
Étude de l'adhérence des mélanges granulaires hétérogènes pour enrobés recyclés

Y. Senga^{1,2}, A. Dony², J. Colin², S. Hamlat³, Y. Berthaud¹

¹UPMC – LMT-Cachan (ENS Cachan/CNRS/UPMC), France

²Institut de Recherche en Constructibilité, École Spéciale des Travaux Publics, France

³Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers, France

senga@lmt.ens-cachan.fr, 2ad-fc@wanadoo.fr, colin@profs.estp.fr,
smail.hamlat@developpement-durable.gouv.fr, berthaud@lmt.ens-cachan.fr

RÉSUMÉ. Cet article traite des caractéristiques intrinsèques de résistance au polissage de mélanges constitués de deux matériaux granulaires présents dans un enrobé recyclé (un granulat 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 en couche de roulement. Des essais traditionnels normalisés de résistance au polissage (PSV) ont été réalisés, complétés par des essais avec la machine Wehner & Schulze. Une procédure de préparation des échantillons 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.

ABSTRACT. This article presents the intrinsic characteristics of resistance to polishing of many granular blending constituted of two aggregates we can find in recycled bituminous mixtures (an aggregate commonly used in wearing courses and another recommended in base layers). Several proportions have been established for these blending in order to simulate low and high percentage of recycling. Traditional normalized tests of resistance to polishing (PSV) have been made, completed by the skid resistance tests with the Wehner & Schulze machine. A protocol of elaboration of samples have been studied and planned. The results show the influence of the characteristics of each material on the final mixture.

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

KEY WORDS: RAP, skid resistance, aggregate, recycling, wearing course.

1. Introduction

Depuis quelques années, les nouvelles dispositions environnementales sont au centre de l'action de l'industrie routière. En France, la technique de recyclage à chaud des enrobés bitumineux, développée depuis les années 1970, est actuellement en plein essor. Dans le contexte de développement durable, l'utilisation des agrégats d'enrobés devient une priorité pour cette industrie (Usirf, 2009) qui a pour objectif d'optimiser leur utilisation dans toutes les couches de chaussées, lesquelles sont constituées de matériaux dont le choix de la qualité varie en fonction de leur rôle.

Jusqu'à présent, les recherches se sont principalement concentrées sur le liant d'agrégats d'enrobés, notamment sur les interactions avec le liant d'apport (McMillan *et al.*, 1985, Smilijanic *et al.*, 1993, Carpenter *et al.*, 1980). La caractérisation des effets des granulats d'agrégats qui représentent environ 95% de la masse de l'agrégat est souvent moins importante. Ces granulats sont caractérisés avec les essais traditionnels comme pour des matériaux neufs et homogènes alors qu'ils sont constitués de matériaux provenant de différentes couches de chaussées, donc ayant des propriétés hétérogènes.

Dans cette étude, nous avons travaillé avec plusieurs mélanges granulaires constitués à partir de deux matériaux aux propriétés distinctes (un granulat couramment utilisé en couche de roulement et un autre recommandé en couche d'assise). Ces mélanges ont été établis dans différents pourcentages de façon à se placer dans le cadre de recyclage à faible et fort taux. Ce travail s'inscrit dans une campagne expérimentale de caractérisation plus large (Senga *et al.*, 2011) de ces mélanges granulaires qui a commencé par des essais normalisés de résistance à la fragmentation et à l'usure d'une part, et de résistance au polissage par la machine Wehner & Schulze d'autre part. Il complète l'étude des propriétés de surface des granulats avec les essais normalisés de résistance au polissage (PSV) et essaie d'établir une corrélation avec les résultats Wehner & Schulze. L'objectif étant de pouvoir prédire les propriétés des mélanges à partir de celles des matériaux les constituant. Elles nous permettront de pouvoir mieux appréhender l'influence des granulats de recyclage sur l'adhérence des enrobés recyclés.

2. Matériaux et démarche expérimentale

Nous avons choisi de travailler initialement avec des granulats neufs car les caractéristiques intrinsèques des granulats ne varient pas au cours du temps, même après leur utilisation en couche de chaussée (Senga *et al.*, 2011).

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 (norme XP P 18-545, 2008). Le tableau 1 présente les caractéristiques des matériaux utilisés. Toutes les analyses ont été menées sur la fraction 6/10 des granulats.

Tableau 1. *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 2) 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 2. *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 de polissage accéléré PSV (Polished Stone Value)

Uniquement pratiqué pour les granulats pour couches de roulement, il sert à déterminer le coefficient de résistance au polissage des granulats (Norme NF EN 1097-8, 2009). 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). Nous avons essayé de respecter au mieux le protocole d'essai de la norme à savoir de sélectionner les granulats « au hasard » et non par rapport à leur forme, ce qui aurait rendu les éprouvettes plus facile à fabriquer notamment dans les cas des mélanges. Une fois la résine solidifiée, ces plaquettes de granulats sont assemblées sur une roue dite « 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. Cette mesure se fait par via un patin en caoutchouc de 31,75 mm de largeur sur 25,4 mm de longueur et 6,35 mm d'épaisseur.

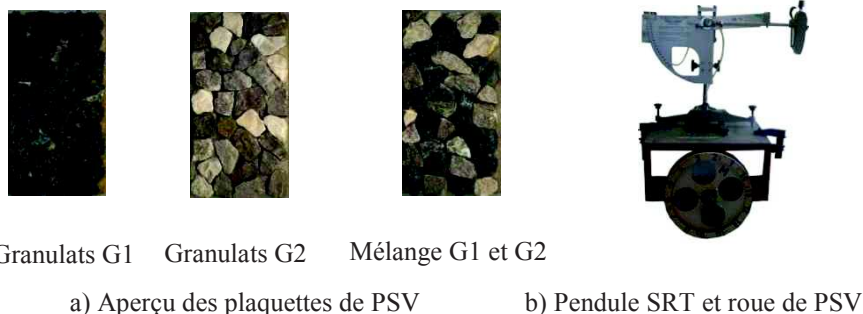


Figure 1. Dispositif de mesure de l'essai PSV.

2.2. Essai de polissage accéléré 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 (Tang, 2007).

La machine se compose de deux postes (cf. figure 2) : 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 (Hamlat *et al.*, 2010).

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 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 3a). Les granulats sont ensuite maintenus en place par une résine (cf. figure 3e). 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 3b) puis remplacer un à un des granulats sélectionnés de façon à obtenir les proportions massiques visées (cf. figure 3c). Du fait de la différence de forme et de masse volumique des granulats, cette répartition est un processus long et délicat.

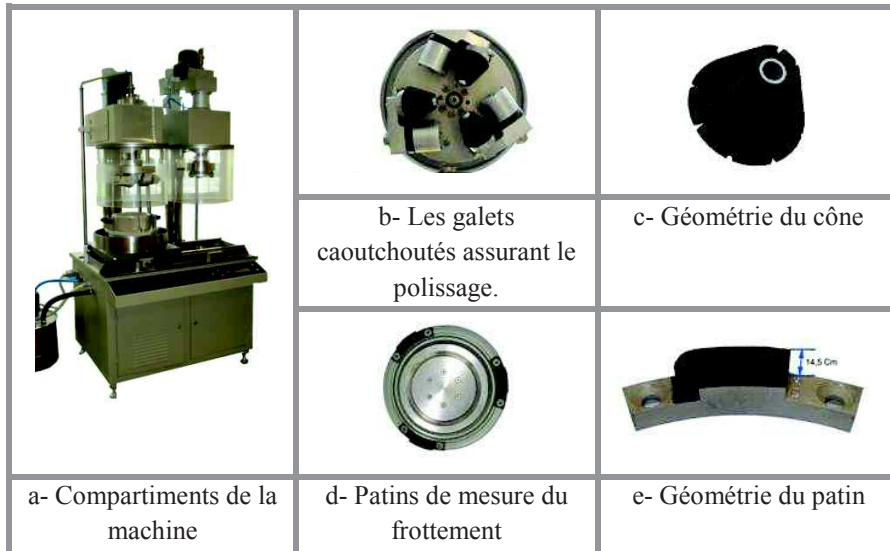


Figure 2. *Machine Wehner & Schulze.*

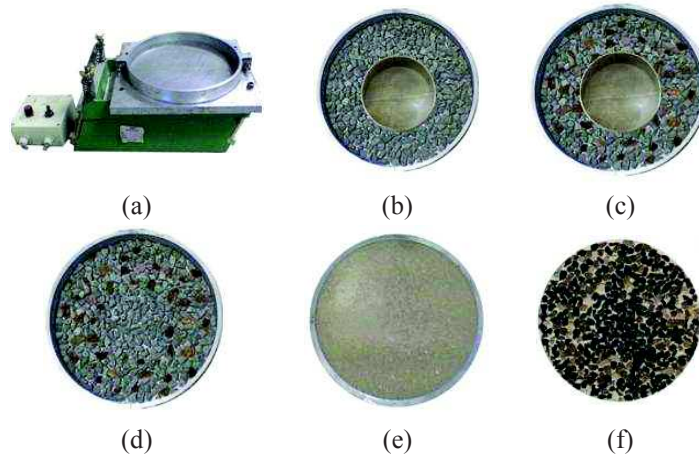


Figure 3. *Protocole de fabrication d'une éprouvette de granulats Wehner & Schulze.*

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 2e).

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. Cette

dernière est effectuée à 60 km/h 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) (Hamlat *et al.*, 2010). L'essai permet de décrire l'évolution du coefficient de frottement.

3. Résultats

Les essais PSV et Wehner & Schulze ont été réalisés en essayant de respecter au mieux les proportions massiques dans les mélanges. Cependant, le coefficient de frottement dépend de la distribution surfacique des granulats G1 et G2 dans la zone de mesure. Nous avons déterminé avec précision cette distribution dans la zone de mesure par une analyse d'images. Elle a consisté à isoler un type de granulats dans un premier temps. Nous avons choisi le type G1 plus facile à identifier à cause de ses moindres variations de couleurs. Dans un second temps, nous avons déterminé la surface qu'il occupe dans la zone de mesure de l'essai en utilisant les fonctions de seuillage du logiciel Gimp (cf. figure 4 et 5). L'analyse d'images nous a permis de connaître la fraction surfacique des granulats G1 et le pourcentage de remplissage de la zone de mesure. On a ainsi pu en déduire la fraction de granulats G2. Les résultats ont été obtenus à partir d'un essai Wehner & Schulze et de la moyenne de deux essais dans le cas du PSV. Sachant qu'une valeur PSV est obtenue à partir de deux éprouvettes, nous avons donc fabriqué quatre éprouvettes de chaque « mélange ».


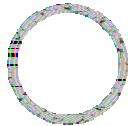

		
Mélange 2	Remplissage : 86 %	Surface G1 : 21%

Figure 4. Distribution surfacique des granulats G1 dans la zone de mesure des éprouvettes W&S par analyse d'images.







					
Mélange 2	Remplissage : 92,0 %	Surface G1 : 26,7 %	Mélange 2	Surface G1 et G2 : 91,6 %	Remplissage : 23,4 %

Figure 5. Distribution surfacique des granulats G1 dans la zone de mesure des éprouvettes PSV par analyse d'images.

Les résultats de l'essai PSV nous montrent une augmentation du coefficient de résistance au polissage proportionnelle à l'augmentation de la fraction de granules G1. La figure 6 présente cette évolution. Dans ce cas uniquement, nous avons choisi de représenter cette évolution en utilisant les pourcentages de granules G1 ramenés à la zone de mesure sans les vides. Le coefficient de frottement est soumis à une évolution linéaire d'après la loi :

$$PSV(\alpha G1 + \beta G2) = \alpha PSV(G1) + \beta PSV(G2).$$

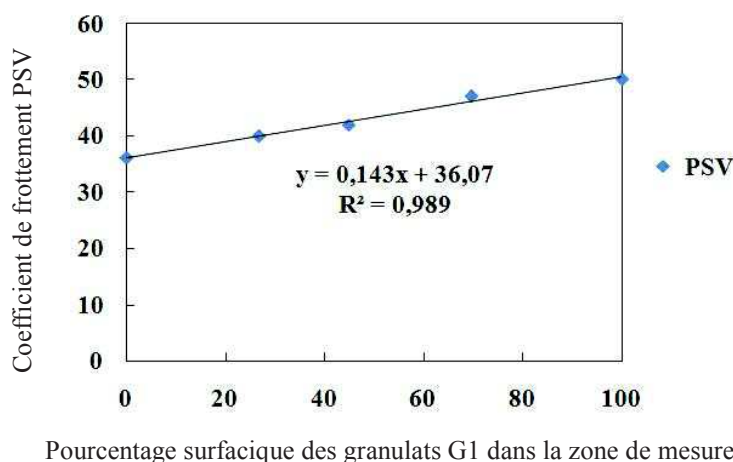


Figure 6. Évolution du coefficient PSV avec l'augmentation de la fraction de granules G1 par rapport à la fraction G2 (sans tenir compte des vides).

Nous avons constaté pour chaque éprouvette Wehner & Schulze une diminution du coefficient de frottement durant l'essai. À l'instar de l'essai PSV, les résultats obtenus ont également montré une augmentation des niveaux d'adhérence proportionnelle à l'augmentation de la fraction de granules G1. 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 8). Ainsi, comme dans les 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.

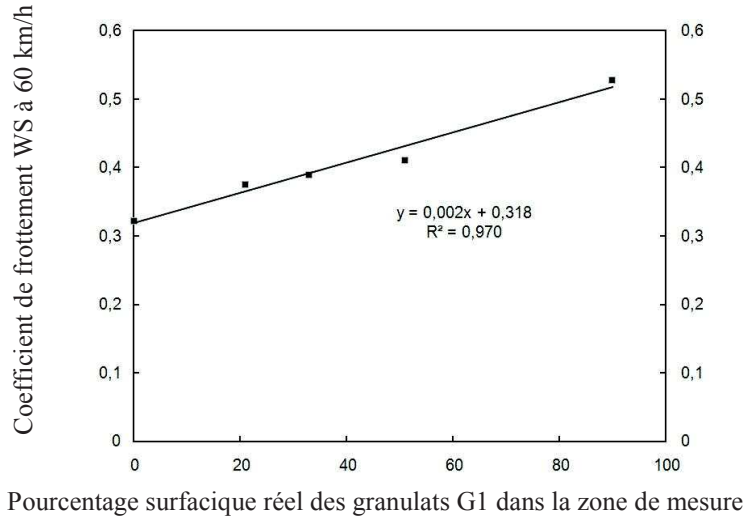


Figure 7. Corrélation du coefficient de frottement WS en fonction du pourcentage de granulats G1 dans la couronne de polissage.

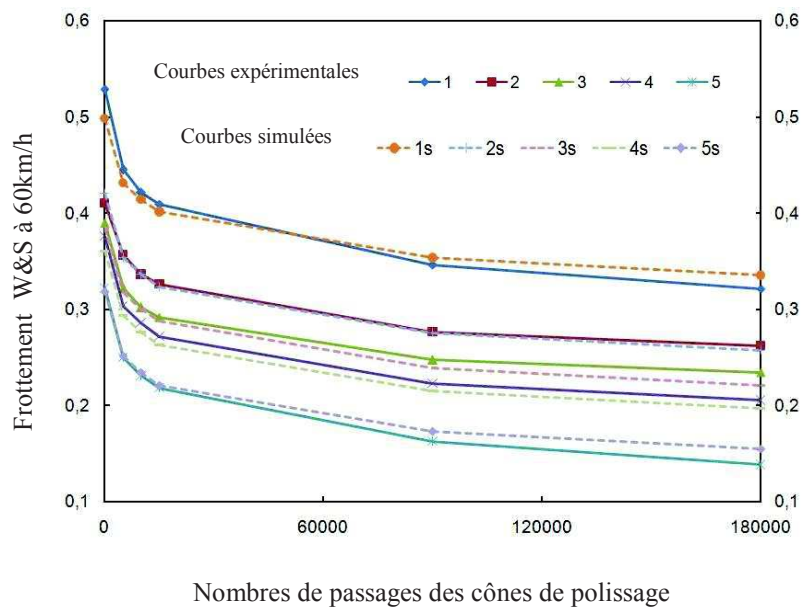


Figure 8. Évolution du coefficient de frottement WS à 60 km/h en fonction du nombre de passage des cônes de polissage.

4. Discussions

Les résultats des essais PSV et Wehner & Schulze valident notre hypothèse de départ à savoir que l'on puisse déterminer les propriétés de résistance au polissage d'un mélange en pondérant les propriétés des matériaux qui le composent. Ces résultats nous suggèrent que l'on pourrait, dans une problématique de recyclage par exemple, utiliser un matériau de granulaire possédant de bonnes propriétés de résistance au polissage pour améliorer les propriétés d'un mélange.

Toutefois, nous devons faire preuve de parcimonie car dans un enrobé bitumineux, l'arrangement des granulats sera de façon plus aléatoire. Or, les niveaux d'adhérence dépendent de la proportion des granulats en contact avec le pneumatique et de leur répartition. Dans un enrobé bitumineux, ces granulats ne présenteront pas systématiquement leurs faces les plus planes à la surface. De même, leur répartition ne sera pas nécessairement homogène. 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 d'évaluation indirecte de la microtexture des revêtements routiers. Une corrélation directe entre les coefficients de frottement obtenus avec les deux essais n'a pu être faite. Les difficultés liées au mode de fabrication des éprouvettes rendent délicate la maîtrise des fractions surfaciques des granulats dans les zones de mesure.

5. Conclusion

Durant cette étude, nous avons caractérisé des mélanges granulaires en nous intéressant à l'une des propriétés intrinsèques requises pour une utilisation en couche de roulement à savoir la résistance au polissage. Nous avons montré que les propriétés d'un mélange granulaire peuvent être prédites à partir de celles de ses constituants par des lois linéaires. De ce fait, nous confirmons l'utilisation possible des essais de caractérisation des matériaux granulaires homogènes à des mélanges hétérogènes. 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 (Hamlat *et al.*, 2010), l'adhérence d'un enrobé bitumineux dépend également d'autres paramètres telles que la formulation (Dupont *et al.*, 2000), la texture (Dupont *et al.*, 2000), les conditions de mise en œuvre et la nature

XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

du liant. Notre étude doit être complétée par des essais sur des enrobés de façon à vérifier nos hypothèses.

6. Bibliographique

- 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.
- Dupont, P., Ganga, Y., Bellanger, J., Delalande, G., (2000). « Planches expérimentales adhérence – granulats. Conclusions », RGRA n°788, pages 93-97.
- 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.
- Hamlat, S., Marsac, P., Do, M.T., Morgades, R., Drouadaine, I. (2010). « Évaluation de la résistance au polissage des matériaux de chaussées avec la machine Wehner & Schulze », RGRA n°885, pages 28-29.
- McMillan, C. et Palsat, D., (1985). Alberta's Experience in Asphalt Recycling, Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 30, pages 148-167.
- 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.
- Norme XP P 18-545 (2008). Granulats. Éléments de définition, conformité et codification, pages 20 – 25.
- Norme NF EN 1097-8 (2009). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 8 : Détermination du coefficient de polissage accéléré.
- Senga Y., Dony A., Colin J., Hamlat S., Berthaud Y., (2011). « Impact de l'hétérogénéité des granulats d'agrégats d'enrobés sur les propriétés d'adhérence des enrobés recyclés », 24^e Congrès mondial de la route, Mexico.
- Smilijanac, 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.
- Tang, Z. (2007). *Polissage et adhérence des chaussées routières*. Thèse de doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées, pages 59-63.