons des trois mélanges sont représentées selon la norme NF P 94-056 sur la figure 1.

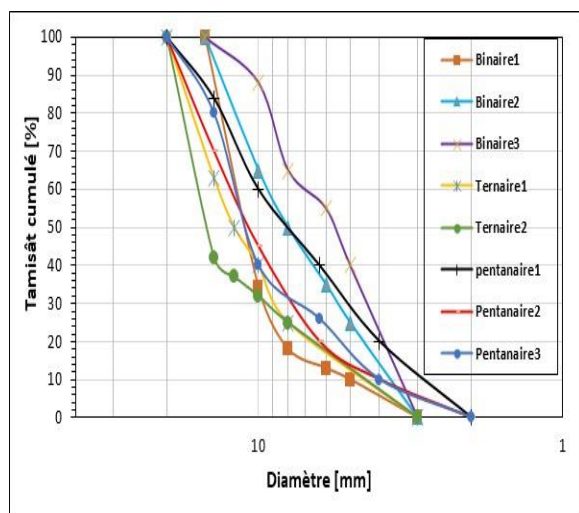


Figure 1 : Courbes granulométriques des trois combinaisons des trois mélanges (binaire, ternaire et quaternaire)

Figure 1 : Grain size distribution curves of the three combinations of the three mixtures

Les courbes Proctor modifié obtenues sont représentées sur la figure 2. Elles sont globalement peu aplaties particulièrement lorsque le pourcentage de gravier est élevé et elles sont plus ou moins pointues lorsque le pourcentage des classes 2/4 et 3/8 est élevé.

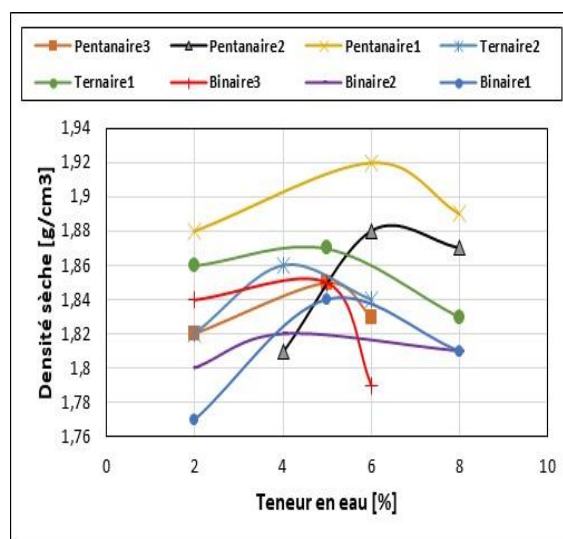


Figure 2 : Courbes Proctor modifié des trois combinaisons des trois mélanges (binaire, ternaire et quaternaire)

Figure 2 : Curves of of the modified Proctor test for the three combinations according to the three mixtures (binary, ternary and mixed)

D'après Taha et al. [22], la différence dans les valeurs de densité sèche mesurées entre les échantillons testés est principalement due à la composition des mélanges et aux proportions des fractions granulaires. La meilleure densité est obtenue pour le mélange pentanaire ayant 20% de chaque classe (figure 2). Le mélange avec 25% de la classe 3/8 et 50% de la classe 8/15 et 25% de la classe 15/20 est celui ayant présenté la deuxième meilleure densité. En effet, le pourcentage de la classe intermédiaire 8/15 est plus important pour le ternaire 1 que pour le ternaire 2 ; ce qui a permis d'avoir une meilleure homogénéisation du mélange et donc une meilleure densité parmi les mélanges ternaires.

En comparant les mélanges binaires et ternaires, ces derniers ont donné de meilleurs densités sèches et donc de meilleures compacités. En effet, les mélanges ternaires ont des granulométries plus étalées que les mélanges binaires, ce qui justifie les densités élevées des mélanges ternaires.

La meilleure densité sèche est de l'ordre de 1.92. Elle est obtenue pour le mélange ayant 20% pour les cinq classes (2/4 ; 4/6,3 ; 6,3/10 ; 10/14 et 14/20). Pour les deux autres mélanges pentanaires, ils en ont moins de grains des classes ((2/4 ; 4/6,3) pour combler leurs vides donc sont moins denses.

Pour les mélanges pentanaires ou mixtes, leurs granulométries sont plus étalées que pour les

mélanges ternaires ou binaires ; ce qui justifie leurs densités sèches élevées obtenues.

3.1-Influence du nombre de classes

La taille relative des grosses et des petites particules est un facteur influençant le mélange dans un échantillon. Une granulométrie continue est souhaitable pour l'utilisation efficace des classes granulaires, sachant que la qualité des couches de chaussées dépend des granulats (taille, forme).

Les résultats de l'essai Proctor modifié pour les trois mélanges (binaire, ternaire et quaternaire ou mixte) sont portés sur le tableau 3 en fonction des trois combinaisons des classes granulaires.

Tableau 3 : Caractéristiques Proctor modifié des trois combinaisons de chaque mélange

Table 3 : Characteristics of the modified Proctor test for the three combinations of each mixture

	Combinaison 1		Combinaison 2		Combinaison 3	
	$\gamma_{d_{opt}}$ [g/cm ³]	W _{opt} [%]	$\gamma_{d_{opt}}$ [g/cm ³]	W _{opt} [%]	$\gamma_{d_{opt}}$ [g/cm ³]	W _{opt} [%]
Mélange binaire	1.84	3.8	1.82	3.6	1.853	2.5
Mélange ternaire	1.87	3.3	1.86	3.3	-	-
Mélange mixte	1.92	3.6	1.88	4.17	1.85	3.93

Dans un même échantillon, plus le nombre de classes granulaires augmente, plus la densité sèche optimale augmente et cela quel que soit le nombre de couches dans l'échantillon. Ceci peut s'expliquer par le fait que toutes les classes granulaires sont représentées et donc on a une granulométrie étalée et continue où les petits grains remplissent les vides existants entre les gros grains. Ceci a été confirmé par l'étude menée par Gerga et Madureira [23] sur l'influence de la taille des graviers sur les caractéristiques de compactage où ils ont constaté qu'à 20–25 % de gravier, l'interférence des grains grossiers commence à affecter le compactage des fractions inférieures.

Le mélange qui a donné la compacité maximale (densité maximale) est celui composé par 5 classes granulaires (mélange pentanaire) qui présente une granulométrie la plus étendue.

Les échantillons confectionnés en deux couches ont montré que les mélanges pentanaires ou mixtes ont donné de meilleures densités sèches.

Plus le mélange a plus de classes granulaires, plus la densité sèche est meilleure.

3.2-Influence du nombre de couches

Les résultats obtenus de l'essai Proctor modifié pour les trois mélanges en fonction du nombre de couches sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques Proctor Modifié des trois mélanges en fonction du nombre de couches

Table 4: Modified Proctor Characteristics of the three mixtures according to the number of layers

	2 couches		3 couches		5 couches	
Mélange binaire	$\gamma_{d_{opt}}=1.82$	Wopt=2.5%	$\gamma_{d_{opt}}=1.84$	Wopt=2.5%	$\gamma_{d_{opt}}=1.85$	Wopt=2.5%
Mélange ternaire	$\gamma_{d_{opt}}=1.83$	Wopt=3.25%	$\gamma_{d_{opt}}=1.86$	Wopt=3.25%	$\gamma_{d_{opt}}=1.88$	Wopt=3.25%
Mélange mixte	$\gamma_{d_{opt}}=1.87$	Wopt=3.8%	$\gamma_{d_{opt}}=1.92$	Wopt=3.8%	$\gamma_{d_{opt}}=1.92$	Wopt=3.8%

Plus le nombre de couches est important dans un échantillon, plus la densité sèche optimale augmente et cela quel que soit la composition de la granulométrie de l'échantillon. Ceci peut s'expliquer par le fait que plus le nombre couche est élevé, plus l'échantillon est mieux compacté. En outre, une granulométrie étalée ou (continue) avec la présence de plusieurs classes granulaires permet d'obtenir un matériau plus dense avec un volume de vides intergranulaires plus faible en raison d'un arrangement plus compact des grains (les grains de petites tailles peuvent se déplacer pour occuper les vides lors du compactage des couches).

Plus la densité est élevée, plus la couche est rigide et résistante et moins elle est sensible aux dégradations.

Les échantillons confectionnés en trois couches ont montré que les mélanges mixtes ont donné de meilleures densités sèches.

Cette étude a montré que les gros grains des classes granulaires (8/15) et (15/20) augmentaient la résistance mécanique qui est aussi favorisée par la continuité des classes granulaires. Ceci a été confirmé par l'étude menée par Mahmoudi et al. [24] qui a montré que la densité sèche maximale augmente avec le pourcentage de la classe granulaire du gros gravier dans les mélanges et le compactage est intensifié par l'augmentation du pourcentage des classes de gravier.

4-Conclusion

La technique d'optimisation des mélanges granulaires utilisée est basée sur la non prise en compte des effets induits par chaque grain mais de l'effet de chaque classe granulaire. Cette technique s'inspire de la

granularité des matériaux utilisés et de la compacité de leurs tranches élémentaires. Elle permet d'expliquer les différences de performances mesurées sur des couches de chaussée.

Les différents points à retenir de cette étude sont :

- Pour ces matériaux granulaires, l'étude a permis d'expliquer les différences de compacité (densités sèches optimales) observées entre les différents mélanges de classes granulaires ;
- Des valeurs de pourcentage des classes granulaires délimitant divers niveaux de performance ont été identifiées par les valeurs de la densité sèche et par l'étalement granulométrique. En effet, plus les courbes granulométriques sont étalées, plus la densité sèche est élevée et meilleure est la compacité.
- Dans chaque mélange, on a observé sous l'effet du compactage Proctor modifié, une nette décroissance des volumes solides avec la taille des grains ;
- Le mélange pentanaire ou mixte (présentant la granulométrie la plus continue) est celui qui a donné les densités sèches les plus élevées ;
- Les densités sèches élevées ont été obtenues pour les échantillons ayant au moins trois couches pour des mélanges ternaires et pentaires à granulométries étalées ;
- Plus une classe granulaire n'est pas représentée dans une couche de chaussée (granulométrie discontinue, cas des mélanges binaires), plus la densité sèche baisse et plus la couche sera sensible aux dégradations.



Références bibliographiques

- [1] Bilodeau J. P., Optimisation de la granulométrie des matériaux granulaires de fondation des chaussées. Thèse de doctorat de l'Université Laval Québec, 2009.
- [2] Cápayová S., Štefunková Z., Unčík S., Zuzulová A., Requirements for pavement base layers with unbound granular material. *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, 2019, No. 3, 21 – 28.
- [3] Elshaer M., Jo Sias D., Impact of pavement layer properties on the structural performance of inundated flexible pavements. *Transportation Geotechnics*, Volume 16, September 2018, Pages 11-20.
- [4] Bhandari S., Luo X., Wang F., Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance. *International Journal of Transportation Science and Technology* 12 (2023) 258–272.
- [5] Yu B., Zhang M., and Li T., Analysis of the micro bonding graded gravel asphalt pavement structure,” *Shenyang Jianzhu Daxue Xuebao*, vol. 29, pp. 852–860, 2013.
- [6] Manyo E. Y., Modélisation avancée du contact pneu-chaussée par l'étude des dégradations des chaussées en surface. Thèse de Doctorat de l'université de Limoges, 2019.
- [7] Grellet D., Effet des caractéristiques des pneus sur le comportement mécanique et l'endommagement des chaussées. *Symposium International sur l'Interaction charges lourdes/Climat/Chaussées (i3C)*, 18 novembre 2020, Université de Laval.
- [8] Cunningham, C. N., Evansb, T. M. and Tayebalib, A. A. (2013), Gradation effects on the mechanical response of crushed stone aggregate, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 231–241.
- [9] Esfahani M. A., Goli A., Effects of Aggregate Gradation on Resilient Modulus and CBR in Unbound Granular Materials. *International Journal of Transportation Engineering*, Vol.5/ No.4/ Spring 2018 - 367-381.
- [10] Boudali, M., Module réversible des graves non traitées des fondations routières du Québec. *Ministère des Transports du Québec*, 1997, Québec.
- [11] Zhang, Y. D., and Buscarnera, G., Prediction of Breakage-Induced Couplings in Unsaturated Granular Soils. *Geotechnique*, 65(2), 2015, 135-140.
- [12] Cumberland D. J. and Crawford R. J., *The Packing of Particles*, Handbook of powder technology, Elsevier, 150 p, 1987.
- [13] German R. M., "Particle packing characteristics", *Metal Powder Industries Federation*, 1989.
- [14] Santamarina, J.C., Klein, A. and Fam, M.A., Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring. *Journal of Soils and Sediments*, 1 (2), 2001, pp. 130-130.
- [15] Vavrik, W.R., Bailey method for gradation selection in hot-mix asphalt mixture design. *Transportation Research Board, National Research Council*, 2002.
- [16] Kim, S., Guarin, A., Roque, R., and Birgisson, B., Identification and Assessment of the Dominant Aggregate Size Range (DASR) of Asphalt Mixture. *Journal of Asphalt Paving Technologists*, 75, 2006, pp. 789–814.
- [17] Yideti, T.F., Birgisson, B., Jelagin, D. and Guarin, A., Packing theory-based framework for evaluating resilient modulus of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 15, 2014, pp. 689-697.
- [18] Liu Q. and Cao D., “Research on material composition and performance of porous asphalt pavement,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 135–140, 2009.

[19] Dave E. V. and Behnia B., “Cohesive zone fracture modelling of asphalt pavements with applications to design of highperformance asphalt overlays,” *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 1–19, 2017.

[20] Jeuffroy G., conception et construction des chaussées. Cours de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées; Tome1; Edition Eyrolles, 1978.

[21] Doré, G., et Zubeck, H., Cold regions pavement engineering. Reston, VA: New York: ASCE Press; McGraw-Hill, 2009, 416 p.

[22] Taha R., Ali G., Basma A., and Al-Turk O., Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases, *Transp. Res. Rec.*, N° 1652, 1998, pp. 264–269.

[23] Garga, V. K. and Madureira, C. T., Compaction Characteristics of River Terrace Gravel, *J. Geotech. Engrg.*, Vol. 111, 1985, pp. 987–1007.

[24] Mahmoudi Y., Taiba A.C., Doumi K., Hazout L., Belkhatir M., 3, Baille W.. Experimental Evidence on the Compaction of Binary Granular Assemblies: Influence of Equivalent Intergranular Void Ratio. *Algerian Journal of Research and Technology*, A.J.R.T Volume 4 (N° 2) (2020) 23 – 28.

Norme NF P 18-573 (1990) : Granulats - Essai de Los Angeles.

Norme NF P 18-572 (1990) : Granulats - Essai d'usure micro-DEVAL.

Norme NF P 94-066 (1992) : Sols : reconnaissance et essais - Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.

Norme NF P 94-067 (1992) : Sols : reconnaissance et essais - Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.

Norme NF P 94-093 (2016) : Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié.

Norme NF P 94-056 (1996) : Sols, reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.