

IMPACT DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DES GRANULATS D'AGRÉGATS D'ENROBÉS SUR LES PROPRIÉTÉS D'ADHÉRENCE DES ENROBÉS RECYCLÉS

Y. SENGA^{1,2}

¹Laboratoire de Mécanique et Technologie, France
senga@lmt.ens-cachan.fr

A. DONY² & J. COLIN²

²Institut de Recherche en Constructibilité, École Spéciale des Travaux Publics, France
2ad-fc@wanadoo.fr & colin@profs.estp.fr

S. HAMLAT³

³Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers, France
smail.hamlat@developpement-durable.gouv.fr

Y. BERTHAUD¹

¹Laboratoire de Mécanique et Technologie, France
berthaud@lmt.ens-cachan.fr

RÉSUMÉ

Depuis quelques années, les techniques de recyclage des enrobés bitumineux sont en plein essor. Ainsi, dans un contexte de développement durable, l'utilisation des agrégats d'enrobés devient une priorité pour l'industrie routière qui a pour objectif d'optimiser leur utilisation dans toutes les couches de chaussées, lesquelles sont constituées de matériaux de qualité variable selon leur rôle. Cet article vise à évaluer les caractéristiques intrinsèques de plusieurs mélanges de deux matériaux granulaires présents dans un enrobé recyclé (un couramment utilisé en couche de roulement et un autre recommandé pour couche d'assise). Diverses proportions ont été établies pour ces mélanges de façon à se placer dans les cas de recyclage à faible et fort taux. Des essais traditionnels normalisés (de résistance à la fragmentation, à l'usure et au polissage) ont été réalisés, complétés par des essais de résistance au polissage avec la machine Wehner & Schulze. La procédure de préparation des échantillons constitués de mélanges de granulats a été minutieusement étudiée et définie. Les résultats obtenus permettent de définir l'influence des caractéristiques de chacun des matériaux sur celles des mélanges finaux.

MOTS-CLÉS : agrégats d'enrobés, adhérence, granulats, recyclage, couche de roulement.

1. INTRODUCTION

Le recyclage des enrobés bitumineux est une nécessité vis-à-vis de la protection de l'environnement. Il permet d'une part de préserver les ressources naturelles que sont les granulats et le pétrole, et d'autre part de limiter les coûts de production et de transport.

Chaque année, des millions de tonnes d'enrobés sont enlevés des routes pour être remplacés. Ces enrobés, criblés et reconcassés, sont appelés agrégats d'enrobés. Ils constituent des stocks non négligeables de matières premières qui peuvent servir à la construction de nouvelles routes.

En France, les techniques de recyclage sont apparues dans les années 1970 mais leur développement a été ralenti en raison du nombre élevé de carrières et de poste de production d'enrobés. Mais, en 1990, la loi visant à limiter la prolifération des décharges, et plus récemment le Grenelle de l'Environnement (2008), ont contribué à inverser cette tendance. Ce dernier préconise notamment une introduction systématique de 10 à 20 % d'agrégats d'enrobés dans les nouvelles routes. En février 2009, les principaux acteurs de l'industrie routière ont signé une convention d'engagement volontaire visant à atteindre un taux de réutilisation de 60 % d'agrégats. Ainsi, en 2009, on estime que seulement 23 % des agrégats d'enrobés ont été valorisés en enrobés bitumineux contre plus de 80 % en Allemagne et aux Etats-Unis [1]. Les Pays-Bas, quasiment dépourvus de granulats, avoisinent les 100 % de recyclage.

La plupart des études et recherches sur les agrégats d'enrobés sont réalisées sur le liant bitumineux car ses propriétés peuvent considérablement évoluer au cours du temps [2, 3]. Dans ces travaux, il s'agit d'une part, de déterminer les caractéristiques du liant d'agrégat d'enrobé [4, 5, 6] et d'autre part, d'évaluer les effets du liant recyclé sur le mélange avec un liant neuf [7, 8, 9].

Un autre paramètre souvent étudié et important dans les problématiques de recyclage est celui du taux d'agrégats et de son influence sur leurs performances en terme de résistance à la fatigue, à l'orniérage, au fluage, et de susceptibilité à l'eau notamment [10, 11, 12]. Ils tendent à montrer une diminution significative de ces performances à partir de 25 à 30 % d'agrégats excepté pour la tenue à l'orniérage qui est meilleure avec les agrégats.

Dans toutes ces études, les granulats qui représentent environ 95% de la masse des agrégats sont caractérisés comme des matériaux granulaires neufs et homogènes alors qu'ils sont souvent constitués de matériaux hétérogènes pouvant provenir de plusieurs couches de chaussées.

L'épaisseur importante des couches d'assise permet de fournir un tonnage conséquent de matériaux de recyclage ; cependant, il faut noter que le taux de renouvellement des couches de roulement est souvent plus élevé que celui des couches structurales (généralement tous les 7 à 10 ans pour les premières contre 20 à 25 pour les secondes). L'utilisation d'agrégats d'enrobés dans ces couches de roulement est donc tout à fait envisageable moyennant des performances de surface équivalentes à celles classiquement exigées. L'adhérence est en cela une propriété déterminante pour une utilisation en couche de roulement et est directement liée au choix des granulats la composant. L'hétérogénéité d'agrégats d'enrobés pourrait ainsi influencer sur les performances d'adhérence d'une couche de roulement.

Notre étude vise donc à quantifier l'effet de ces granulats d'agrégats sur l'adhérence d'un enrobé pour couche de roulement, couche pour laquelle les exigences sur les matériaux en terme de qualité sont plus élevées. Pour ce faire, nous avons caractérisé de façon rigoureuse différents mélanges granulaires pouvant servir à la fabrication d'enrobés pour couche de roulement par des essais de résistance à la fragmentation, à l'usure et au polissage.

2. MATÉRIAUX ET DÉMARCHE EXPERIMENTALE

Nous avons choisi de travailler initialement avec des granulats neufs en formulant l'hypothèse que les caractéristiques intrinsèques des granulats ne varient pas au cours du temps, même après leur utilisation en couche de chaussée. Effectivement, la figure 1 montre la similitude du comportement au polissage de granulats neufs et de granulats de même nature extraits d'une couche de roulement de type BBTM 0/10 âgée de 12 ans et soumis à un trafic journalier de 17600 tous véhicules confondus. Ce choix permet en outre de garantir une maîtrise de la constance et de l'homogénéité des matériaux étudiés.

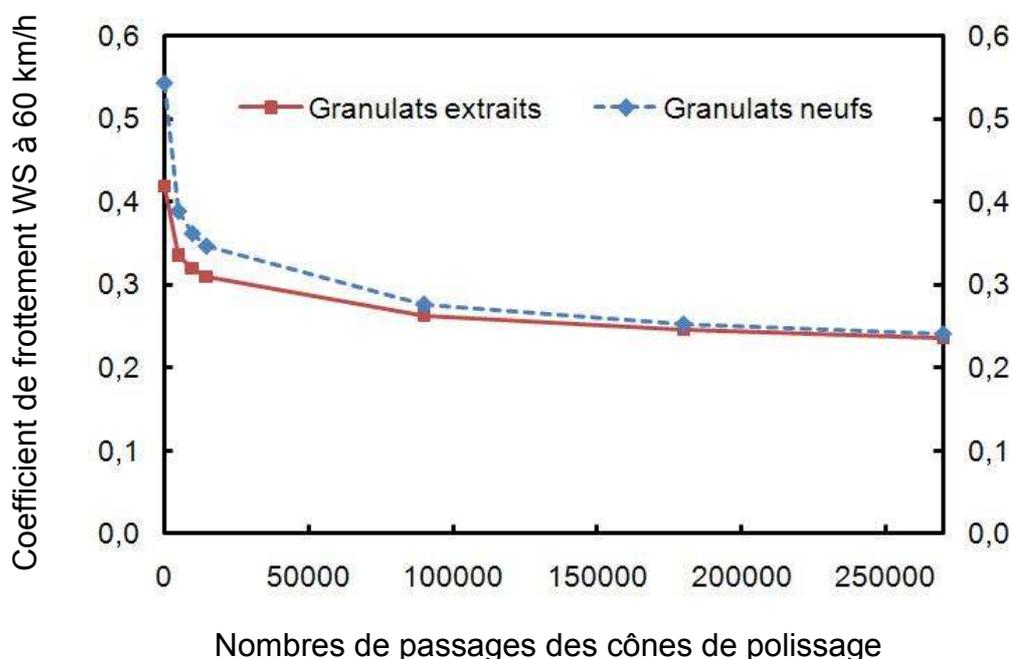


Figure 1 – Comportement au polissage de granulats neufs et de granulats recyclés.

Les matériaux utilisés sont deux granulats aux propriétés mécaniques intrinsèques bien distinctes. Le premier est couramment utilisé en couche de roulement alors que le second l'est en couche d'assise selon les fiches techniques fournies et la classification française [13]. De ce fait, chacun des matériaux répond aux spécifications demandées pour son utilisation dans ces couches respectives. Ces exigences qui se définissent principalement en termes de résistance à la fragmentation, à l'usure et au polissage sont rappelées dans les tableaux 1 et 2. Le tableau 3 présente les caractéristiques des matériaux utilisés, caractéristiques annoncées par les fournisseurs.

Toutes les analyses ont été menées sur la fraction 6/10 des granulats.

Tableau 1 – Caractéristiques intrinsèques des gravillons et de la fraction gravillons des graves pour une utilisation en couche de roulement selon la norme XP P 18-545.

Code	Los Angeles	Micro-Deval	Polished Stone Value
A	≤ 20	≤ 15	≥56
B	≤ 20	≤ 15	≥50
C	≤ 25	≤ 20	≥50

Tableau 2 – Caractéristiques intrinsèques des gravillons et de la fraction gravillons des graves pour une utilisation en couche de fondation, de base et de liaison selon la norme XP P 18-545.

Code	Los Angeles	Micro-Deval
B	≤ 20	≤ 15
C	≤ 25	≤ 20
D	≤ 30	≤ 25
E	≤ 40	≤ 35

Tableau 3 – Caractéristiques des granulats 6/10 utilisés (déterminées en laboratoire).

Désignation	Type	Los Angeles	Micro-Deval	Polished Stone Value
Granulat 1 (G1)	Diorite	12,44	8,48	50
Granulat 2 (G2)	Calcaire	23,5	13,3	36

Ces granulats ont été mélangés dans différentes proportions massiques (cf. tableau 4) et caractérisés à l'aide d'essais détaillés par la suite. L'objectif visé est d'essayer de prédire les caractéristiques du mélange à partir de celles des matériaux qui le composent. Nous nous sommes intéressés aux propriétés intrinsèques et tout particulièrement à la résistance au polissage des granulats qui est déterminante pour assurer une bonne adhérence des revêtements de chaussées.

Tableau 4 – Composition massique des mélanges granulaires.

Mélanges	granulat 1 (G1) (%)	granulat 2 (G2) (%)
1	100	0
2	75	25
3	50	50
4	25	75
5	0	100

2.1. Essai Los Angeles (EN NF 1097-2)

Il permet de déterminer la résistance à la fragmentation des granulats [14]. On introduit un échantillon d'une masse de $5000 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ ayant une granulométrie bien déterminée dans un tambour cylindrique de 711 mm de diamètre intérieur et 508 mm de longueur avec une charge abrasive (constituée de boulets en acier). Le tambour est ensuite mis en rotation à une vitesse d'environ 32 tours/min pendant 15 min. On pèse ensuite le refus m (en grammes) au tamis de 1,6 mm et l'on détermine le coefficient Los Angeles à partir de la formule suivante :

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

2.2. Essai Micro-Deval (EN NF 1097-1/A1)

Cet essai nous a permis de déterminer la résistance à l'usure de nos granulats [15]. Un échantillon de granulats de fraction 6/10 et d'une masse de $500 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ est placé dans un tambour (200 mm de diamètre intérieur) avec 2,5 litres d'eau et une charge abrasive d'environ 4500 g constituée de billes en acier. Le tambour tourne à une vitesse de 100 tr/min.

Le calcul suivant permet de déterminer le coefficient de Micro-Deval :

$$MDE = \frac{500 - m}{5}$$

Où m est la masse du refus à 1,6 mm (en grammes).

2.3. Essai PSV (Polished Stone Value) (EN 1097-8)

Uniquement pratiqué pour les granulats pour couches de roulement, il sert à déterminer le coefficient de résistance au polissage des granulats [16]. On travaille avec des matériaux 6/10 déplatés à 7,2 mm avec un tamis à barres. Les granulats sont précautionneusement disposés dans un moule, à la manière d'un puzzle, et maintenus en place par une résine de façon à former une plaquette (cf. figure 2). Ces plaquettes de granulats sont assemblées sur une roue dite « roue porte-éprouvettes ». Cette roue est mise en rotation autour de son axe à une vitesse de 320 tr/min et subit un poids de 725 N par l'intermédiaire d'un pneu en caoutchouc. Un dispositif permet de répandre sur la roue un mélange d'abrasif et d'eau qui polira les granulats pendant 6 heures.

Une mesure avec le pendule SRT « Skid Resistance Tester » dans le sens contraire du polissage permet d'obtenir une valeur du coefficient de résistance au polissage.



Granulats G1



Granulats G2



b) Pendule SRT et roue de PSV

a) Aperçu des plaquettes de PSV

Figure 2 – Dispositif de mesure de l'essai PSV.

2.4. Essai Wehner & Schulze

Cet essai est un autre moyen de déterminer la résistance au polissage. Il peut se pratiquer sur des éprouvettes de granulats ou d'enrobés. Actuellement non normalisé, il fait l'objet de nombreuses études qui pourront servir à la réalisation d'une norme européenne [17].

La machine se compose de deux postes (cf. figure 3) : un poste de polissage simulant l'action du trafic routier et un poste de mesure de frottement reproduisant un freinage à roue bloquée en présence d'eau [18].

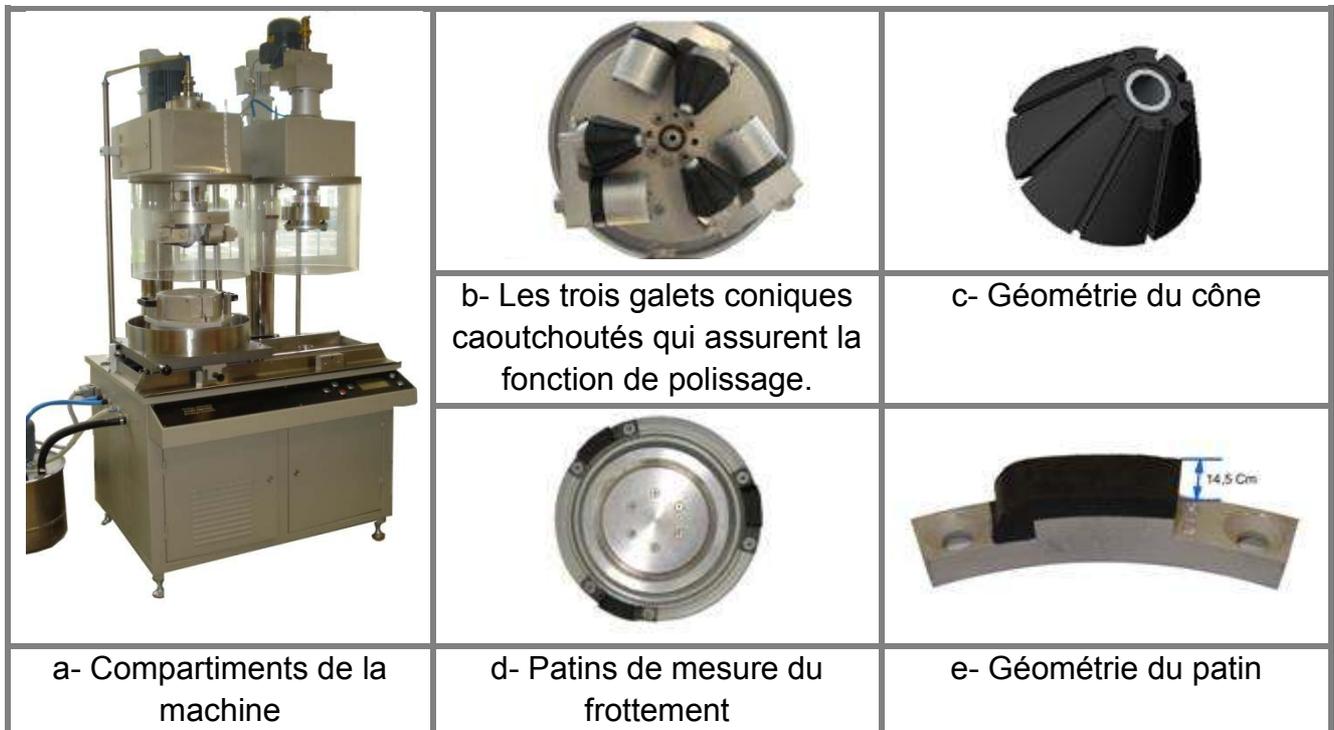


Figure 3 – Machine Wehner & Schulze.

La fabrication des éprouvettes de granulats se fait de façon manuelle. On utilise des granulats de même dimension que pour l'essai PSV. Les granulats sont disposés en une IP0435-Senga-F

seule couche dans un moule de 225 mm de diamètre intérieur de manière à en occuper le maximum de surface. Pour faciliter cette procédure, le moule est disposé sur une table vibrante (cf. figure 4a). Les granulats sont ensuite maintenus en place par une résine (cf. figure 4e). Dans le cas des mélanges, il est important de rester le plus homogène possible dans toute la zone de polissage. Nous avons choisi d'adopter le protocole suivant : dans un premier temps, remplir complètement notre moule avec un seul type de granulats (cf. figure 4b) puis remplacer un à un des granulats sélectionnés de façon à obtenir les proportions massiques visées (cf. figure 4c). Du fait de la différence de forme et de masse volumique des granulats, cette répartition est un processus long et délicat.

Le polissage se fait à l'aide de cônes en caoutchouc et en présence d'une solution abrasive composée de silice et d'eau. La mesure du coefficient de frottement s'effectue par l'intermédiaire de patins en caoutchouc sur une couronne d'à peine 14,5 mm de large (cf. figure 3e).

Contrairement à l'essai PSV, la mesure du coefficient de frottement est automatisée, ce qui permet de supprimer l'effet de l'opérateur sur la mesure. Une mesure à 60 km/h est effectuée à différents états de polissage : 0, 5000, 10000, 150000, 90000 et 180000 passages de cônes suivant une procédure développée conjointement par les quatre utilisateurs français de la machine (LCPC, LRPC d'Angers, Colas et Eurovia) [18]. L'essai permet de décrire l'évolution du coefficient de frottement sur la durée de l'essai.

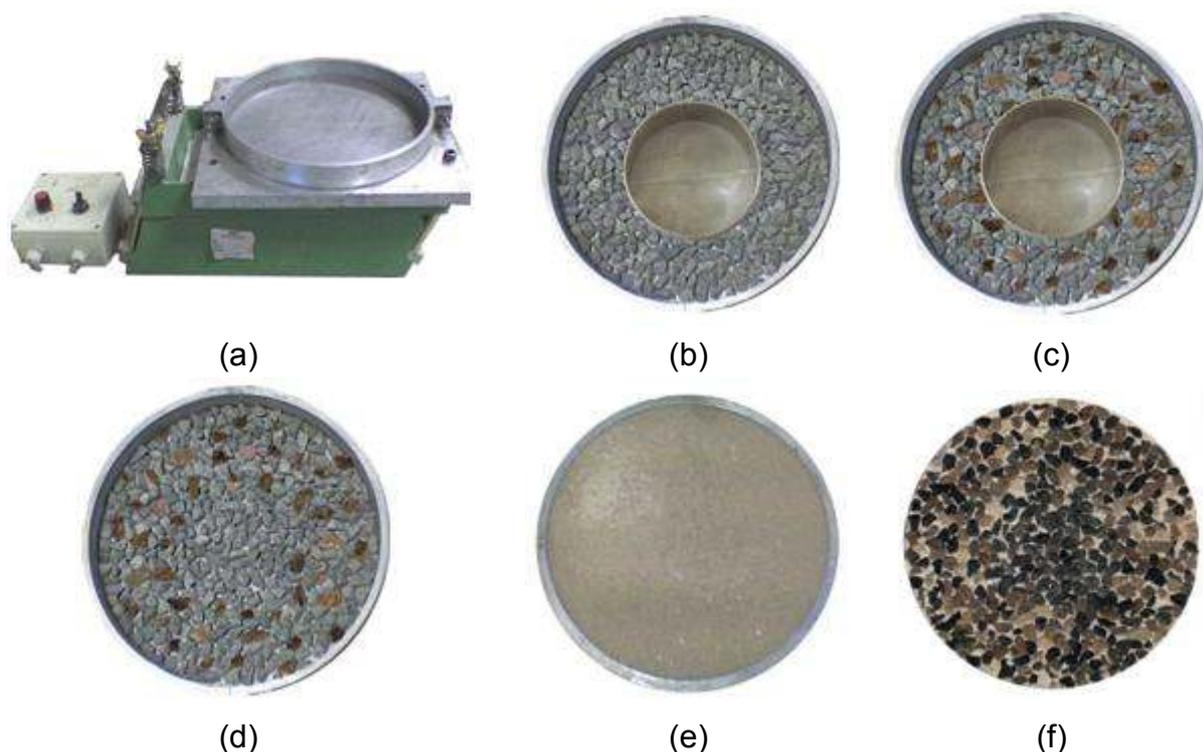


Figure 4 – Protocole de fabrication d'une éprouvette de granulats Wehner & Schulze.

3. RÉSULTATS

Les résultats obtenus nous permettent de suivre l'évolution des caractéristiques de notre mélange en fonction du pourcentage de chaque type de granulats. Le tableau 5 présente les coefficients de résistance à la fragmentation (Los Angeles) et à l'usure (Micro-Deval).

Pour chacun des mélanges, les essais ont été répétés trois fois pour le Los Angeles et deux fois pour le Micro-Deval.

Tableau 5 - Coefficients de résistance à la fragmentation (Los Angeles) et à l'usure (Micro-Deval) des différents mélanges granulaires.

%* de granulats G2	Los Angeles			Micro-Deval		
	Min	Moyenne	Max	Min	Moyenne	Max
0	10,26	10,68	11,10	9,56	9,66	9,76
25	12,7	14,00	15,30	11,01	11,14	11,28
50	17,36	18,05	18,75	10,95	11,64	12,33
75	21,05	20,87	20,69	13,07	13,43	13,8
100	24,11	24,55	25,00	14,39	14,30	14,22

* pourcentage massique

Comme l'illustrent les figures 5a et 5b, ces coefficients augmentent proportionnellement avec la fraction de granulats G2. Les résistances à l'usure et à la fragmentation évoluent selon des lois des mélanges linéaires :

$$LA(\alpha G1 + \beta G2) = \alpha LA(G1) + \beta LA(G2)$$

$$MDE(\alpha G1 + \beta G2) = \alpha MDE(G1) + \beta MDE(G2)$$

Où α et β représentent respectivement les proportions en matériaux G1 et G2 dans notre mélange.

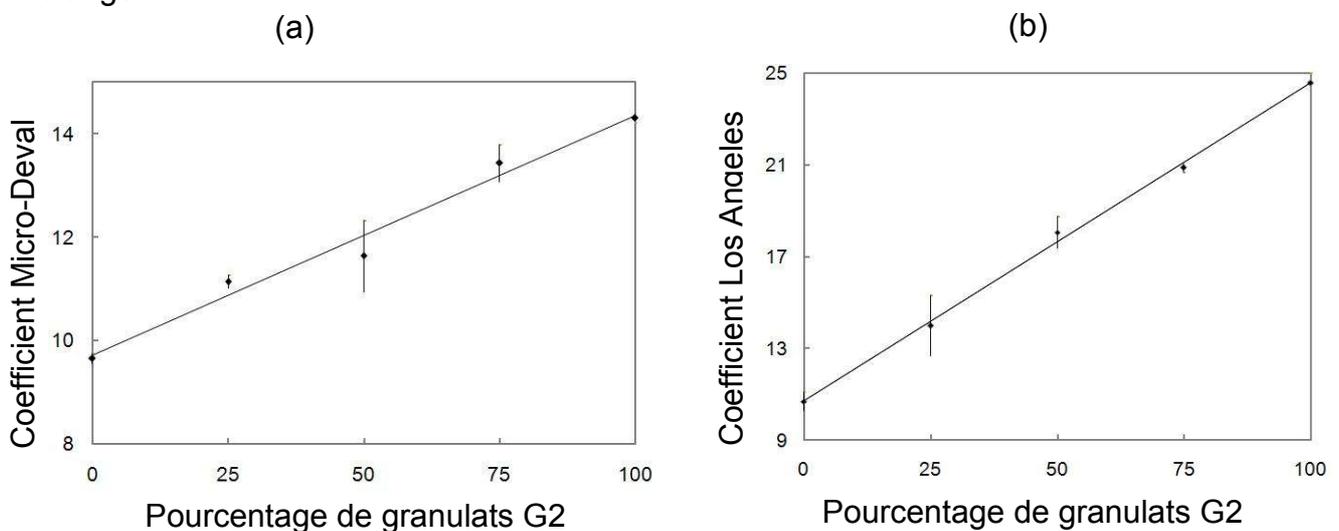


Figure 5 - Évolution des résistances à l'usure (a) et à la fragmentation (b) des mélanges granulaires en fonction de la fraction de granulats G2.

Les essais Wehner & Schulze ont été réalisés en essayant de respecter au mieux les proportions massiques dans les mélanges granulaires. Cependant, le coefficient de frottement dépend de la distribution surfacique de chaque type de granulats (G1 et G2) dans la zone de mesure. Par un traitement d'analyse d'images, nous avons déterminé avec précision cette distribution dans la zone de frottement. Cette analyse a consisté à isoler un type de granulats (nous avons choisi le G1 plus facile à identifier) et à calculer, à

l'aide d'un algorithme sous Matlab, la surface qu'il occupe dans la couronne de polissage (cf. figure 6). Ainsi, nous avons pu décrire l'évolution du coefficient de frottement pour chacun des mélanges (cf. tableau 6).

			
Mélange N° 1	90 %	Mélange N° 2	51 %
			
Mélange N° 3	33 %	Mélange N° 4	21 %
			
	Mélange N° 5	83 %	

Figure 6 – Distribution surfacique des granulats G1 dans la zone de mesure par analyse d'images.

* Le mélange N° 5 est constitué d'un seul type de granulats (G2). La figure 6 montre donc la distribution surfacique des granulats G2 dans la zone de mesure.

Nous avons constaté pour chaque éprouvette une diminution du coefficient de frottement durant l'essai. Les résultats obtenus ont également montré une décroissance des niveaux d'adhérence proportionnelle à l'augmentation de la fraction de granulats G2. De plus, nous avons étudié l'évolution des coefficients de frottement pour chaque état de polissage et avons noté qu'ils obéissaient à des lois linéaires. La figure 7 l'illustre pour l'état initial. Une simulation des niveaux d'adhérence à ces différents états a de ce fait pu être établie. On retrouve une bonne corrélation entre cette simulation et les résultats obtenus (cf. figure 5). Ainsi, à l'instar des cas précédents, nous pouvons retrouver les coefficients de frottement des mélanges à partir de ceux des matériaux initiaux par la loi suivante :

$$\mu_{ws}(\alpha G1 + \beta G) = \alpha \mu_{ws}(G1) + \beta \mu_{ws}(G2)$$

où μ_{WS} est le coefficient de frottement à 60 km/h obtenu avec la machine Wehner & Schulze.

Tableau 6 - Coefficients de résistance au polissage par l'essai Wehner & Schulze pour les différents mélanges granulaires.

Nombre de passage des cônes	Coefficients de frottement Wehner & Schulze à 60 km/h				
	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3	Mélange 4	Mélange 5
0	0,527	0,410	0,390	0,375	0,322
5 000	0,437	0,356	0,321	0,303	0,249
10 000	0,410	0,336	0,301	0,286	0,231
15 000	0,396	0,325	0,292	0,272	0,218
90 000	0,353	0,276	0,247	0,223	0,162
180 000	0,330	0,262	0,234	0,205	0,138

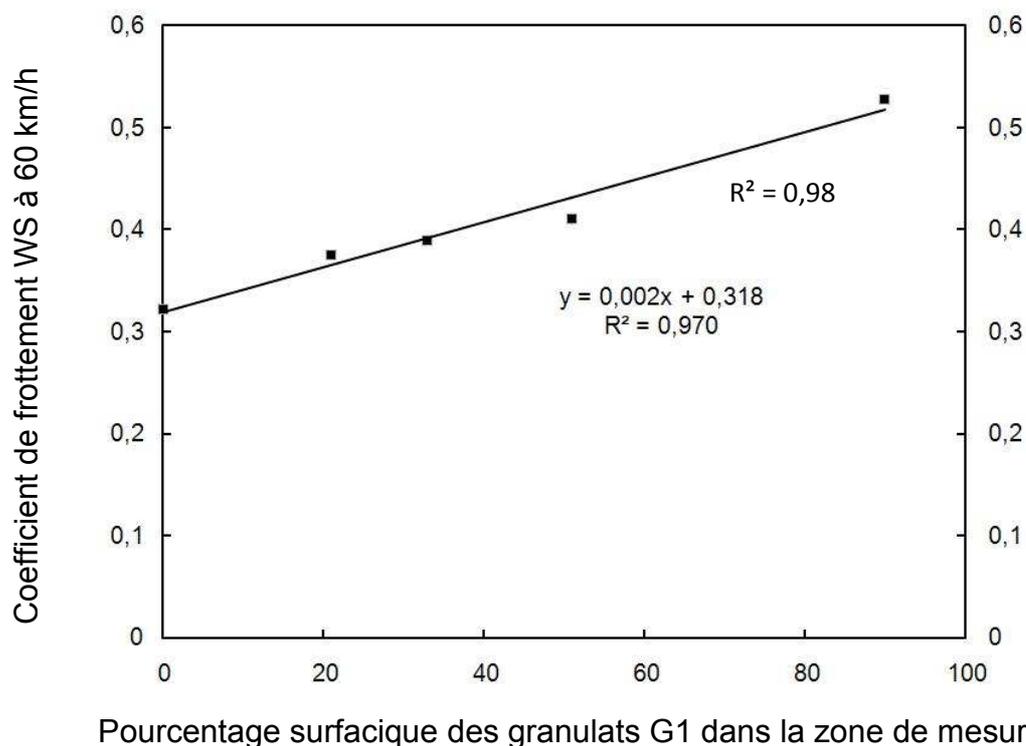


Figure 7 – Corrélation du coefficient de frottement WS en fonction du pourcentage de granulats G1 dans la couronne de polissage.

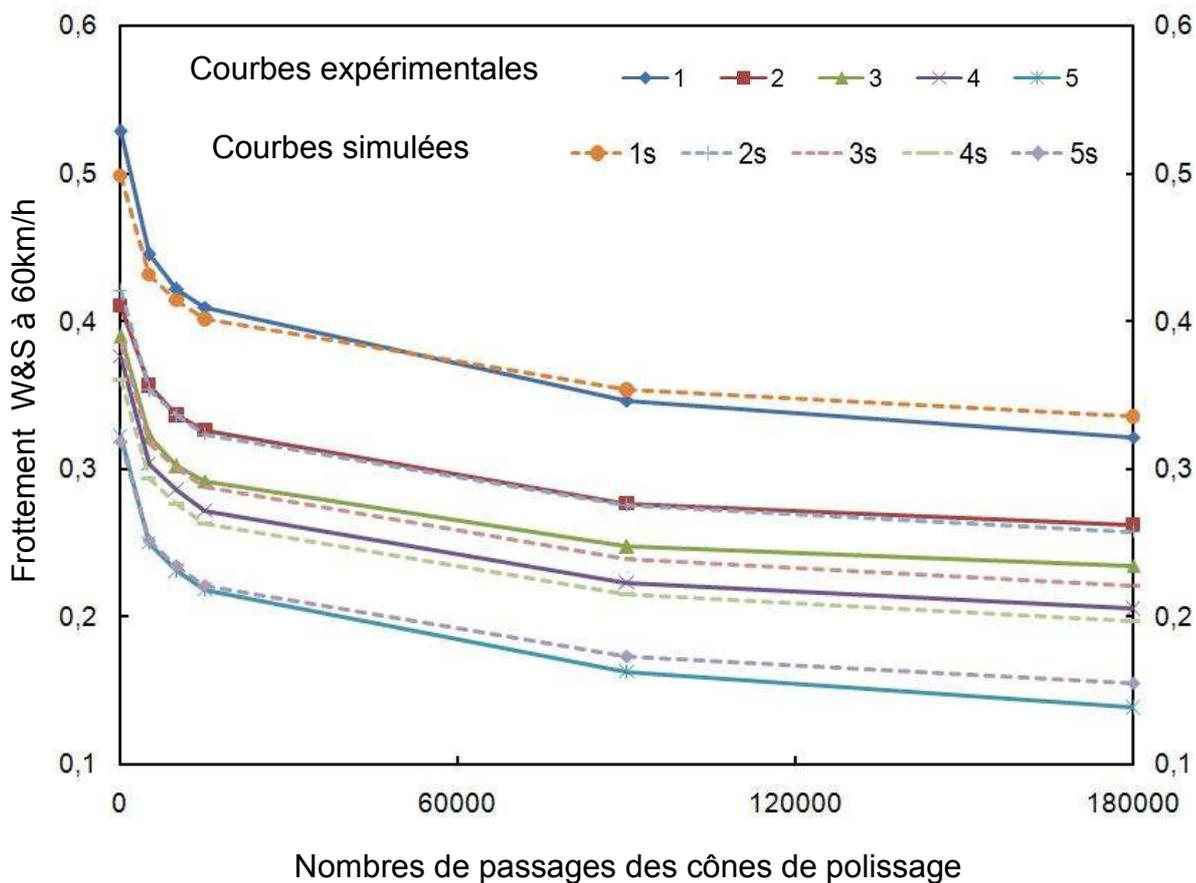


Figure 8 - Evolution du coefficient de frottement WS à 60 km/h en fonction du nombre de passage des cônes de polissage.

4. DISCUSSIONS

Au regard des différents résultats concernant les résistances à l'usure et à la fragmentation, on peut suggérer qu'un mélange granulaire se comporte comme un matériau dont les propriétés seraient obtenues en pondérant celles des granulats composant le dit mélange. Il est alors possible d'obtenir plusieurs mélanges répondant aux exigences normatives des couches de chaussées par exemple à partir de deux matériaux aux caractéristiques diamétralement opposées. Ce résultat trivial a priori a pu être vérifié dans cette étude et amène par ailleurs à s'interroger sur le mode opératoire des essais pratiqués tels que le choix du tamis de 1,6 mm et son influence sur le résultat. Des essais complémentaires vont être effectués dans le but de répondre à ces questions.

Les résultats des essais Wehner & Schulze confortent également cette hypothèse de pondération des caractéristiques en fonction des proportions des granulats : le coefficient de polissage d'un mélange de granulats de natures différentes serait directement proportionnel à celui des granulats unitaires.

Dans un enrobé bitumineux, l'arrangement des granulats sera par contre beaucoup plus aléatoire. Or, les niveaux d'adhérence dépendent de la proportion surfacique de granulats en contact avec le pneumatique. Notre protocole d'élaboration des éprouvettes de granulats préconise que les granulats soient disposés de façon à ce que la mesure se fasse sur leur face la plus plane. Enfin, les proportions des matériaux calculées lors des fabrications d'enrobés sont massiques et non surfaciques. Néanmoins, les résultats que

nous avons obtenus pourraient servir de fuseaux dans lesquels se situeraient les courbes d'adhérence pour ces enrobés.

L'essai Wehner & Schulze nous apporte des informations sur l'évolution du coefficient de frottement mais n'est pas normalisé. L'essai de polissage accéléré (PSV) reste la référence pour la profession routière en matière de coefficient de frottement. Une étude de PSV de nos mélanges granulaires est en cours. Les résultats devraient apporter des informations supplémentaires sur l'applicabilité de notre méthode en apportant une corrélation entre les résultats des deux essais.

5. CONCLUSION

Durant cette étude, nous avons caractérisé des mélanges granulaires en nous intéressant aux propriétés intrinsèques requises pour une utilisation en couche de roulement. Nous avons montré que les propriétés d'un mélange peuvent être prédites à partir de celles de ses constituants et que ces dernières obéissent à des lois linéaires. De ce fait, nous confirmons l'utilisation possible des essais de caractéristiques des matériaux granulaires homogènes à des mélanges de matériaux granulaires. Par ailleurs, ces résultats montrent la possibilité de compenser, dans une certaine mesure, les moindres qualités d'un granulat par l'ajout d'un autre qui en présenterait de meilleures favorisant ainsi l'utilisation des matériaux locaux dans certaines régions.

Cependant, bien que fortement influencée par la nature minéralogique des granulats le composant [19], l'adhérence d'un enrobé bitumineux dépend également d'autres paramètres telles que la formulation [20], la texture [20], les conditions de mise en œuvre et la nature du liant. Notre étude doit être complétée par des essais sur des enrobés de façon à vérifier nos hypothèses.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. MEEDAT, Assemblée des départements de France, FNTP, SPTF, USIRF et FSI (2009). Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace public urbain, page 6.
2. McMillan, C. et Palsat, D., (1985). Alberta's Experience in Asphalt Recycling, Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 30, pages 148-167
3. Smilijanic, M., Stefanovic, J., Neumann, H.-J., Rahimaian, I., Jovanovic, J., (1993). Aging of Asphalt on Paved Roads – Characterization of Asphalt Extracted from the Wearing Courses of Belgrades-Nis Highway, Journal of Erdol and Kohl, vol. 46, n°6, Hamburg, Germany.
4. Carpenter, S., Wolosick, J. R., (1980). Modifier influence in the characterization of hot-mix recycled material, Transportation Research Record 777, TRB, Washington, D.C., pages 15-22.
5. Terrel, R. L., Epps, J. A., (1989). *Using Additives and Modifiers in Hot-Mix Asphalt — Section A*, National Asphalt Pavement Association, Quality Improvement Series (QIP 114 A).
6. Sondag, M. S., Chadbourn, B. A., Drescher, A., (2002). *Investigation of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Mixtures*, Report No. MN/RC – 2002-15, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN.
7. Kennedy, T. W., Tam, W. O., Solaimanian, M., (1998). "Optimizing Use of Reclaimed Asphalt Pavement with the SuperPave System," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 67, pp. 311-333.
8. McDaniel, R. S., Soleymani, H., Anderson, R. M., Turner, P., Peterson, R., (2009). *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the SuperPave Mixture Design Method*, NCHRP Final Report (9-12), TRB, Washington, D.C.
9. Huang, B., Li, G., Vukosavljevic, D., Shu, X., Egan, B. K., (2005). "Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1929, Washington, D.C., pp. 37-45.
10. Kandhal, P. S., Rao, S. S., Watson, D. E., Young, B., (1995). *Performance of Recycled Hot-Mix Asphalt Mixtures in the State of Georgia*, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 95-01.
11. Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., Miró, R., Martínez, A., Botella, R., (2011). Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP), *Construction and Building Materials*, pages 1289 – 1297
12. Su K., Hachiya, Y., Maekawa, R., (2009). Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement, *Resources, Conservation and Recycling*, pages 37 – 44.
13. Norme XP P 18-545 (2008). Granulats. Éléments de définition, conformité et codification, pages 20 – 25.
14. Norme NF EN 1097-2 (2010). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
15. Norme NF EN 1097-1/A1 (2004). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval).
16. Norme NF EN 1097-8 (2009). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 8 : Détermination du coefficient de polissage accéléré.
17. Tang, Z. (2007). Polissage et adhérence des chaussées routières. Thèse de doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées, pages 59-63.

18. Hamlat, S., Marsac, P., Do, M.T., Morgades, R., Drouadaine, I. (2010). Évaluation de la résistance au polissage des matériaux de chaussures avec la machine Wehner & Schulze, RGRA n°885, pages 28-29.
19. Hamlat.S., Conde.T.M., Marion.P., Hammoum.F., Moreira.S., (2010). The effect of petrographical properties of aggregates on polishing resistance. Conférence internationale francophone de tribologie_ Modélisation du contact et de l'usure, Albi.
20. Dupont, P., Ganga, Y., Bellanger, J., Delalande, G., (2000). Planches expérimentales « adhérence – granulats ». Conclusions, RGRA n°788, pages 93-97.