



EFFET DES AGRÉGATS D'ENROBÉ SUR LES PERFORMANCES D'ADHÉRENCE DES REVÊTEMENTS DE CHAUSSEE

Octobre 2026

Résumé

Ce document présente un état des connaissances de l'effet de l'introduction d'agrégats d'enrobés (AE) en couche de roulement sur les performances d'adhérence. Il est basé d'une part sur l'analyse des informations contenues dans la base de données CARAT et d'autre part sur une recherche documentaire. Il a été validé par les membres du sous-groupe « *adhérence* » du GNCDS (Groupe national sur les Caractéristiques de Surface) et le GNR2 (Groupe National Recyclage et Retraitement).

Dans un premier temps, la base CARAT (CARactéristiques de Revêtements en Adhérence et Texture) est une base de données contenant des mesures de CFL (coefficient de frottement longitudinal) acquises par l'appareil Adhera du Cerema sur différents types de revêtements routiers français à différentes vitesses comprises entre 40 et 120 km/h. Cette base contient plus de 8000 fiches de mesures. Les mesures sont visualisées sous la forme de fuseaux (1^{er} et 9^{ème} déciles) représentant l'évolution du CFL en fonction de la vitesse. Ces fuseaux peuvent être déterminés par technique, par classe de trafic cumulé, par granulométrie et par nature du liant. Le fuseau de référence reprend l'ensemble des données de la base pour une modalité donnée (technique, trafic, etc.) et précise les valeurs de CFL pour les 10 % d'enrobés les plus performants (9^{ème} décile) et les 10 % les moins performants (1^{er} décile). Le fuseau de référence datant des années 80 n'étant plus représentatif des performances actuelles des revêtements routiers, une actualisation a été réalisée dans le cadre de cette étude et c'est ce nouveau fuseau qui servira de référence pour l'ensemble des comparaisons présentées.

L'analyse a porté sur 230 fiches correspondant à des enrobés avec AE. L'exploitation a été réalisée en considérant des classes de taux d'AE d'étendue de 10 % jusqu'à un taux d'incorporation de 50 %. Au-delà de 50 % de taux d'AE, toutes les données ont été regroupées afin de disposer d'un échantillon de taille suffisante. Dans un premier temps, les analyses ont été réalisées en considérant l'ensemble des techniques. Il est à noter une représentation très forte dans l'échantillon des enrobés de type BBSG et BBTM. Tout d'abord, quel que soit le taux d'AE, le CFL à basse vitesse (40 km/h) est égal voire légèrement meilleur que celui du fuseau de référence toutes techniques confondues. Ensuite, pour les grandes vitesses (80 km/h et 120 km/h), le CFL est généralement moins élevé que la référence (1^{er} et 9^{ème} décile). Une analyse détaillée sur la formulation et l'âge permet néanmoins d'identifier quelques facteurs explicatifs. Pour les taux d'AE entre 10 et 40 %, ceci s'explique par une prédominance de la technique BBSG dans l'échantillonnage avec AE par rapport au fuseau de référence « *tous revêtements* » qui ne contient que 11 % de BBSG et qui est largement dominé par des techniques discontinues (BBTM, BBUM) présentant une bonne macrotexture et des meilleures valeurs de CFL à 80 et 120 km/h. Par ailleurs, pour certains taux d'AE, l'âge très variable des chantiers considérés (entre 1 et 9 ans) pourrait également expliquer une certaine variabilité des performances en CFL. Pour les taux d'AE de 41 à 50 %, le fuseau CARAT est assez proche de celui de référence mais les calculs sont réalisés sur 22 fiches sans connaître la répartition par type de technique routière et 77 % des fiches (17/22 fiches) correspondent à des chantiers récents (1 à 3 ans). Ces résultats encourageants sont donc à considérer avec prudence. Pour les taux d'AE de 51 à 100 %, le fuseau CARAT (20 fiches) est plus bas que celui de référence. En analysant l'âge des revêtements, on peut observer que celui-ci s'étale sur 9 ans avec 50 % des chantiers de moins de 1 an (10/20 fiches) et le reste est réparti entre 4 et 9 ans. Cette disparité dans l'âge couplé à un échantillon de taille limitée pourrait expliquer la largeur du fuseau CARAT pour ces taux d'AE.

Compte-tenu de ces éléments, la technique BBSG semble influencer fortement les fuseaux avec les différents taux d'AE. Une 2^{ème} analyse a été effectuée en se focalisant uniquement sur cette technique et en constituant un fuseau de référence « *BBSG sans AE* ». Pour les taux compris entre 0 et 20 %, les fuseaux sont confondus et l'introduction d'AE n'a donc pas d'effet a priori sur les performances d'adhérence. Pour les taux d'AE compris entre 21 et 30 %, le fuseau est plus étroit que le fuseau de référence sans AE ce qui traduit d'une part une homogénéité des performances d'adhérence pour les chantiers réalisés avec ces taux d'AE et d'autre part le fait que ces taux d'AE permettent de maintenir voire d'améliorer légèrement les performances d'adhérence des BBSG. Pour les taux d'AE compris entre 31 et 40 %, le CFL à 40 km/h est équivalent voire amélioré par rapport au fuseau de référence BBSG sans AE. Il est probable que ce constat traduise les conséquences d'une usure différentielle des granulats qui recrée de la microtexture et donc améliore les performances d'adhérence. Les CFL à 80 km/h et 120 km/h semblent baisser légèrement avec ces taux d'AE mais les performances restent acceptables. Enfin, pour les taux d'AE supérieurs ou égaux à 41 %, il n'est pas possible d'établir des fuseaux compte-tenu du faible nombre de fiches concernées.

Dans un second temps, l'étude documentaire a porté sur 41 articles et rapports, parmi lesquels 29 ont fait l'objet d'une fiche de lecture détaillée. On peut noter que la Chine, les USA et les pays européens dont la France sont les principaux auteurs de ces travaux. 41 % des documents ont été publiés entre 1995 et 2014, avec un net pic de publications entre 2012 et 2014 ainsi que depuis 2021. Plus de la moitié des documents traite d'expérimentations menées en laboratoire. Seules 7 % des études portent à la fois sur des études de laboratoire et leur traduction sur la route. Néanmoins, une dizaine d'études dédiées à des chantiers routiers réels a pu être étudiée. On observe que 65 % des études sélectionnées traitent de taux d'AE strictement supérieurs à 30 % et plus de 40 % des études concernent des taux d'AE strictement supérieurs à 50 %. Enfin, onze études fournissent des données de coefficient de frottement pour différents taux d'AE, quatre fournissent des données de macrotexture uniquement et cinq proposent des données de frottement et de macrotexture. L'analyse a été réalisée en regroupant les études en trois catégories selon le taux d'incorporation d'AE : $\leq 30\%$, $30 \text{ à } 50\%$, $> 50\%$.

Dans les cas des taux AE $\leq 30\%$ (10 études), on observe soit un maintien soit une légère baisse des performances d'adhérence (en frottement et/ou en macrotexture) mais rien qui ne soit véritablement notable. Lorsque le taux d'AE augmente entre 30 et 50 %, on note que le rôle des matériaux devient de plus en plus important que ce soit pour les aspects purement mécaniques (4 études) ou d'adhérence (3 études). Notamment, l'impact du PSV des granulats issus des AE est observable. De plus, la connaissance du stock d'AE (et notamment de son homogénéité) est mise en avant pour garantir de bonnes performances d'adhérence. Pour des taux d'AE $> 50\%$, 8 études ont été analysées. Cinq rapportent des résultats de travaux menés uniquement en laboratoire et trois concernent des travaux réalisés à la fois en laboratoire et sur route avec des chantiers datant de 2018 et 2021. On observe que l'incorporation d'AE à des taux supérieurs à 50 % permet d'obtenir des enrobés respectant les obligations en termes de macrotexture (i.e. maîtrise des formulations et de leur mise en œuvre) avec des niveaux de performances qui restent corrects au regard des besoins en adhérence au fur et à mesure du polissage par le trafic. Dans certains cas, l'usage d'ajouts de laitiers pour des taux d'AE supérieurs à 60 % a permis de maintenir de bons niveaux de frottement.

En complément, un focus a été réalisé sur l'évolution des performances d'adhérence avec le polissage. Plusieurs études de laboratoire ont abordé cette question en réalisant des essais à l'aide de la machine Wehner & Schulze qui permet de simuler de manière accélérée l'usure générée par le trafic routier. Globalement, ces études montrent que l'incorporation de taux d'AE même à des forts taux (50 à 70 % d'AE) dans des échantillons de laboratoire n'entraîne pas de dégradation excessive des niveaux de performances en adhérence en comparaison des différentes formules utilisées comme référence. Trois types de formulation ont été testées, à savoir des BBSG, des BBTM et des BBDr. De même, le multi-recyclage ne semble pas avoir d'impact significatif sur le niveau de performances d'adhérence à long terme. Ces résultats restent à confirmer par une analyse d'un échantillon plus important de chantiers routiers.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	3
INTRODUCTION	11
I. ANALYSE DE LA BASE DE DONNÉES CARAT	12
1. Caractéristiques de la base CARAT	12
2. Impact du taux d'AE sur le coefficient de frottement longitudinal (CFL) – analyse tous revêtements confondus	14
3. Impact du taux d'AE sur le coefficient de frottement longitudinal (CFL) – cas spécifique des BBSG	21
II. CARACTÉRISTIQUES DE LA RECHERCHE DOCUMENTAIRE	25
1. Origine des documents	25
2. Nature des travaux et études	26
III. LIEN ENTRE TAUX D'AE ET PERFORMANCES D'ADHÉRENCE	28
1. Faibles taux d'AE ($\leq 30\%$)	28
2. Taux d'AE intermédiaires (30 à 50 %)	28
3. Forts taux d'AE ($> 50\%$)	29
IV. POLISSAGE DES ENROBÉS AVEC AE	31
1. Essais de polissage	31
2. Evolution de l'adhérence avec le polissage pour les enrobés contenant des AE	32
V. CONCLUSIONS	37
VI. LISTE DES RÉFÉRENCES (HORS FICHES DE LECTURE)	38
VII. LISTE DES FICHES DE LECTURES	39
ANNEXES	41
CONTRIBUTEURS	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Fuseau de référence des années 80 (pointillés noirs) et fuseau actualisé (trait plein orange)	12
Figure 2 : Répartition du nombre de fiches CARAT par famille de technique routière (8000 fiches)	13
Figure 3 : Répartition des revêtements sur RRN par famille de technique routière (source : ISIDOR)	13
Figure 4 : Répartition des revêtements sur autoroute par famille de technique routière (source : ASFA et SETRA 2000)	13
Figure 5 : Répartition par technique routière des fiches sans AE.	14
Figure 6 : Répartition par âge des fiches sans AE (âge moyen = 3,3 ans)	14
Figure 7 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 0 à 10 % (38 fiches)	15
Figure 8 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 11 à 20 % (85 fiches)	15
Figure 9 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 21 à 30 % (42 fiches)	15
Figure 10 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 0 à 10 % (âge moyen = 1,4 ans)	15
Figure 11 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 11 à 20 % (âge moyen = 2,9 ans)	15
Figure 12 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 21 à 30 % (âge moyen = 2,4 ans)	15
Figure 13 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 31 à 40 % (23 fiches)	16
Figure 14 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 41 à 50 % (22 fiches)	16
Figure 15 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 51 à 100 % (20 fiches)	16
Figure 16 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 31 à 40 % (âge moyen = 2,0 ans)	16
Figure 17 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 41 à 50 % (âge moyen = 3,0 ans)	16
Figure 18 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 51 à 100 % (âge moyen = 2,9 ans)	16
Figure 19 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 0 à 10 % d'AE (38 fiches)	18
Figure 20 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 11 à 20 % d'AE (85 fiches)	18
Figure 21 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 21 à 30 % d'AE (42 fiches)	19
Figure 22 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 31 à 40 % d'AE (23 fiches)	19
Figure 23 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 41 à 50 % d'AE (22 fiches)	20
Figure 24 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 51 à 100 % d'AE (20 fiches)	20
Figure 25 : Comparaison des fuseaux de référence BBSG sans AE et avec 0 à 10 % d'AE (28 fiches)	22
Figure 26 : Comparaison des fuseaux de référence BBSG sans AE et avec 11 à 20 % d'AE (59 fiches)	23
Figure 27 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 21 à 30 % d'AE (21 fiches)	22
Figure 28 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 31 à 40 % d'AE (14 fiches)	24
Figure 29 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 41 à 50 % d'AE (2 fiches)	23
Figure 30 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 51 à 100 % d'AE (6 fiches)	24
Figure 31 : Répartition des documents par origine géographique	25
Figure 32 : Répartition des documents par date de publication	26
Figure 33 : Répartition des documents par type d'études	26
Figure 34 : Répartition des documents par valeur maximale de taux d'AE testés	27
Figure 35 : Évolution du coefficient de frottement mesuré in-situ F60 en fonction du taux d'AE [FL6]	29
Figure 36 : Évolution du coefficient de frottement avec le polissage pour des formules sans AE (V100), avec 50 % d'AE (CR50-FV50, CV50-FR50) et 100 % d'AE (R100) [FL27]	30
Figure 37 : Machine Wehner/Schulze.	31
Figure 38 : Comparaison de l'évolution de l'adhérence mesurée par l'essai W&S en fonction du taux de recyclage et de la valeur PSV des granulats utilisés [Ref.4].	32

Figure 39 : Essais de polissage sur enrobé à chaud sans AE (H4), avec 10 % AE (H5) et 30 % d'AE (H6) [FL8]	33
Figure 40 : Profondeur Moyenne de Texture (PMT) pour les éprouvettes fabriquées à chaud en laboratoire [FL24]	34
Figure 41 : Profondeur Moyenne de Texture (PMT) pour les éprouvettes fabriquées à tiède [FL24].	34
Figure 42 : Essais Wehner et Schulze sur enrobés « à chaud » (LH) et « tièdes » (LWF) à 0,40 et 70 % d'AE après un cycle de recyclage [FL24].	35
Figure 43 : Essais Wehner et Schulze sur enrobés « à chaud » (LH) et « tièdes » (LWF) contenant 40 % d'AE après 0, 1 et 2 cycles de recyclage [FL24]	35
Figure 44 : Essais Wehner et Schulze sur enrobés « à chaud » (LH) et « tièdes » (LWF) contenant 70 % d'AE après 0, 1 et 3 cycles de recyclage [FL24]	36
Figure 45 : Effet de l'eau sur l'adhérence pour des enrobés sans AE (a) et avec AE (b) au fur et à mesure du temps	87
Figure 46 : Effet du sable sur l'adhérence pour des enrobés sans AE (a) et avec AE (b) au fur et à mesure du temps	88
Figure 47 : Effet de l'huile sur l'adhérence pour des enrobés sans AE (a) et avec AE (b) au fur et à mesure du temps	88

Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le cadre des travaux du GNCDS sous-groupe « *adhérence* » et présente un état des connaissances de l'effet de l'introduction d'agrégats d'enrobés (AE) en couche de roulement sur les performances d'adhérence. Pour ce faire, deux sources d'informations ont été utilisées à savoir la base de données CARAT et une analyse bibliographique. L'objectif était d'évaluer l'évolution des connaissances depuis 2014, date de la dernière étude menée par le GNCDS sur ce sujet.

La sélection des documents bibliographiques est basée sur plusieurs critères. Tout d'abord, une analyse de documents dont la date de publication est postérieure à 2014 a été privilégiée. Néanmoins, des études de référence antérieures à cette date ont été conservées dans l'analyse bien que l'objectif du présent document soit de faire le point sur les avancées récentes dans le domaine. Ensuite, la recherche s'est portée essentiellement sur des études utilisant des taux d'AE supérieurs à 30 %. Par ailleurs, il a été décidé de ne pas se limiter au territoire français bien que les formulations trouvées dans d'autres pays puissent différer légèrement de celles utilisées au niveau national. Enfin, des études réalisées aussi bien en laboratoire que in-situ ont été considérées.

Ce rapport est divisé en trois parties. Dans un premier temps, la base de données CARAT a été réexploitée par le Cerema afin de déterminer si la présence d'AE semblait avoir un impact sur le niveau de frottement mesuré ou non. Dans un deuxième temps, les principales caractéristiques des études sélectionnées dans le cadre de l'analyse bibliographique sont précisées. Ce document s'appuie sur l'étude de 230 fiches de la base de données CARAT et de 41 articles et rapports, parmi lesquels 29 ont fait l'objet d'une fiche de lecture détaillée. Dans un troisième temps, les principaux enseignements tirés de ces documents sont présentés. Enfin, une annexe contenant chaque fiche de lecture ayant été utilisée pour l'analyse bibliographique est fournie.

I. Analyse de la base de données CARAT

1. Caractéristiques de la base CARAT

La base CARAT (CAractéristiques de Revêtements en Adhérence et Texture) est une base de données contenant des mesures de CFL (coefficient de frottement longitudinal) acquises par l'appareil Adhera du Cerema sur différents types de revêtements routiers français. Cette base créée dans les années 70 contient aujourd'hui plus de 8000 fiches de mesures.

Les valeurs de CFL sont mesurées à 3 vitesses différentes – généralement 40, 60 et 90 km/h pour les mesures sur routes nationales et 60, 90 et 120 km/h sur autoroutes. Pour pouvoir comparer les mesures entre elles, les CFL sont recalculés par ajustement hyperbolique pour les vitesses standards de 40, 80 et 120 km/h. Les mesures peuvent être visualisées sous la forme de fuseaux (1^{er} et 9^{ème} déciles) représentant l'évolution du CFL en fonction de la vitesse. Ces fuseaux peuvent être déterminés par technique, par classe de trafic cumulé, par granulométrie et par nature du liant.

Le fuseau de référence reprend l'ensemble des données de la base pour une modalité donnée (technique, trafic, etc.) et précise les valeurs de CFL pour les 10 % d'enrobés les plus performants (9^{ème} décile) et les 10 % les moins performants (1^{er} décile). Le fuseau de référence datant des années 80 n'est plus représentatif des performances actuelles des revêtements routiers. Une actualisation de ce fuseau a donc été réalisée dans le cadre de cette étude et c'est ce nouveau fuseau qui servira de référence pour l'ensemble des comparaisons présentées dans ce rapport (Figure 1).

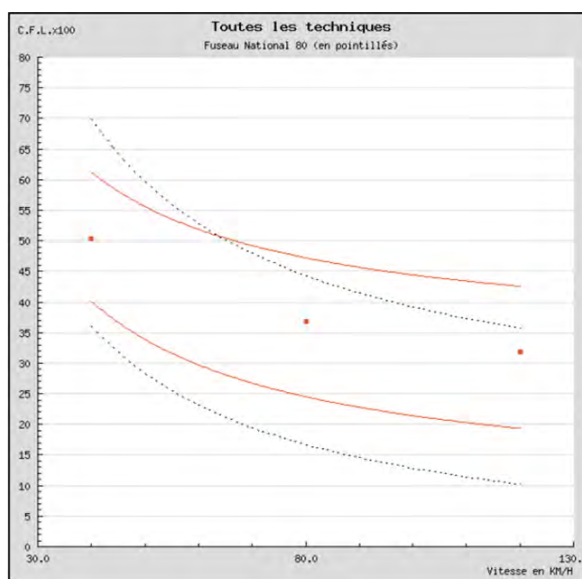


Figure 1 : Fuseau de référence des années 80 (pointillés noirs) et fuseau actualisé (trait plein orange)

En analysant les techniques représentées dans la base (Figure 2), une prédominance des BBTM (Béton Bitumineux Très Mince) et des BBDr (Béton Bitumineux Drainant) est observable. Une analyse de la répartition des techniques routières par type de réseau routier montre une représentation plus forte des BBSG (Béton Bitumineux Semi-Grenu) et une représentation plus faible des BBDr par rapport à la base CARAT (Figure 3 et Figure 4).

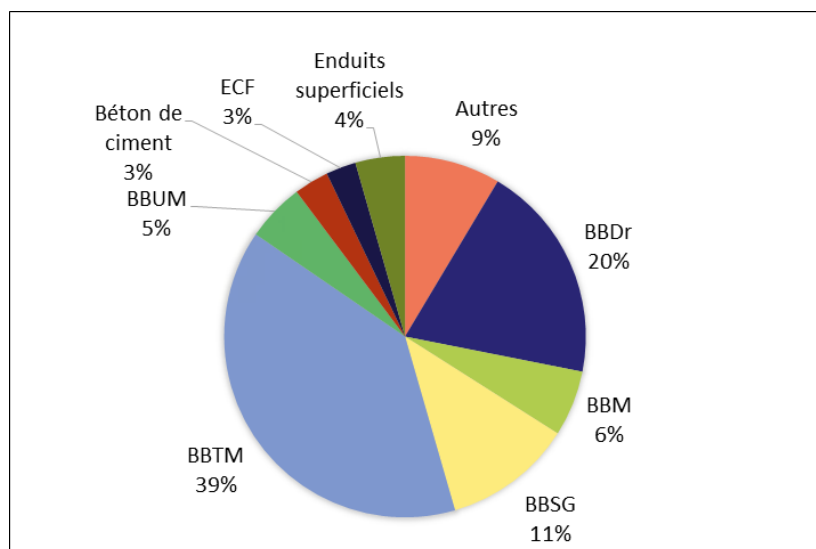


Figure 2 : Répartition du nombre de fiches CARAT par famille de technique routière (8000 fiches)

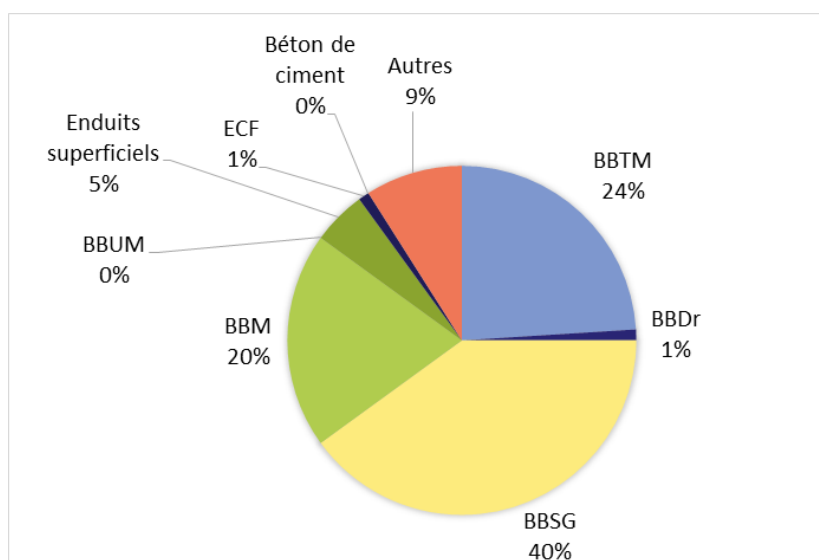


Figure 3 : Répartition des revêtements sur RRN par famille de technique routière (source : ISIDOR)

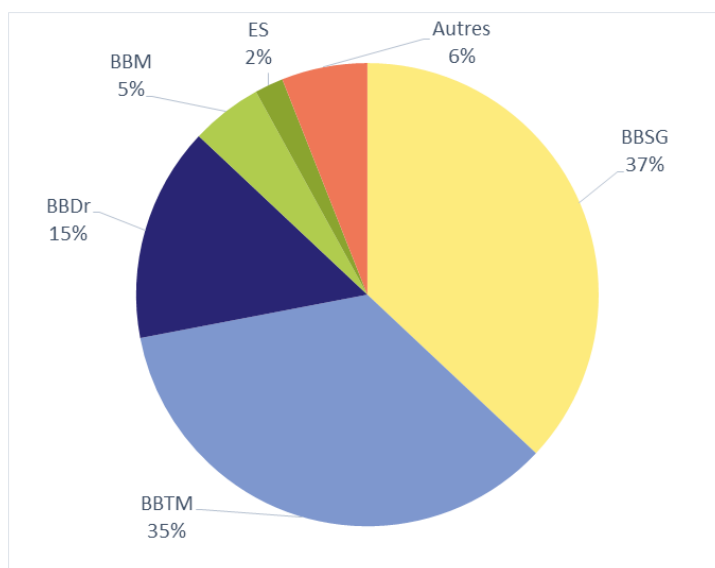


Figure 4 : Répartition des revêtements sur autoroute par famille de technique routière (source : ASFA et SETRA 2000)

2. Impact du taux d'AE sur le coefficient de frottement longitudinal (CFL) – analyse tous revêtements confondus

L'analyse a porté sur 230 fiches correspondant à des enrobés avec AE. L'exploitation a été réalisée en considérant des classes de taux d'AE d'étendue de 10 % jusqu'à un taux d'incorporation de 50 %. Au-delà de 50 % de taux d'AE, toutes les données ont été regroupées afin de disposer d'un échantillon de taille suffisante. Compte-tenu du nombre limité de fiches disponibles dans chaque taux d'AE, une analyse en discriminant les techniques d'enrobés est proposée mais les résultats sont à considérer avec prudence. L'objectif est de montrer quelques tendances sans pour autant prétendre à une robustesse statistique forte.

Le détail de répartition des fiches par technique routière et par âge pour les différents taux d'AE est fourni ci-après (Figure 5 à Figure 18).

Tout d'abord, la répartition par technique est relativement précise pour les taux d'AE inférieurs à 40 % (Figures 5, 7, 8, 9 et 13). En revanche, pour les taux au-delà de cette valeur (Figure 14 et Figure 15), les techniques sont quasiment toutes regroupées sous l'étiquette « *BB recyclé* » sans qu'il soit possible de discriminer la formulation dans la base CARAT. Une analyse par technique est donc impossible pour les forts taux d'AE. Néanmoins, en considérant le nombre de fiches disponibles pour les BBSG, il est proposé de réaliser deux analyses dans la base CARAT, à savoir une analyse toutes techniques confondues et une analyse spécifique sur les BBSG avec utilisation d'un fuseau de référence construit uniquement sur les BBSG sans AE.

Ensuite, l'analyse de la répartition en âge (Figures 6, 10, 11, 12, 16, 17 et 18) montre une certaine homogénéité en termes d'âge moyen des échantillons contenant des AE à des taux supérieurs à 10 % avec des valeurs oscillant entre 2 et 3 ans. Concernant le fuseau de référence, l'âge moyen est de 3,3 ans avec un pic de valeurs entre 0 et 2 ans avec plus de 3600 fiches dans cette tranche d'âge soit environ 40 % de la base CARAT. Par ailleurs, la répartition des fiches par âge sur les taux compris entre 21 et 50 % montre une prédominance de chantiers de 1 à 2 ans qui matérialisent un intérêt récent pour les forts taux avec la réalisation de nombreux chantiers. Compte-tenu de ces éléments, il est acceptable de comparer le fuseau de référence aux autres fuseaux avec AE, leurs caractéristiques étant proches en âge.

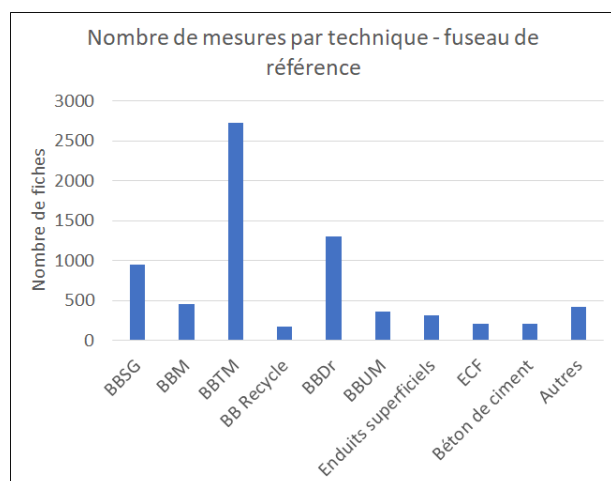


Figure 5 : Répartition par technique routière des fiches sans AE

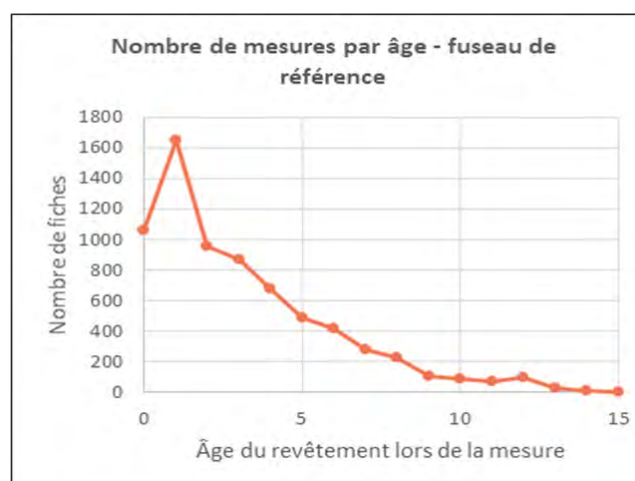


Figure 6 : Répartition par âge des fiches sans AE (âge moyen = 3,3 ans)

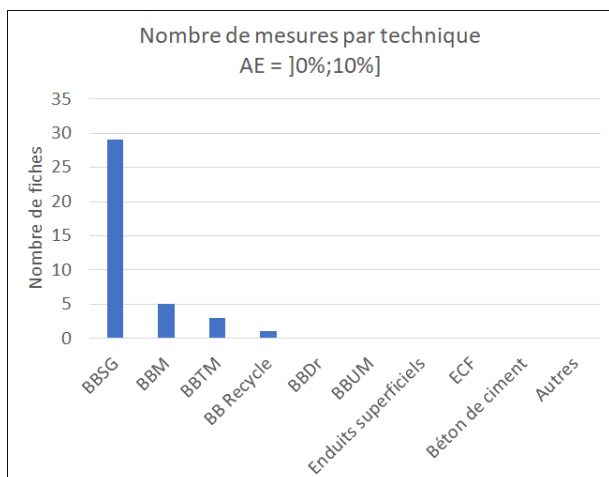


Figure 7 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 0 à 10 % (38 fiches)

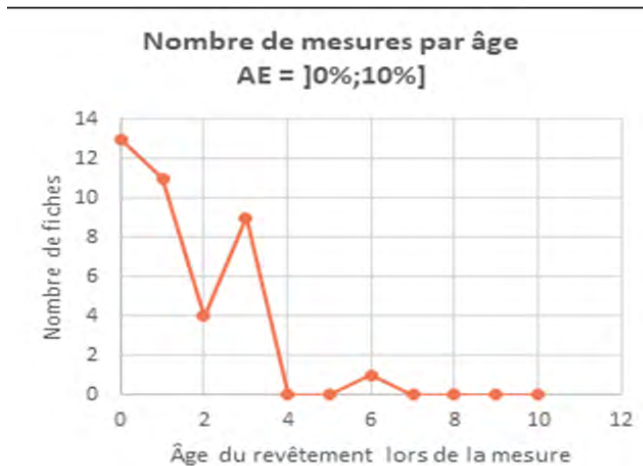


Figure 10 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 0 à 10 % (âge moyen = 1,4 ans)

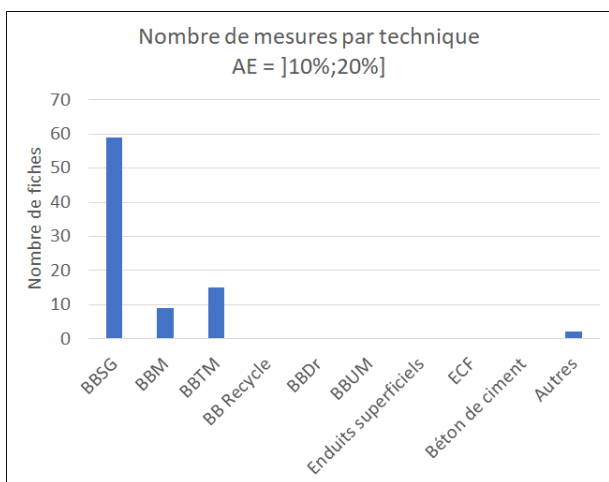


Figure 8 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 11 à 20 % (85 fiches)

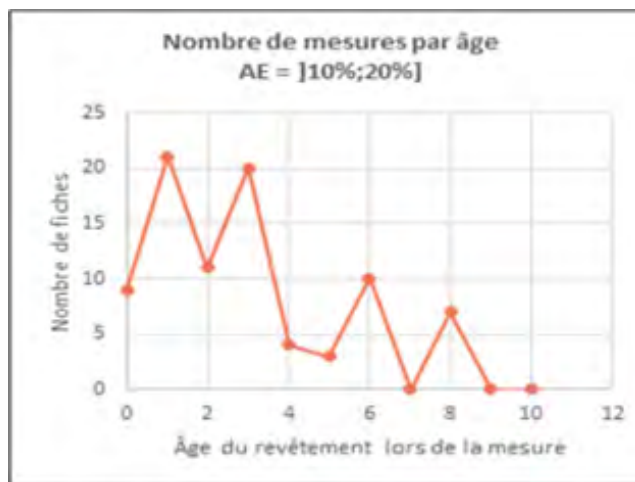


Figure 11 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 11 à 20 % (âge moyen = 2,9 ans)

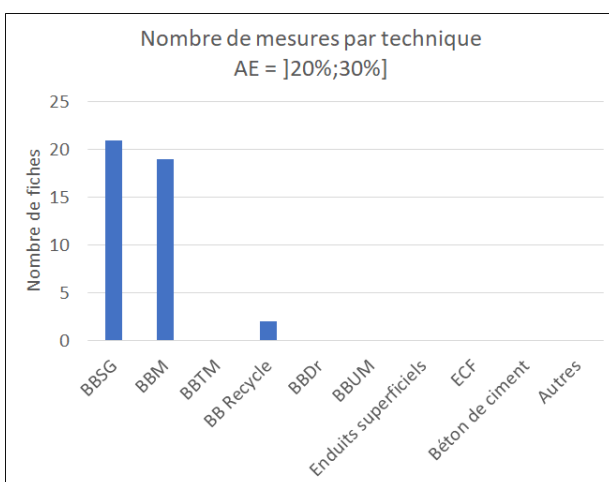


Figure 9 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 21 à 30 % (42 fiches)

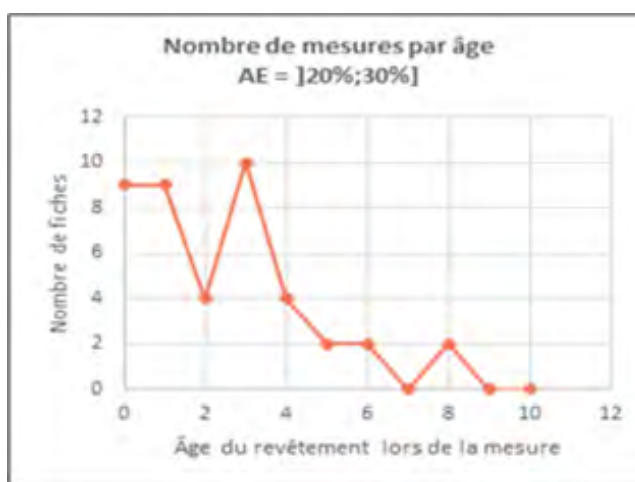


Figure 12 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 21 à 30 % (âge moyen = 2,4 ans)

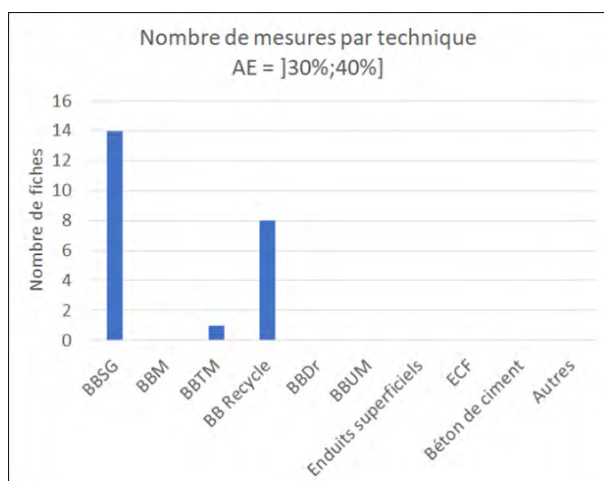


Figure 13 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 31 à 40 % (23 fiches)

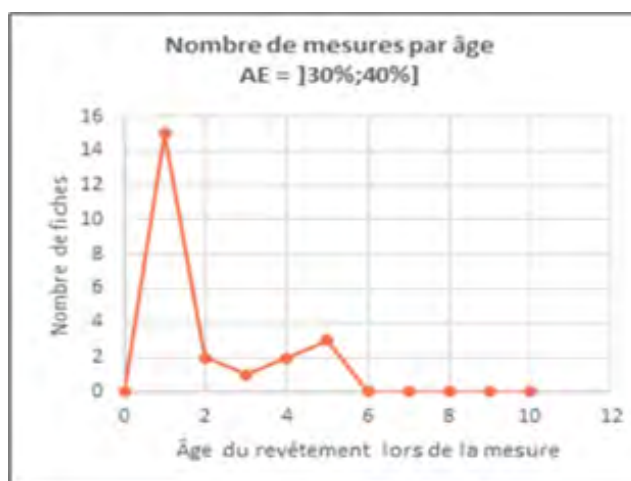


Figure 16 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 31 à 40 % (âge moyen = 2,0 ans)

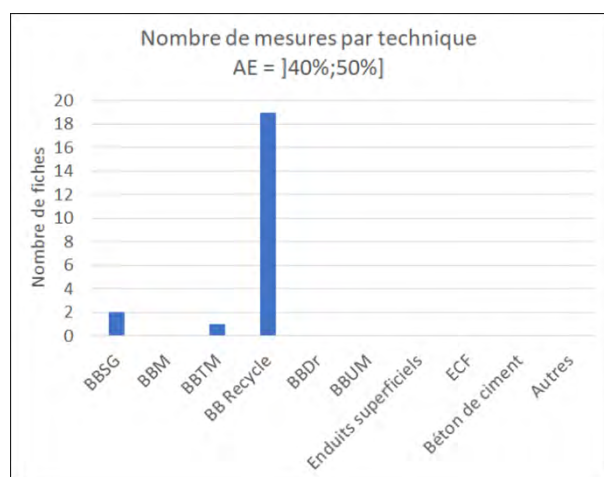


Figure 14 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 41 à 50 % (22 fiches)

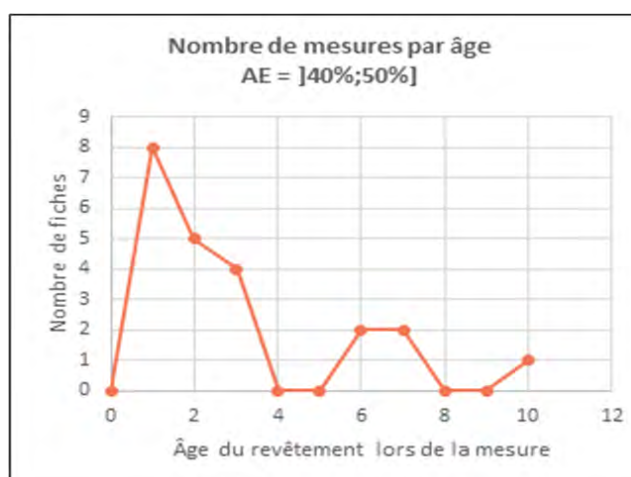


Figure 17 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 41 à 50 % (âge moyen = 3,0 ans)

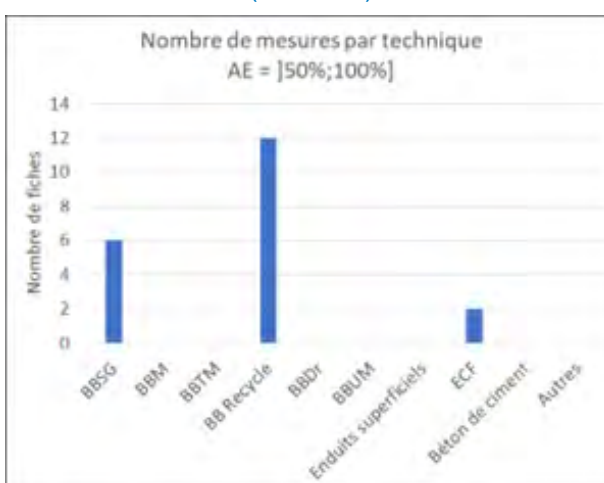


Figure 15 : Répartition par technique routière des fiches avec des taux d'AE allant de 51 à 100 % (20 fiches)

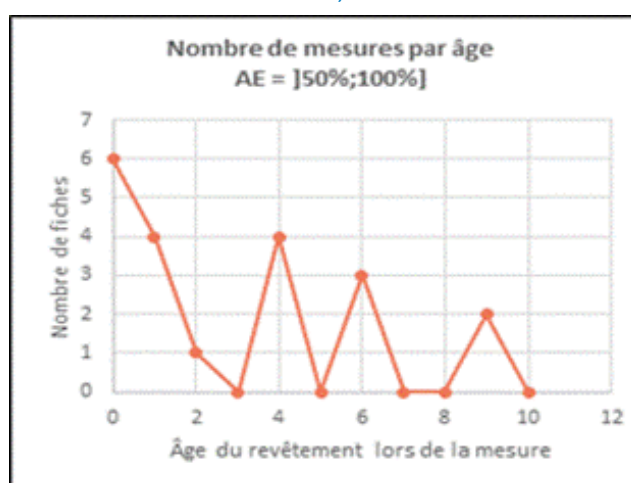


Figure 18 : Répartition par âge des fiches avec des taux d'AE allant de 51 à 100 % (âge moyen = 2,9 ans)

Une fois les différents échantillons caractérisés en âge et en formules, une comparaison des fuseaux de CFL a été réalisée (Figure 19 à Figure 24). Tout d'abord, quel que soit le taux d'AE, le CFL à basse vitesse (40 km/h) est égal voire légèrement meilleur que celui du fuseau de référence toutes techniques confondues.

Ensuite, pour les grandes vitesses (80 km/h et 120 km/h), le CFL est généralement moins élevé que la référence (1^{er} et 9^{ème} décile). Une analyse détaillée sur la formulation et l'âge permet néanmoins d'identifier quelques facteurs explicatifs :

- Pour les taux d'AE inférieurs ou égaux à 10 %, on note une sur-représentation des BBSG (29 fiches sur les 38 soit 76 % des données) par rapport à la référence « *tous revêtements* » (11 % des données en BBSG et 64 % des données correspondant à des BBTM/BBUM/BBDr). Or, la technique BBSG présente des niveaux de CFL plus modérés à haute vitesse compte-tenu des valeurs de macrotexture plus basses, ce qui peut expliquer des valeurs de CFL un peu plus faibles. De plus, le fuseau CARAT des techniques avec AE est plus large que celui de référence. En étudiant l'âge des revêtements, on constate que 13 fiches (soit 34 % des données) correspondent à des chantiers neufs et 24 fiches (63 % des données) à des chantiers qui ont entre 1 et 3 ans. Il semble donc que les chantiers dans cette catégorie présentent des niveaux de performances plus variables sans que l'âge puisse être véritablement un facteur explicatif. Il faut également prendre en compte la taille réduite de l'échantillon (29 chantiers) qui fait que toute performance un peu en-deçà de ce qui est attendu devient très visible.
- Pour les taux d'AE de 11 à 20 %, une sur-représentation de la technique BBSG (59/85 fiches soit 69 % des données) est observée par rapport au fuseau de référence qui contient majoritairement des techniques ayant de bonnes performances en CFL à 80 et 120 km/h (BBTM/BBUM/BBDr). Comme pour la gamme d'AE précédente, le fuseau CARAT des techniques avec AE est plus large que la référence « *tous revêtements* ». En analysant l'âge des revêtements, 28 % des données (24/85 fiches) correspondent à des chantiers entre 4 et 8 ans. Ainsi, la variation dans les valeurs de CFL pourrait en partie s'expliquer par l'âge variable des revêtements considérés dans l'analyse.
- Pour les taux d'AE de 21 à 30 %, 50 % des fiches correspondent à des BBSG (21/42 fiches) et 45 % à des BBM (19/42 fiches). De plus, en analysant l'âge des revêtements, 76 % des fiches correspondent à des chantiers de moins de 3 ans, ce qui pourrait en partie expliquer l'homogénéité du fuseau de CFL.
- Pour les taux d'AE de 31 à 40 %, une sur-représentation de la technique BBSG (14/23 fiches soit 60 % des données) est également observée par rapport à la référence ce qui explique les performances plus modérées à 80 et 120 km/h. Par ailleurs, 65 % des chantiers ont un an (15/23 fiches) et tous les chantiers ont moins de 5 ans.
- Pour les taux d'AE de 41 à 50 %, le fuseau CARAT est assez proche de celui de référence. Les calculs sont réalisés sur 22 fiches mais il n'est pas possible de connaître la répartition par type de technique routière (Figure 10). Par ailleurs, en analysant l'âge des revêtements, 77 % des fiches (17/22 fiches) correspondent à des chantiers récents (1 à 3 ans). Cet ensemble de chantiers ayant des performances satisfaisantes et homogènes en CFL, il serait intéressant de poursuivre leur surveillance dans les prochaines années.
- Pour les taux d'AE de 51 à 100 %, le fuseau CARAT est plus bas que celui de référence. Les calculs sont réalisés sur 20 fiches mais il n'est pas possible de connaître la répartition par type de technique routière (Figure 11). En revanche, en analysant l'âge des revêtements, on peut observer que l'âge des chantiers s'étale sur 9 ans (Figure 18) avec 50 % des chantiers de moins de 1 an (10/20 fiches) et le reste est réparti entre 4 et 9 ans. Cette disparité dans l'âge couplé à un échantillon de taille limitée pourrait expliquer la largeur du fuseau CARAT pour ces taux d'AE.

Compte-tenu de ces éléments d'analyse, la technique BBSG semble influencer fortement les fuseaux avec les différents taux d'AE. Il est donc proposé de réaliser une 2^{ème} analyse en se focalisant uniquement sur cette technique et en constituant un fuseau de référence BBSG sans AE3.

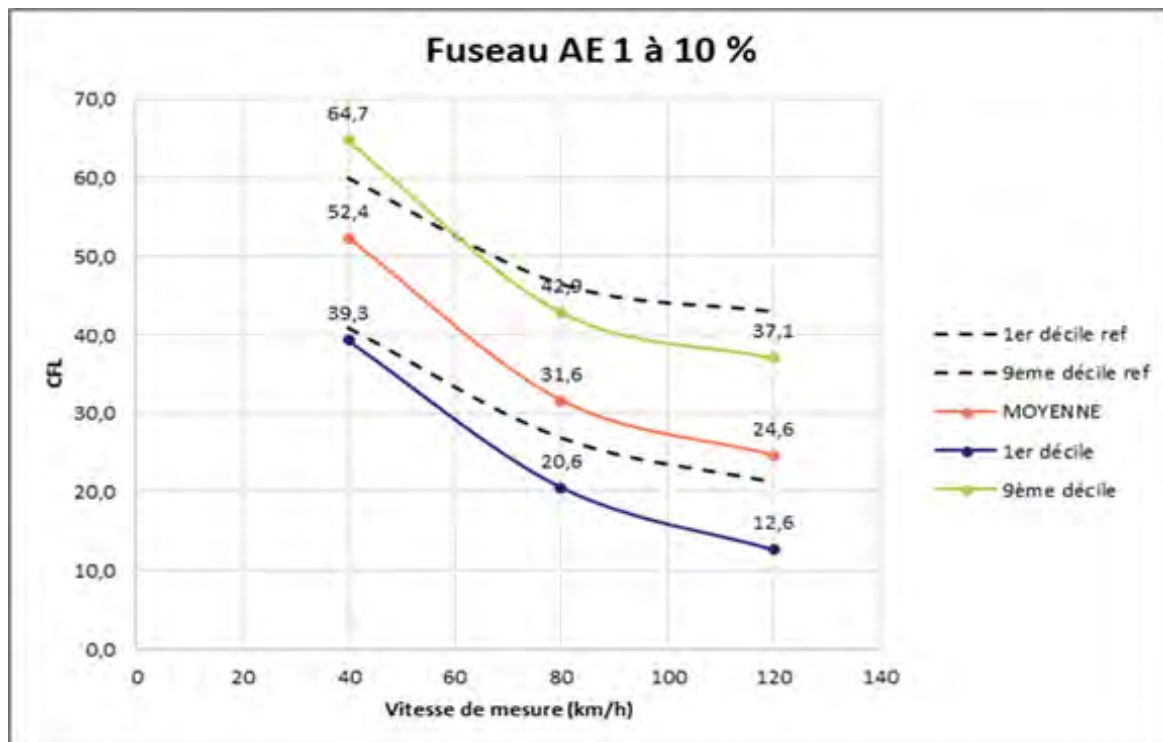


Figure 19 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 0 à 10 % d'AE (38 fiches)

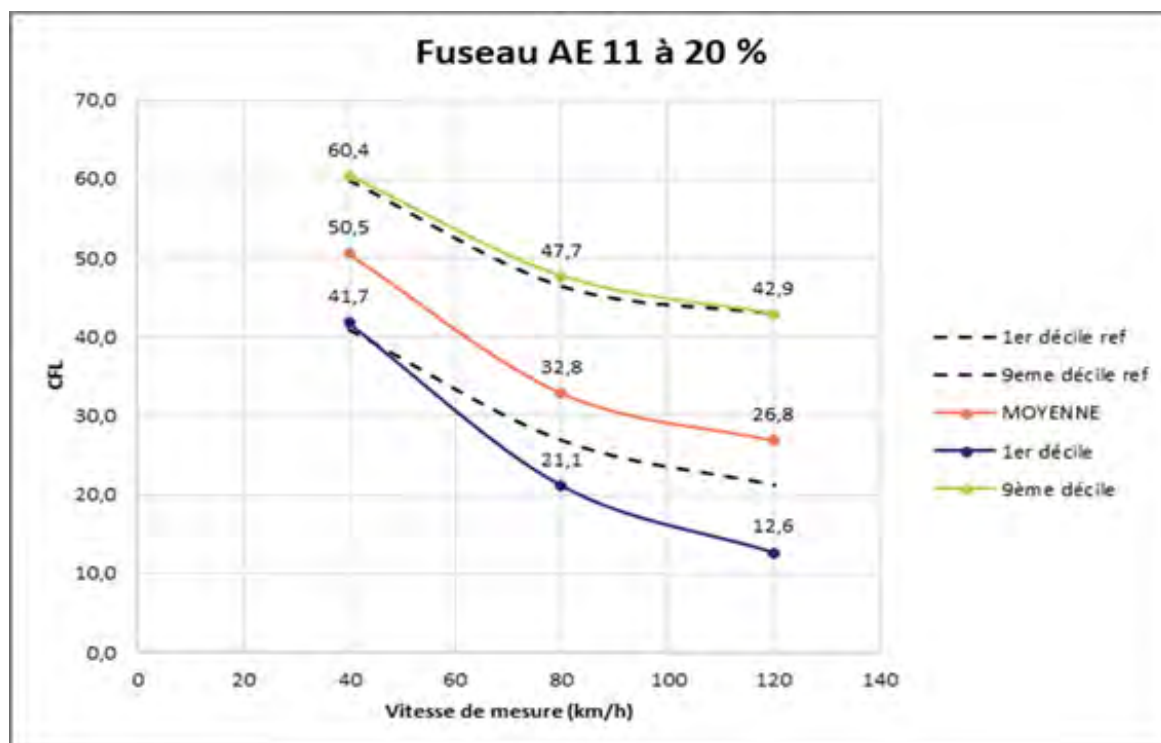


Figure 20 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 11 à 20 % d'AE (85 fiches)

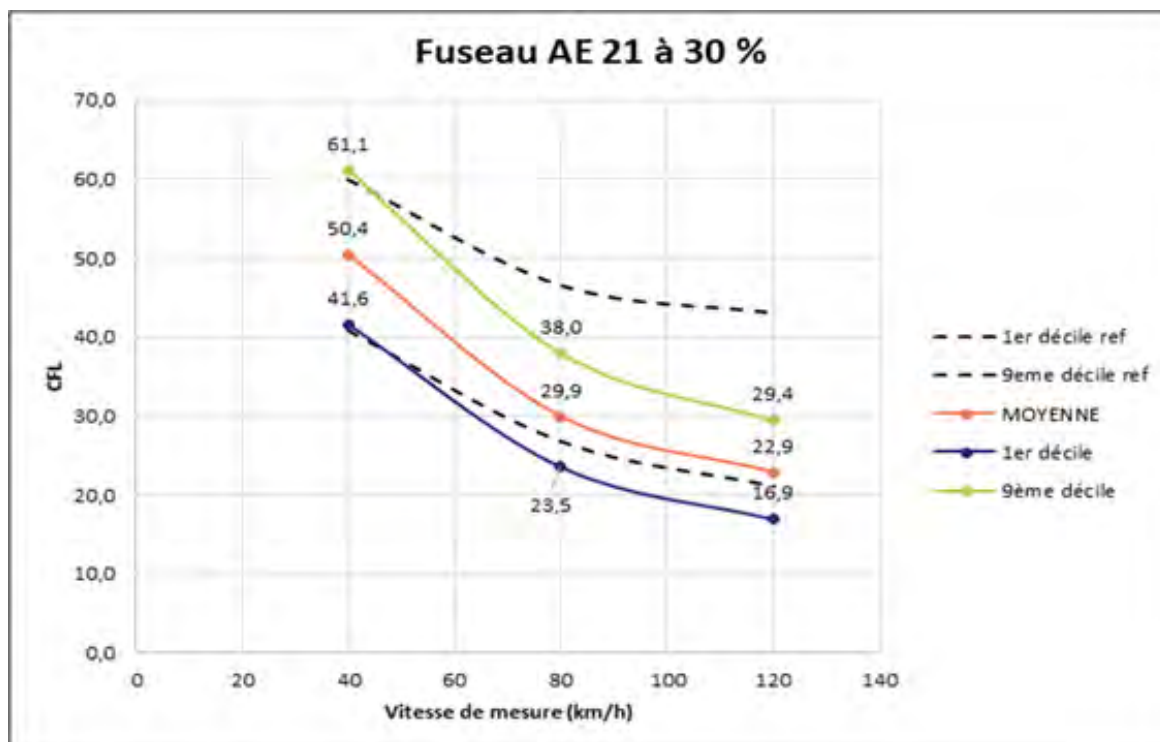


Figure 21 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 21 à 30 % d'AE (42 fiches)

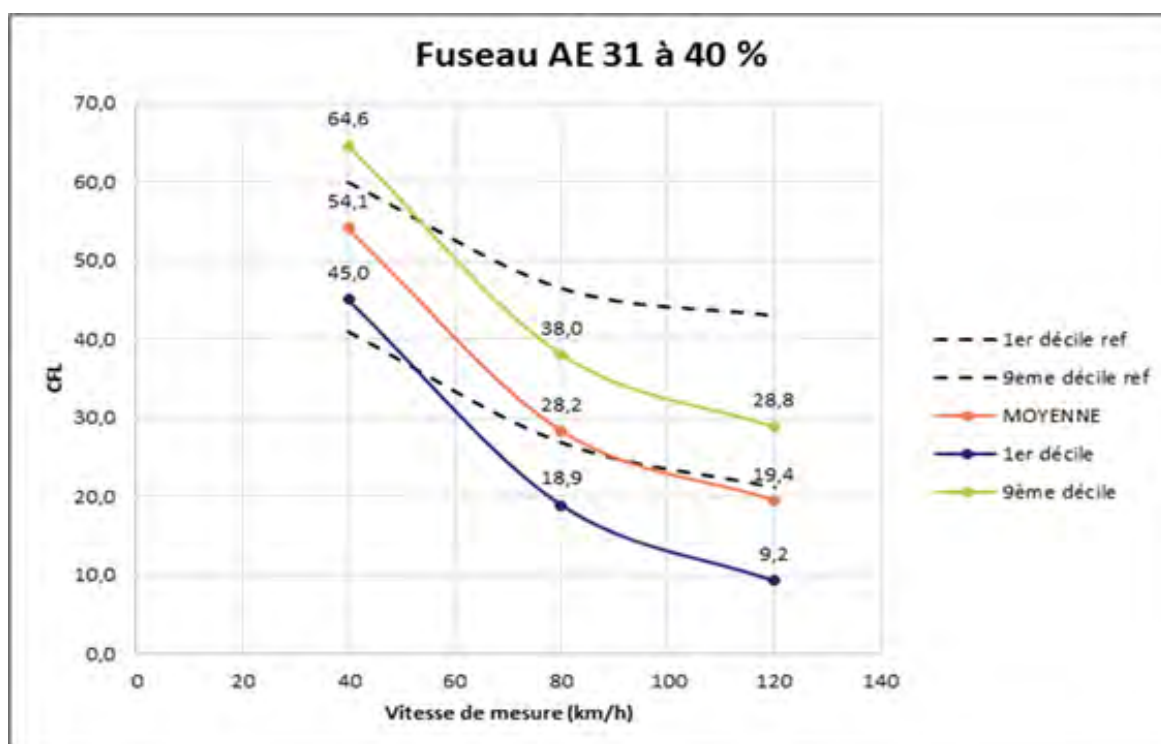


Figure 22 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 31 à 40 % d'AE (23 fiches)

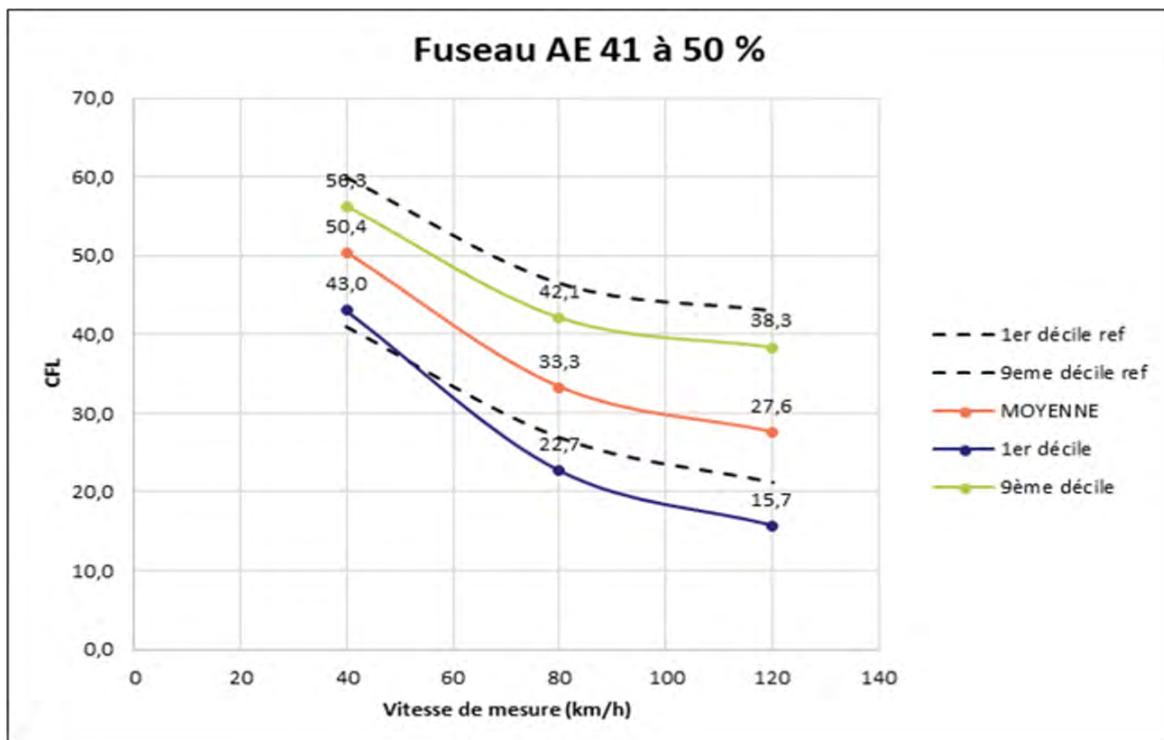


Figure 23 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 41 à 50 % d'AE (22 fiches)

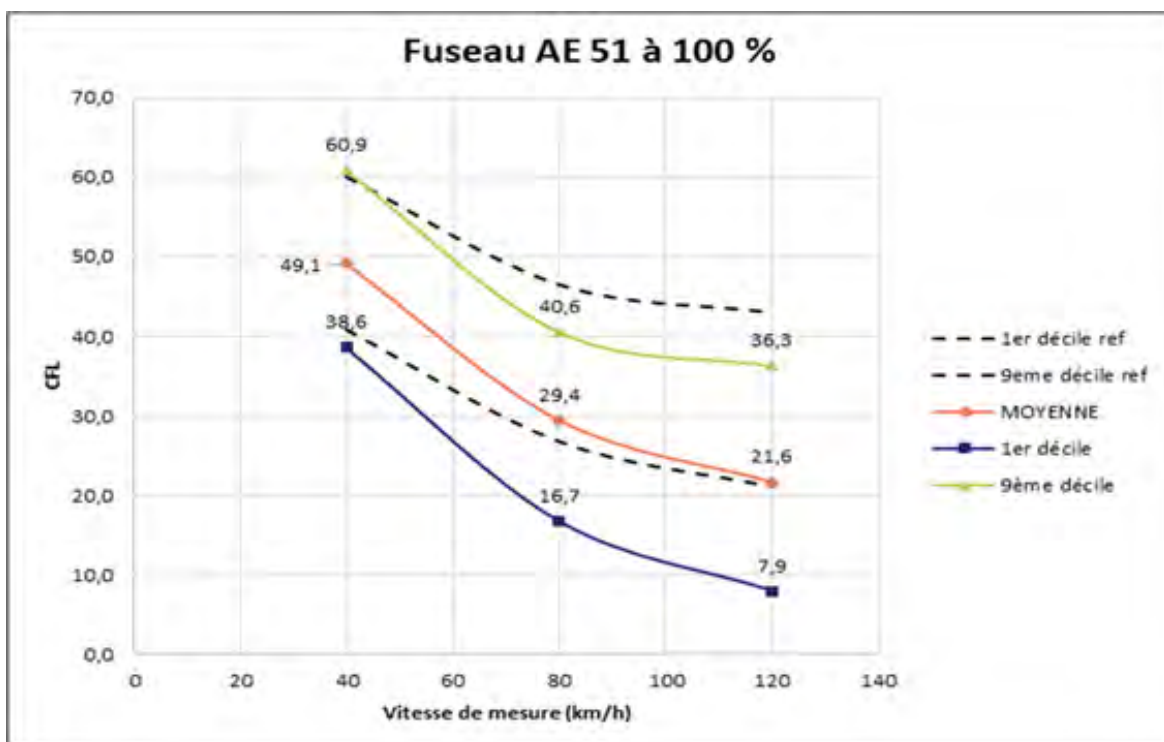


Figure 24 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 51 à 100 % d'AE (20 fiches)

3. Impact du taux d'AE sur le coefficient de frottement longitudinal (CFL) – cas spécifique des BBSG

Une comparaison de l'effet de différents taux d'AE sur le comportement des BBSG a donc été réalisée. Les principales conclusions de cette analyse sont résumées ci-dessous :

- Pour les taux compris entre 0 et 20 %, les fuseaux sont confondus avec le fuseau de référence BBSG sans AE. L'introduction d'AE jusqu'à 20 % n'a donc pas d'effet a priori sur les performances d'adhérence.
- Pour les taux d'AE compris entre 21 et 30 %, le fuseau est plus étroit que le fuseau de référence sans AE ce qui traduit d'une part une homogénéité des performances d'adhérence pour les chantiers réalisés avec ces taux d'AE et d'autre part le fait que ces taux d'AE permettent de maintenir voire d'améliorer légèrement les performances d'adhérence des BBSG.
- Pour les taux d'AE compris entre 31 et 40 %, le CFL à 40 km/h est équivalent voire amélioré par rapport au fuseau de référence BBSG sans AE. Le CFL à faible vitesse étant fortement influencé par la microtexture des revêtements, il est probable que ce constat traduise les conséquences d'une usure différentielle des granulats qui recrée de la microtexture et donc améliore les performances d'adhérence [Ref.6 – Ref.9]. Le CFL à 80 km/h semble baisser légèrement avec ces taux d'AE mais le fuseau reste dans celui de référence. A 120 km/h, la légère baisse semble se confirmer et le 1^{er} décile du fuseau avec AE est inférieur au 1^{er} décile du fuseau de référence de 5 points environ. En conclusion, l'introduction d'AE avec des taux compris entre 31 et 40 %, ne semble pas dégrader particulièrement le CFL et elle semble même améliorer les performances à basse vitesse. Ces résultats nécessitent d'être confirmés par des mesures complémentaires.
- Enfin, pour les taux d'AE supérieurs ou égaux à 41 %, il n'est pas possible d'établir des fuseaux compte-tenu du nombre de fiches concernées (8). Il peut être noté simplement que la moyenne des valeurs de CFL sur ces quelques fiches se situe dans la moitié supérieure du fuseau de référence BBSG sans AE. Par ailleurs, les 6 chantiers pour des taux d'AE supérieurs ou égaux à 51 % correspondent à une classe moyenne de trafic cumulé C2. Ces sections ont donc été moins polies par le trafic. Il faudrait donc ajouter des données afin d'avoir un échantillon statistiquement représentatif et intégrer des chantiers avec des classes de trafic supérieures afin de mieux évaluer les performances à long terme des revêtements contenant ces forts taux.

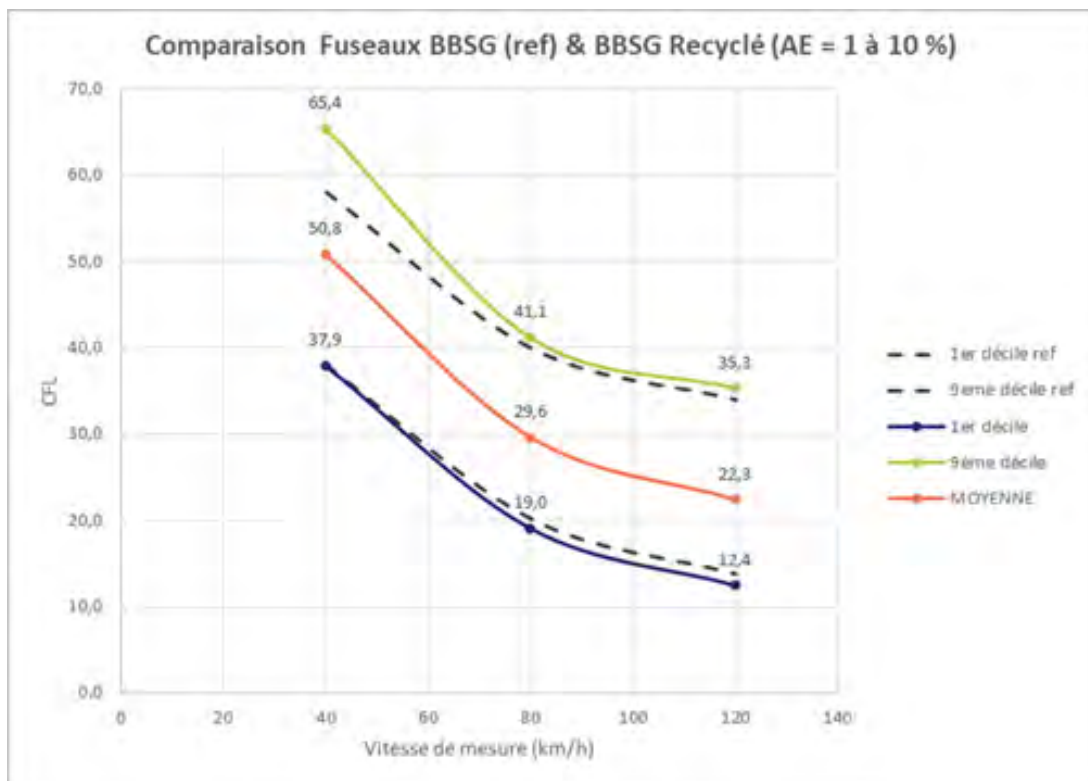


Figure 25 : Comparaison des fuseaux de référence BBSG sans AE et avec 0 à 10 % d'AE (28 fiches)

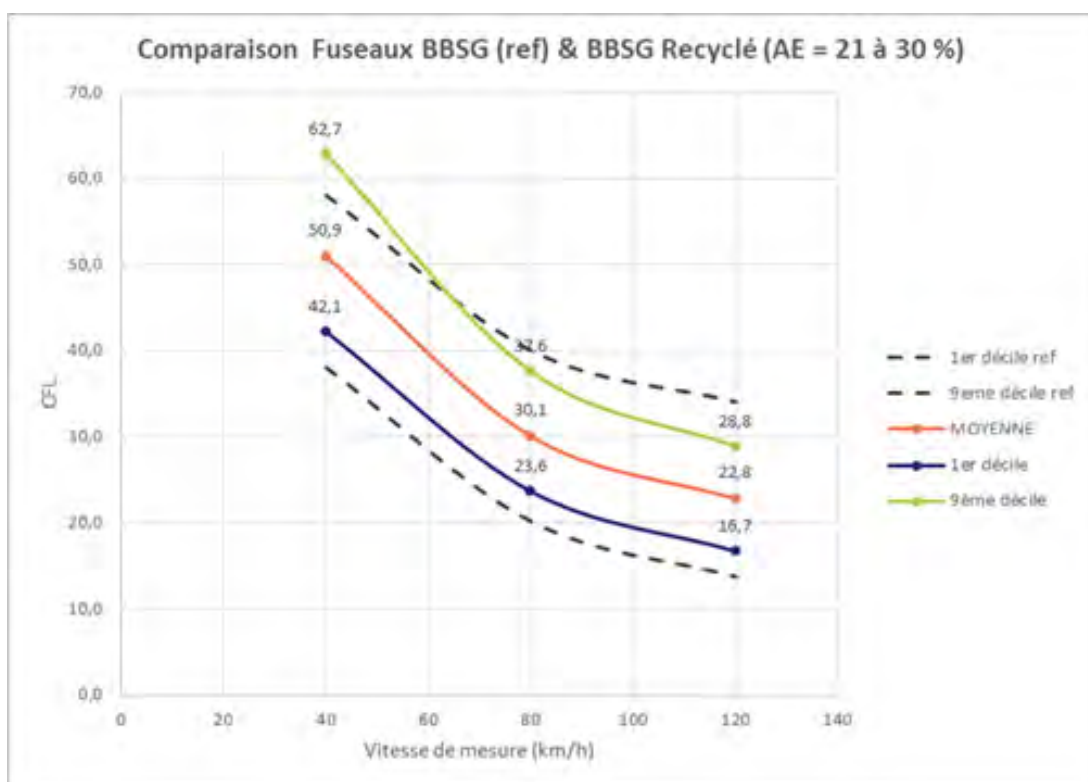


Figure 27 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 21 à 30 % d'AE (21 fiches)

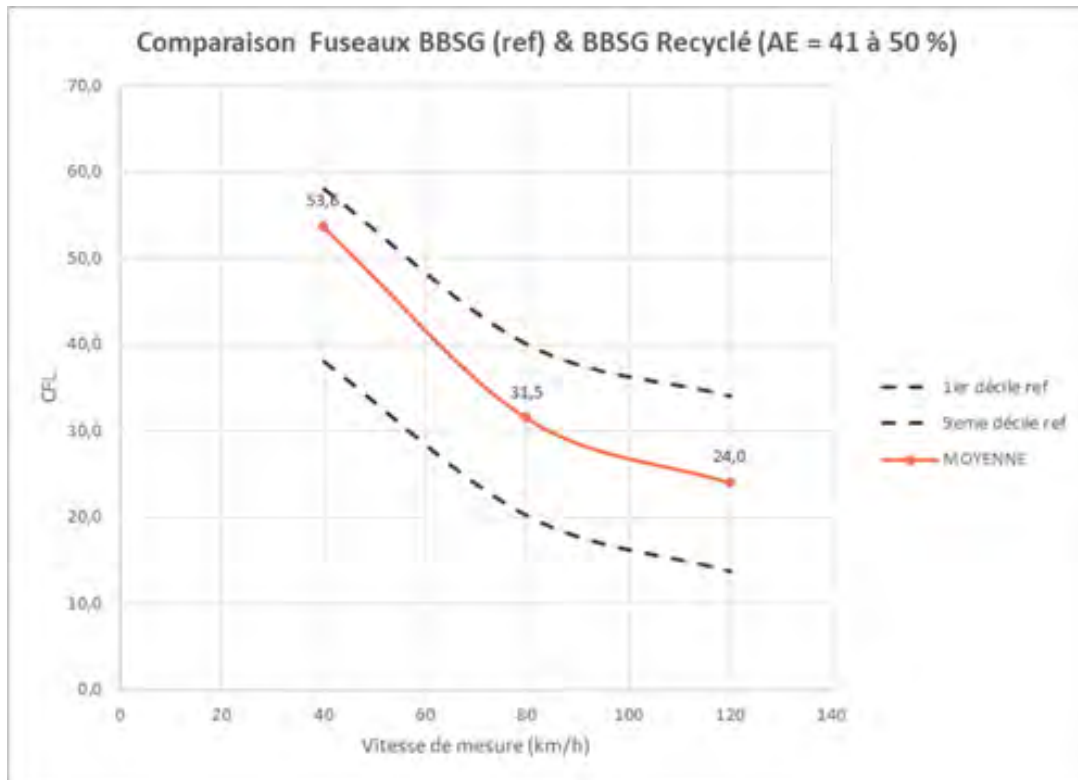


Figure 29 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 41 à 50 % d'AE (2 fiches)

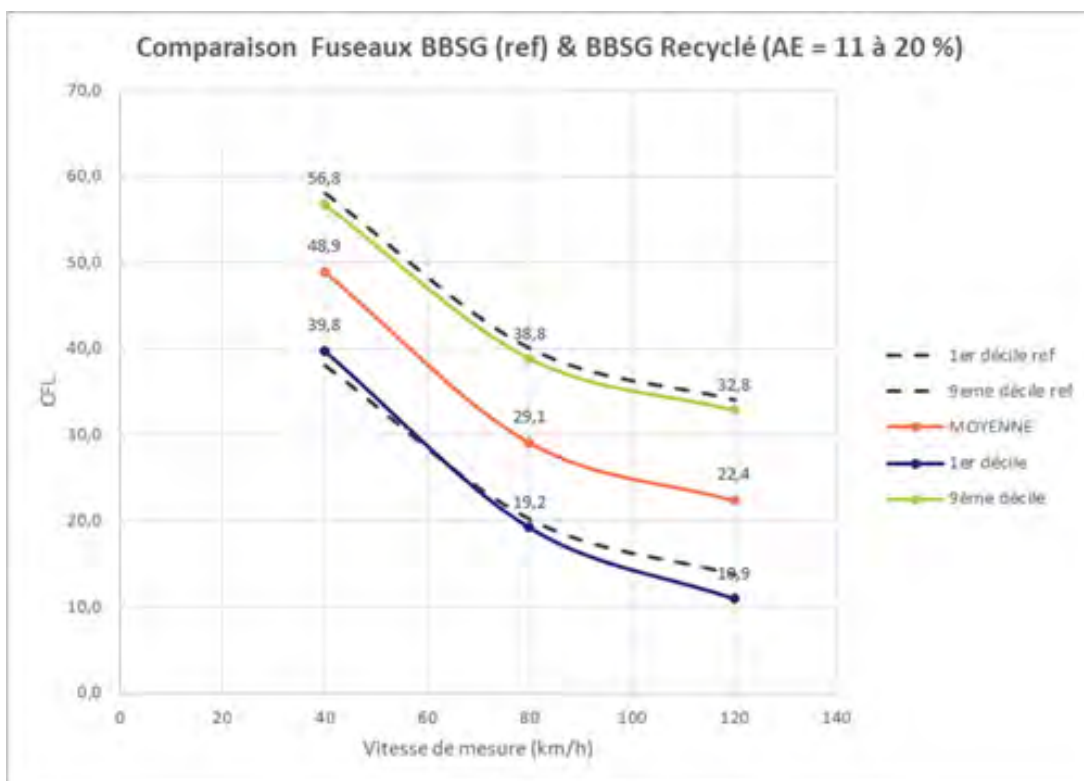


Figure 26 : Comparaison des fuseaux de référence BBSG sans AE et avec 11 à 20 % d'AE (59 fiches)

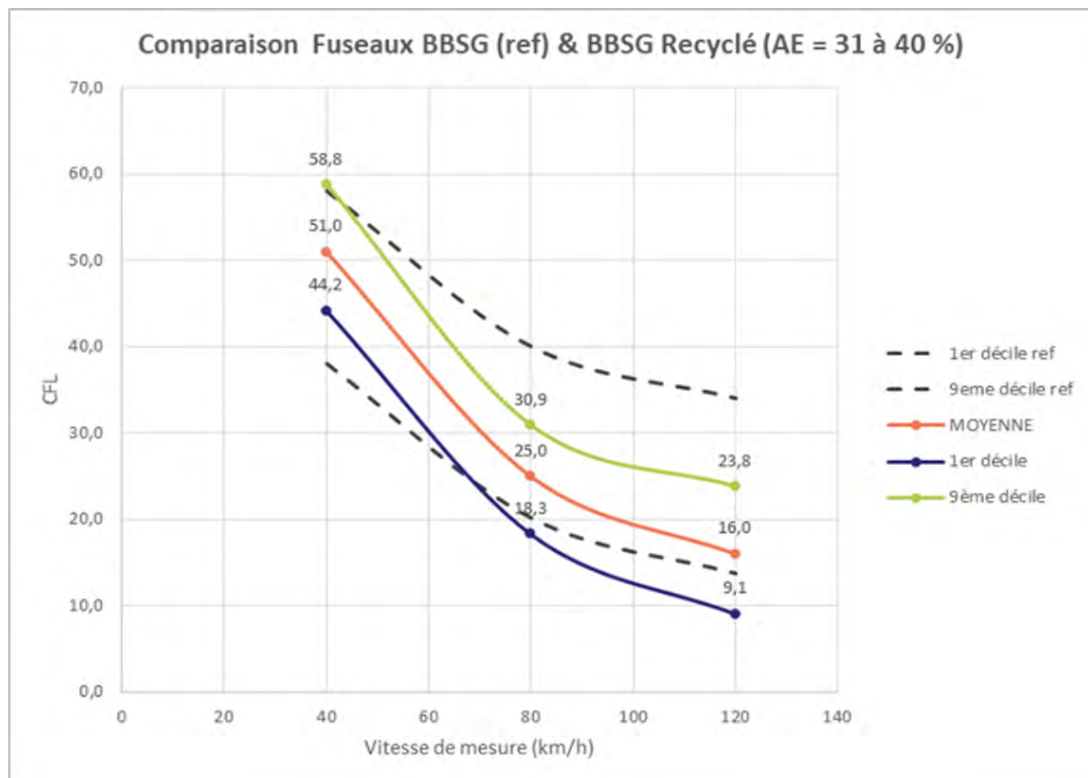


Figure 28 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 31 à 40 % d'AE (14 fiches)

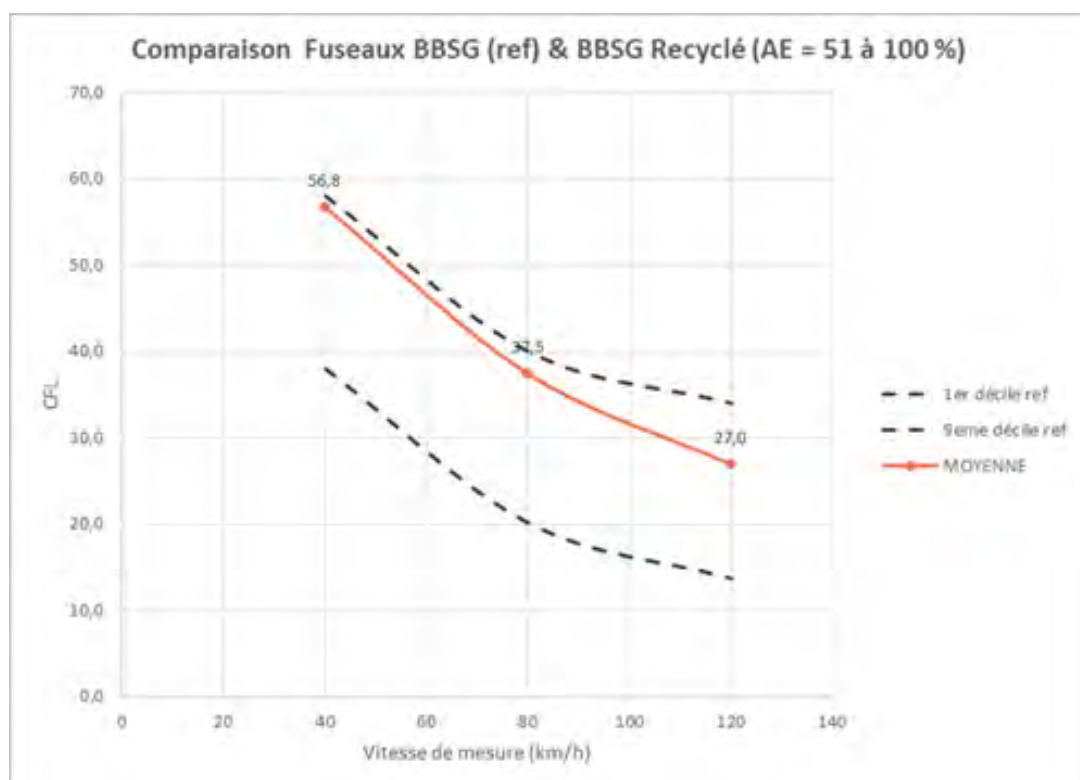


Figure 30 : Comparaison des fuseaux de référence sans AE et avec 51 à 100 % d'AE (6 fiches)

II. Caractéristiques de la recherche documentaire

1. Origine des documents

Parmi les vingt-neuf documents ayant fait l'objet d'une fiche de lecture, on trouve :

- 15 articles de revues académiques ;
- 5 articles de revues techniques type RGRA ;
- 4 articles de congrès scientifiques internationaux ;
- 5 rapports techniques.

Cette variété dans l'origine des sources montre l'intérêt du sujet pour l'ensemble de la communauté routière, une diffusion assez large des résultats et un niveau de maturité variable des travaux.

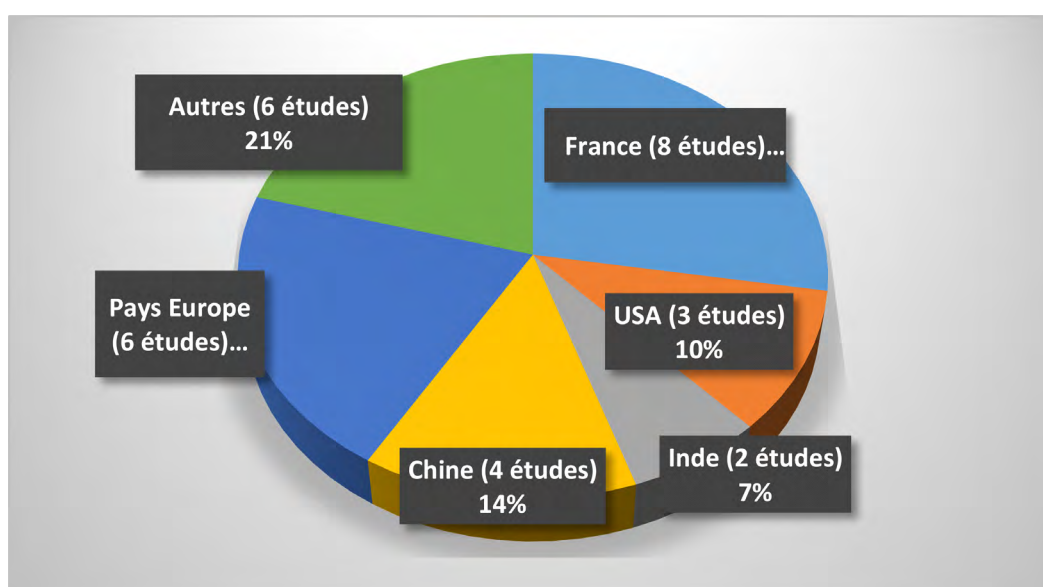


Figure 31 : Répartition des documents par origine géographique

L'analyse documentaire n'a pas été limitée en termes d'origine géographique, l'objectif étant d'avoir une idée assez large des travaux menés tout en étant conscient que tous les résultats ne seraient pas transposables au cas du territoire français compte-tenu notamment des différences sur les méthodes de formulation, sur les matériaux et sur les formulations elles-mêmes selon le pays d'origine. On peut cependant noter que la Chine, les USA et les pays européens dont la France sont les principaux auteurs de ces travaux (Figure 31).

Concernant la date de publication des travaux, 41 % des documents ont été publiés entre 1995 et 2014, période de prise en compte croissante des questions d'impact environnemental des infrastructures routières avec un net pic de publications entre 2012 et 2014. On observe ensuite un tassement des publications de résultats et une reprise depuis 2021, ce qui traduit un regain d'intérêt récent pour cette question (Figure 32).

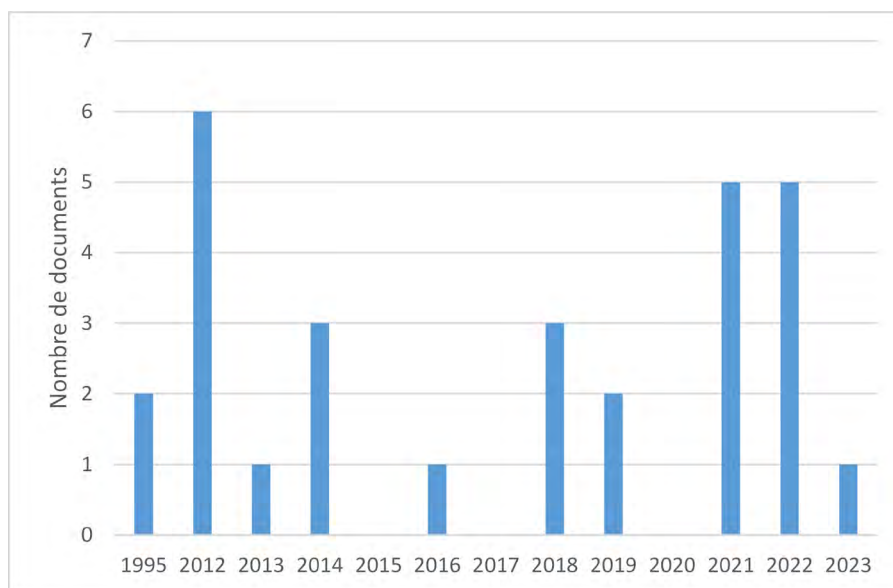


Figure 32 : Répartition des documents par date de publication

2. Nature des travaux et études

En analysant la nature des travaux, on note que plus de la moitié des documents traite d'expérimentations menées en laboratoire. Seules 7 % des études portent à la fois sur des études de laboratoire et leur traduction sur la route. Néanmoins, une dizaine d'études dédiées à des chantiers routiers réels a pu être étudiée (Figure 33).

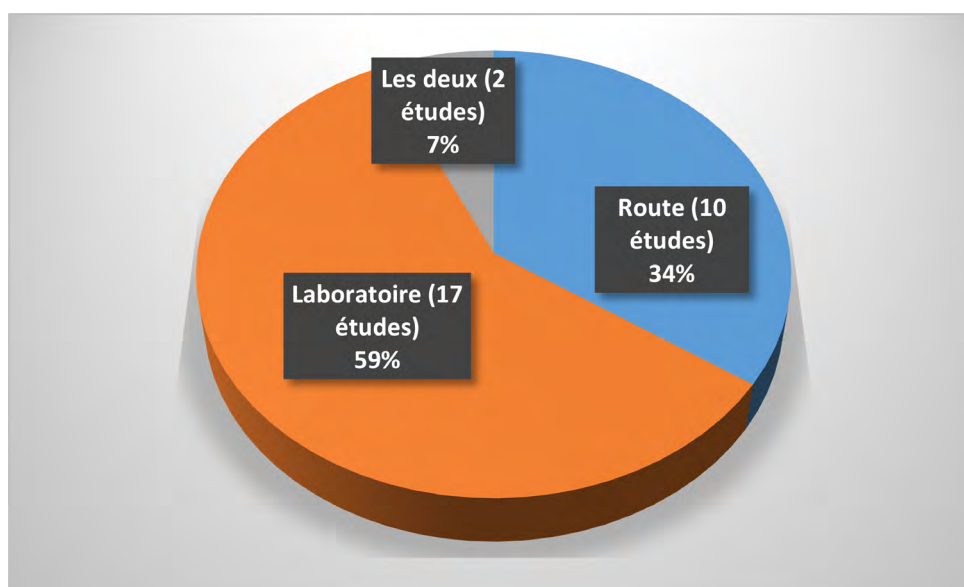


Figure 33 : Répartition des documents par type d'études

Par ailleurs, neuf études sur les vingt-neuf n'ont abordé que les résultats d'essais mécaniques et n'ont pas fait état de résultats de mesure d'adhérence [FL1, FL2, FL5, FL12, FL14, FL15, FL17, FL21, FL25]. Cependant, quatre de ces études concernent des chantiers sur routes réelles et on peut raisonnablement supposer que si des désordres avaient été constatés en matière de caractéristiques de surface, les sections routières n'auraient pas été conservées et n'auraient pas fait l'objet de publicité [FL1, FL5, FL14, FL15].

Dans les autres études, onze fournissent des données de coefficient de frottement pour différents taux d'AE, quatre fournissent des données de macrotexture uniquement et cinq proposent des données de frottement et de macrotexture.

En regardant les taux d'agrégats d'enrobé maximaux testés, on observe que 65 % des études sélectionnées traitent de taux d'AE strictement supérieurs à 30 % et plus de 40 % des études concernent des taux d'AE strictement supérieurs à 50 % (Figure 34).

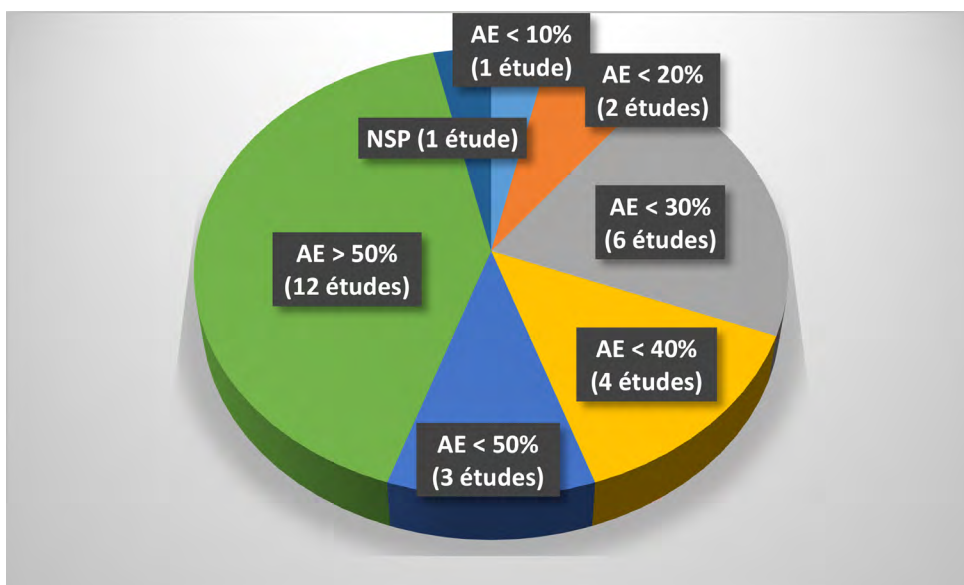


Figure 34 : Répartition des documents par valeur maximale de taux d'AE testés

III. Lien entre taux d'AE et performances d'adhérence

Les principaux enseignements que l'on peut tirer des études sont résumés ci-après. La synthèse est présentée en séparant les résultats en trois catégories selon le taux d'incorporation d'AE : $\leq 30\%$, 30 à 50% , $> 50\%$.

1. Faibles taux d'AE ($\leq 30\%$)

Dans les cas des taux AE $\leq 30\%$ [FL3, FL7, FL8, FL13, FL14, FL16, FL17, FL18, FL26, FL28], on observe soit un maintien soit une légère baisse des performances d'adhérence (en frottement et/ou en macrotexture) mais rien qui ne soit véritablement notable. Les évaluations de l'adhérence sont généralement réalisées à l'aide du pendule SRT [Ref.10] ou du DFT [Ref.11]. On note que toutes ces études sauf une étude française concernant des enrobés bitumineux à chaud et que l'abaissement des températures (enrobés tièdes ou émulsions) n'entre pas dans le cadre de ces travaux sur le recyclage des enrobés.

Par ailleurs, la moitié des études concerne le suivi de l'adhérence d'enrobés mis en œuvre sur route [FL3, FL8, FL14, FL16] ou piste aéroportuaire [FL13], le reste concernant des études sur éprouvettes réalisées uniquement en laboratoire.

En revanche, [FL16] observe en Chine que le taux AE de 30% doit être réservé à des trafics moyens ou faibles pour éviter une dégradation importante des performances. Par ailleurs, ces résultats ont été obtenus en laboratoire mais également sur route et piste aéroportuaire.

2. Taux d'AE intermédiaires (30 à 50%)

Lorsque le taux d'AE augmente entre 30 et 50% , on note que le rôle des matériaux devient de plus en plus important que ce soit pour les aspects purement mécaniques [FL1, FL12, FL15 et FL21] ou d'adhérence [FL6, FL9, FL10].

Lorsque le PSV des granulats issus des AE est faible ($PSV \approx 40$) l'effet de l'introduction d'AE sur les valeurs de frottement est immédiatement visible avec une baisse non négligeable des valeurs de frottement alors qu'un PSV élevé des granulats issus des AE ($PSV \approx 60$) permet de conserver les propriétés d'adhérence y compris à des taux élevés. Ceci s'observe en laboratoire [FL9, FL10] et sur route [FL6]. Cette dégradation des performances d'adhérence pourrait s'expliquer par une usure différentielle entre les granulats issus des AE et les granulats d'apport au fur et à mesure du polissage. En effet, les AE ayant déjà subi des phénomènes d'usure (polissage, abrasion), seraient plus sensibles aux sollicitations mécaniques que les granulats d'apport et ils perdraient plus de matière en surface que les matériaux neufs pour un même niveau de contrainte de cisaillement à l'interface pneu/chaussée. Ce phénomène pourrait être assimilé à ce qui a été observé dans des travaux antérieurs sur des mélanges de granulats présentant des propriétés minéralogiques différentes ce qui induit une résistance à l'usure variable [Ref.5 – Ref.9].

Par ailleurs, la connaissance du stock d'AE (et notamment de son homogénéité) est également mise en avant pour garantir de bonnes performances d'adhérence.

À titre d'exemple, les travaux menés aux USA montrent une baisse du coefficient de frottement mesuré à 60 km/h (F60) avec le taux d'incorporation d'AE pour deux techniques différentes d'enrobé (Figure 35). On note ainsi un effet de « bascule » (i.e. baisse importante de l'adhérence) entre 20 et 30% d'AE selon la qualité des AE [FL6].

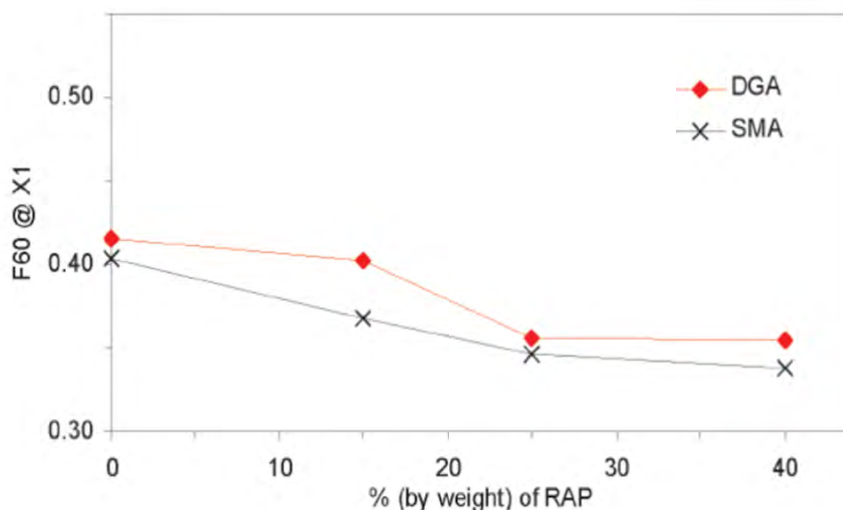


Figure 35 : Évolution du coefficient de frottement mesuré in-situ F60 en fonction du taux d'AE [FL6]

Ces constats sont cohérents avec l'état des connaissances actuelles et les recommandations du guide « *Recyclage des agrégats d'enrobés dans les mélanges bitumineux à chaud, Etat de l'art et recommandations* » [Ref.10].

3. Forts taux d'AE (> 50 %)

Plusieurs études récentes concernant les taux d'AE supérieurs à 50 % ont été trouvés dans la littérature [FL11, FL19, FL20, FL22, FL23, FL24, FL27 et FL29]. Sur ces huit études, cinq rapportent des résultats de travaux menés uniquement en laboratoire et trois concernent des travaux réalisés à la fois en laboratoire et sur route [FL23, FL24 et FL29]. Ces chantiers datent respectivement de 2018 et 2021, ce qui confirme les progrès récents en matière de fabrication d'enrobés à forts taux d'AE et l'intérêt pour le développement de ce type de technique.

Le premier constat est que l'incorporation d'AE à des taux supérieurs à 50 % permet d'obtenir des enrobés respectant les obligations en termes de macrotexture (i.e. maîtrise des formulations et de leur mise en œuvre) avec des niveaux de performances d'adhérence qui restent corrects au regard des besoins en adhérence au fur et à mesure du polissage par le trafic. [FL27], par exemple, a étudié en laboratoire l'évolution des performances de frottement sous l'effet du polissage réalisé avec la machine TWPD pour des mélanges contenant 50 et 100 % d'AE (PSV = 52) avec un granulat d'apport de PSV 54. Les mesures de frottement réalisées avec le DFT ont montré une baisse modérée des niveaux de frottement avec le polissage sur les différentes formulations testées (Figure 36). Les valeurs de DFT20 (frottement à 20 km/h) montrent un niveau initial autour de 0,70 (ce qui est observé sur des enrobés hautes performances neuf) et final de 0,30 (ce qui correspond plutôt à un BBSG ou un BBDr d'une dizaine d'années) pour le mélange de référence (0 % d'AE). Pour les mélanges à 50 % d'AE, les valeurs de DFT20 varient de 0,40-0,60 (ce qui est plutôt mesuré sur des BBTM ou des SMA) à 0,20-0,25 en fin d'essai. Pour le mélange à 100 % d'AE, les valeurs de DFT20 varient de 0,35-0,40 à 0,20-0,25. Ainsi, on observe que les forts taux d'AE induisent un niveau initial de DFT20 plus faible que pour un mélange sans AE mais que l'écart de performances entre les formules avec et sans AE se réduit fortement au-delà de 10 000 cycles de polissage. Quelques éléments d'appréciation complémentaires sont fournis à la section 5.2 qui traite spécifiquement de l'effet du polissage.

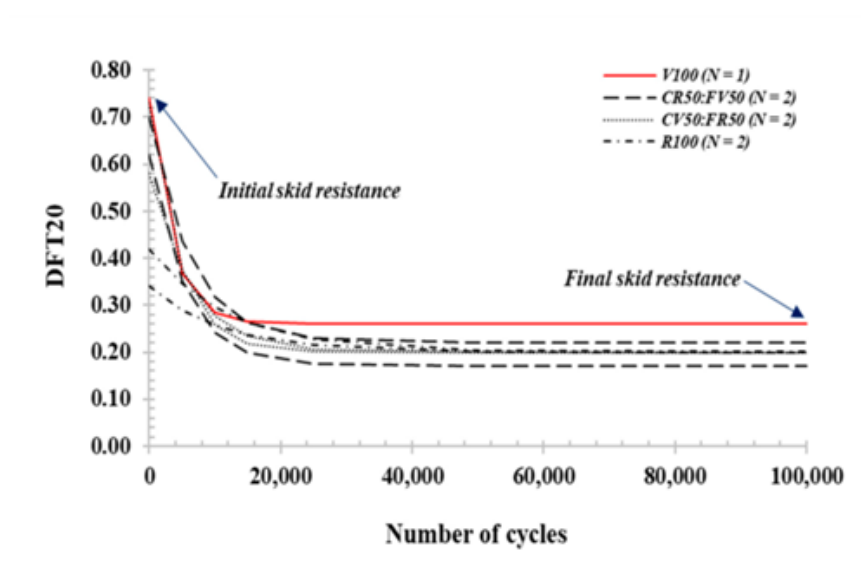


Figure 36 : Évolution du coefficient de frottement avec le polissage pour des formules sans AE (V100), avec 50 % d'AE (CR50-FV50, CV50-FR50) et 100 % d'AE (R100) [FL27]

Dans certains cas, des ajouts de laitiers ont été réalisés. Ces ajouts permettent de compenser les très forts taux d'AE [FL20, FL22]. [FL20] a ainsi déterminé des taux de laitiers optimaux en fonction du taux d'AE. Il recommande d'utiliser 15 % de laitier pour les enrobés avec 60 % d'AE et 7,5 % de laitier avec 70 % d'AE. Cet ajout de laitier n'a pas d'impact négatif sur la résistance à la fatigue ou la macrotexture. En revanche, il améliore la tenue à l'eau des enrobés avec fort taux d'AE.

Un point d'attention à relever sur les enrobés à forts taux présentés dans la littérature étrangère concerne la macrotexture. Elle peut parfois s'avérer assez ouverte ($PMT > 1,3$ mm) et ne correspond pas aux enrobés utilisés en France. [FL10] utilise, par exemple, un enrobé bitumineux avec un D_{max} égal à 12,5 mm ce qui est fréquent en Grèce. [FL22] présente un D_{max} de 16 mm pour des valeurs de macrotexture variant de 0,8 à 1,0 mm. Dans le cas du PN MURE et d'IMPROVMURE [FL24 et FL29], les niveaux de macrotexture mesurés étaient plutôt de l'ordre de 0,6 mm ce qui est plus conforme aux pratiques françaises.

IV. Polissage des enrobés avec AE

1. Essais de polissage

Les essais de polissage sont réalisés en laboratoire à l'aide de la machine Wehner & Schulze (Figure 37). D'autres dispositifs existent mais ils reprennent le même principe de mesure.

La machine Wehner/Schulze a été développée dans les années soixante par l'Université de Berlin [Ref.1, Ref.2]. Cette machine est destinée à la simulation en laboratoire de l'action du trafic sur des revêtements de chaussée. L'essai est normalisé en Europe [Ref.3].

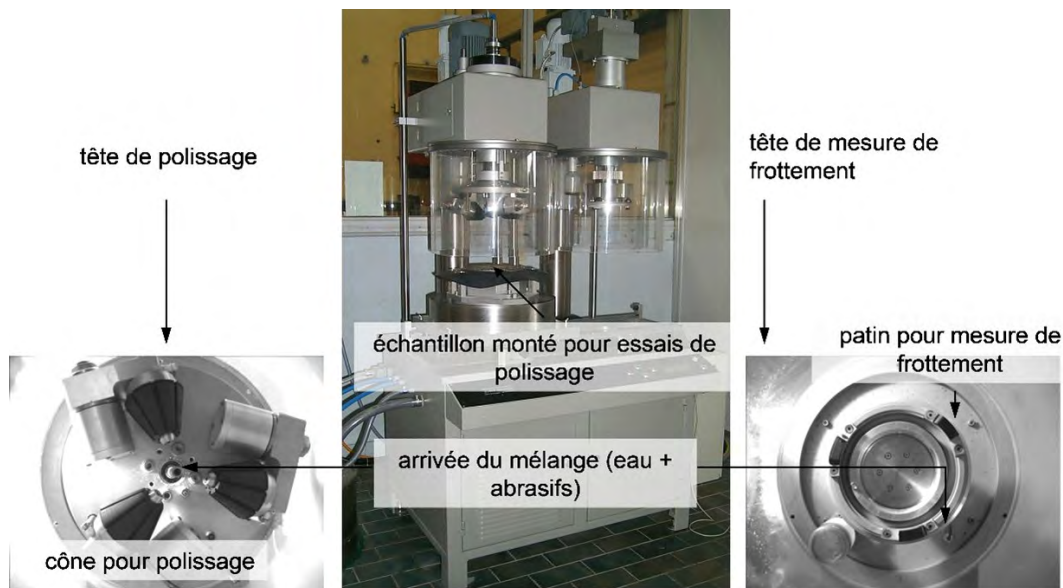


Figure 37 : Machine Wehner/Schulze

La machine comprend deux têtes pour remplir respectivement les fonctions de polissage et de mesure de frottement. Le polissage s'effectue à l'aide de trois cônes de caoutchouc montés sur une tête rotative et roulant sur la surface de l'éprouvette (Fig. 20 gauche). Chaque rotation de cette tête représente trois passages des cônes de caoutchouc en un point donné de la surface à tester. La vitesse de la tête de polissage est de 500 rotations par minute, ce qui représente une vitesse linéaire de 17 km/h. Un mélange d'eau et d'abrasif (silice) est projeté sur la surface de l'éprouvette pour accélérer le polissage. La couronne correspondant à la zone polie a un diamètre de 16 cm et une largeur de 6 cm.

La machine peut s'arrêter automatiquement après un nombre programmé de rotations. À chaque arrêt, la surface de l'éprouvette est nettoyée à l'aide d'un jet d'eau (sans abrasif) projeté pendant 2 minutes. Après cette période de lavage, l'éprouvette est déplacée manuellement vers la tête de mesure de frottement. Celle-ci est composée de trois petits patins de gomme (surface d'environ 5 cm²) disposés à 120° les uns des autres sur un disque (Fig. 20 droite). Pour la mesure du frottement, le disque est lancé jusqu'à atteindre une vitesse de 100 km/h sur sa circonférence. Lorsque la vitesse atteint 90 km/h, l'eau est projetée à la surface de l'éprouvette. A 100 km/h, le moteur est coupé et le disque est descendu jusqu'au contact avec la surface de l'éprouvette. La rotation du disque est stoppée par le frottement entre les patins de gomme et la surface de l'éprouvette. Le couple de freinage généré par le contact entre les patins et la surface est mesuré en continu et enregistré jusqu'à l'immobilisation de la tête de mesure. L'adhérence en laboratoire est généralement calculée à partir du couple de frottement mesuré à 60 km/h. La zone de mesure du frottement est une couronne centrée sur la zone polie.

Généralement, les carottes sont testées suivant la méthode développée par l'IFSTTAR [Ref.2]. Cette procédure permet de polir l'échantillon et de construire la courbe d'évolution du coefficient de frottement aux nombres de passages suivants : 0 – 1000 – 2000 – 3000 – 4000 – 5000 – 6000 – 7000 – 10000 – 20000 – 50000 – 90000 – 180000. Elle fournit plus d'informations sur l'évolution de l'adhérence que

l'essai normalisé qui ne requiert que la valeur du coefficient de frottement après 90 000 passages des cônes de polissage.

2. Evolution de l'adhérence avec le polissage pour les enrobés contenant des AE

Lors de l'étude bibliographique, des travaux concernant la résistance au polissage des enrobés avec AE ont été également analysés.

La première étude poussée sur le sujet est la thèse de doctorat de Navaro soutenue en 2011 [Ref.4]. Elle a porté sur l'analyse de la cinétique de mélange des enrobés recyclés et l'influence du taux d'agrégats sur les performances mécaniques (Figure 38). L'étude a été réalisée en laboratoire sur des formulations de BBTM et de BBSG dans lesquelles trois taux d'agrégats d'enrobés différents ont été incorporés. Les enrobés de référence sont un BBTM 0/10 contenant des granulats de PSV 64 et un BBDr 0/10 contenant des granulats de PSV 56. Les niveaux de frottement W&S des enrobés de référence sont élevés en raison du choix de granulats de bonne qualité. En parallèle de l'étude des caractéristiques purement mécaniques (module, etc.), l'évolution du coefficient de frottement sous l'effet du polissage a été testée. La figure ci-dessous illustre une comparaison du coefficient de frottement mesuré avec la machine Wehner et Schulze à 60 km/h « μ_{WS} » des formules comportant des agrégats d'enrobés (AE) à différents taux.

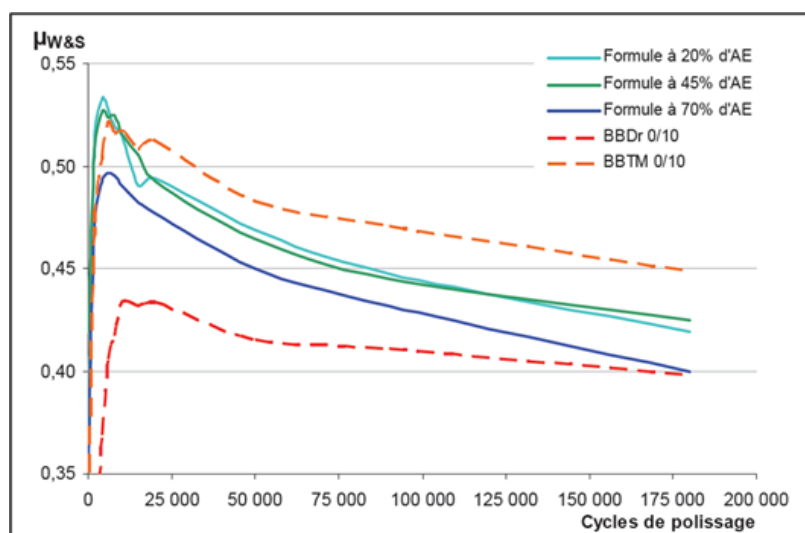


Figure 38 : Comparaison de l'évolution de l'adhérence mesurée par l'essai W&S en fonction du taux de recyclage et de la valeur PSV des granulats utilisés [Ref.4]

La comparaison des courbes d'évolution du frottement μ_{WS} des recyclés à 20 % et 45 % montre une absence de l'effet de l'incorporation des agrégats. Le niveau du frottement μ_{WS} de la formule à 70 % d'incorporation d'agrégats présente une légère baisse par rapport aux deux formules précédentes. De plus, les niveaux de performances en adhérence obtenues sont supérieures à celles du BBDr 0/10 de référence. Au jeune âge, les niveaux de performances des mélanges contenant des AE sont équivalents à ceux du BBTM 0/10 de référence, puis ils deviennent légèrement inférieurs tout en restant au-dessus du BBDr 0/10 de référence. Ces travaux montrent que l'incorporation de taux d'AE inférieurs à 50 % dans des échantillons de laboratoire n'entraîne pas de dégradation excessive des niveaux de performances en adhérence.

L'étude plus récente de Pomoni et al. [FL8] réalisée sur des carottes prélevées in-situ a confirmé un comportement similaire des enrobés à chaud avec AE et sans AE avec une phase d'augmentation de l'adhérence initiale due au décapage et une baisse explicable par le polissage des granulats dans un second temps (Figure 39). Elle a utilisé des formules avec des taux d'AE variant de 10 à 30 %, ce qui reste modéré et a observé des performances un peu plus faibles des enrobés modifiés lorsqu'ils subissent un essai Wehner & Schulze (0,05 à 0,08 à 180 000 cycles environ). On peut noter également que dans cette étude, l'enrobé de référence (i.e. sans AE) n'a pas des performances élevées ce qui peut également expliquer le niveau assez moyen des résultats obtenus sur les enrobés avec AE.

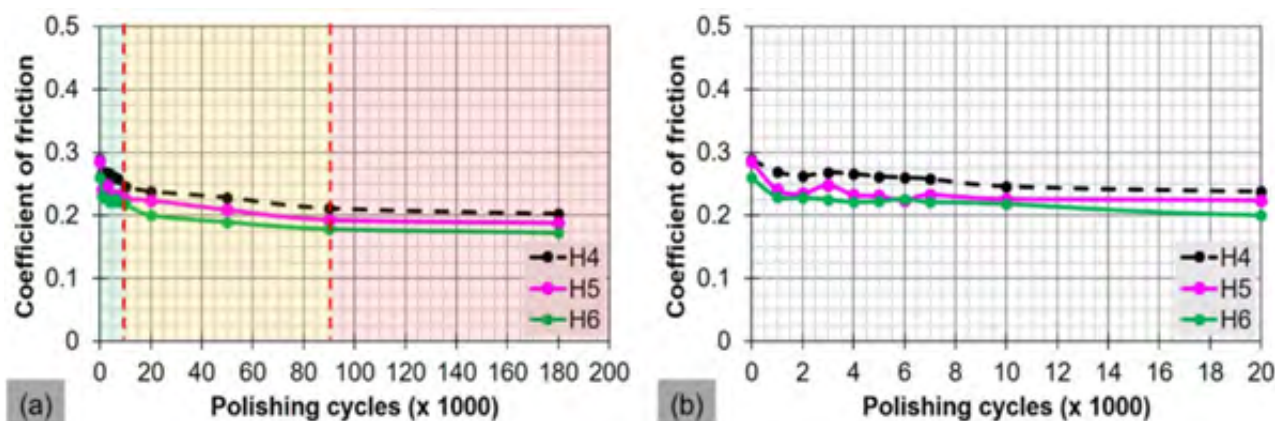


Figure 39 : Essais de polissage sur enrobé à chaud sans AE (H4), avec 10 % AE (H5) et 30 % d'AE (H6) [FL8]

En 2021, Sedthayutthaphong et al. [FL27] se sont intéressés également à la question de la résistance au polissage des enrobés incorporant des AE à de forts taux (50 et 100 %). Ils ont utilisé la machine TWPD pour polir les échantillons (voir section 4.3 et Figure 36). Des mesures de frottement ont été faites à 5000, 10000, 25000, 50000 et 100000 cycles de polissage à l'aide du DFT (Dynamic Friction Tester) [Ref.11]. Quatre types de mélange bitumineux à chaud ont été testés : 0 % d'AE, 50 % d'AE pour les granulats 5-20 mm, 50 % d'AE pour les petits granulats (< 5 mm), 100 % d'AE. Le bitume d'apport était de grade 60/70 et le taux de bitume dans les AE est de 4,7 %. La caractérisation des granulats a fourni une valeur de PSV de 52 pour les AE et 54 pour les granulats d'apport. Les valeurs de DFT20 (i.e. coefficient de frottement à 20 km/h) ont été prises en compte avec un niveau initial autour de 0,70 et final de 0,30 pour le mélange de référence. Cette baisse importante des valeurs de DFT20 traduit une usure importante de la texture des échantillons mais les performances initiales étant très forte, le niveau final est modéré mais acceptable. Il n'existe pas dans la littérature de relation de passage entre le nombre de cycles de polissages N de la machine TWPD et le trafic cumulé comme c'est le cas pour la machine W&S et la TWPD [Ref.9] mais des études comparatives ont montré une bonne corrélation entre les résultats de la machine W&S et de la machine TWPD [ref.13]. A titre indicatif, on pourrait considérer que 10 000 cycles de polissage correspondent à 417 000 PL cumulés soit un an de trafic de classe T0 par exemple [Ref.9]. Pour les mélanges à 50 % et 100 % d'AE, les valeurs de DFT20 sont plus faibles à l'état initial que celles de la référence, tout en restant correctes à satisfaisantes (0,35 à 0,60 selon la formule) mais la baisse de DFT20 avec le polissage est beaucoup plus modérée. Ainsi, l'écart de performances entre les formules avec et sans AE se réduit fortement au-delà de 10 000 cycles de polissage. Cet écart est de l'ordre de 0,10 à mettre en regard des valeurs de répétabilité ($r = 0,050$) et de reproductibilité ($R = 0,065$) des DFT obtenues lors du Friction Workshop 2023 [Ref.14]. Les écarts entre mélanges avec AE et sans AE sont donc du même ordre de grandeur que ceux obtenus par Pomoni et al. [FL8].

Enfin, le projet national IMPROVMURE [FL24] [FL29] a évalué à l'aide de la machine Wehner & Schulze des enrobés de type BBSG contenant des taux d'AE de 0 %, 40 % à 70 % et ayant subi jusqu'à trois cycles de recyclage. Deux procédés de fabrication (bitume pur appelé « *chaud* » dans le projet et mousse de bitume appelé « *tiède* ») ont été testés avec des éprouvettes fabriquées en laboratoire ou prélevées sur trois chantiers réels. Tous les enrobés ont été fabriqués en conservant des courbes granulométriques du squelette granulaire identiques, une teneur en liant fixée à 5,4 % en masse et une consistance du liant final identique (pénétrabilité selon la loi des mélanges log-log) de classe 35/50.

La macrotexture de tous les échantillons a été mesurée avant essais de polissage (Figure 40 et Figure 41). On note que pour les fabrications « *à chaud* », les valeurs de PMT sont satisfaisantes voire très bonnes. Globalement, les éprouvettes avec 70 % de taux d'AE présentent une PMT plus élevée que celles des éprouvettes de référence (0 % AE) ou à 40 % d'AE. Pour les fabrications « *tièdes* » on note des valeurs de PMT satisfaisantes sauf pour le chantier à 40 % d'AE et un cycle de recyclage qui présente un sur-compactage in-situ.

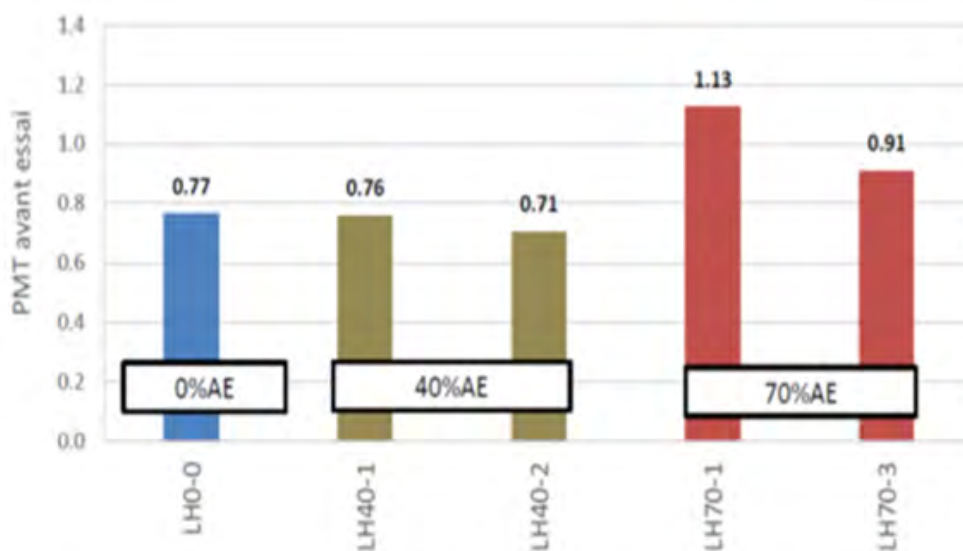


Figure 40 : Profondeur Moyenne de Texture (PMT) pour les éprouvettes fabriquées à chaud en laboratoire [FL24]

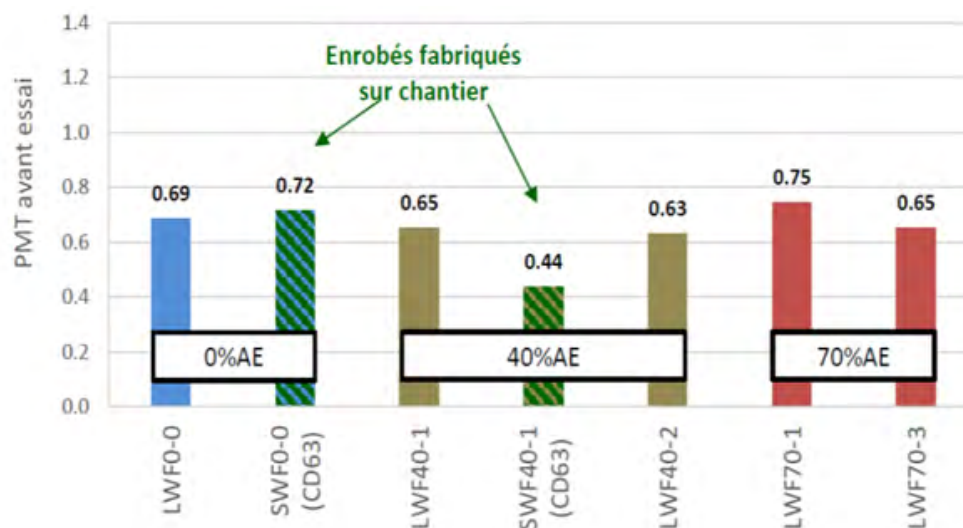


Figure 41 : Profondeur Moyenne de Texture (PMT) pour les éprouvettes fabriquées à tiède [FL24]

L'analyse des essais Wehner & Schulze a été réalisée sur 4 critères : la valeur normalisée de μ (i.e. frottement à 90 000 cycles de polissages), la valeur maximale de frottement μ_{max} , la durée de décapage (position du μ_{max}) et la pente de la courbe entre 90 000 cycles et 180 000 cycles.

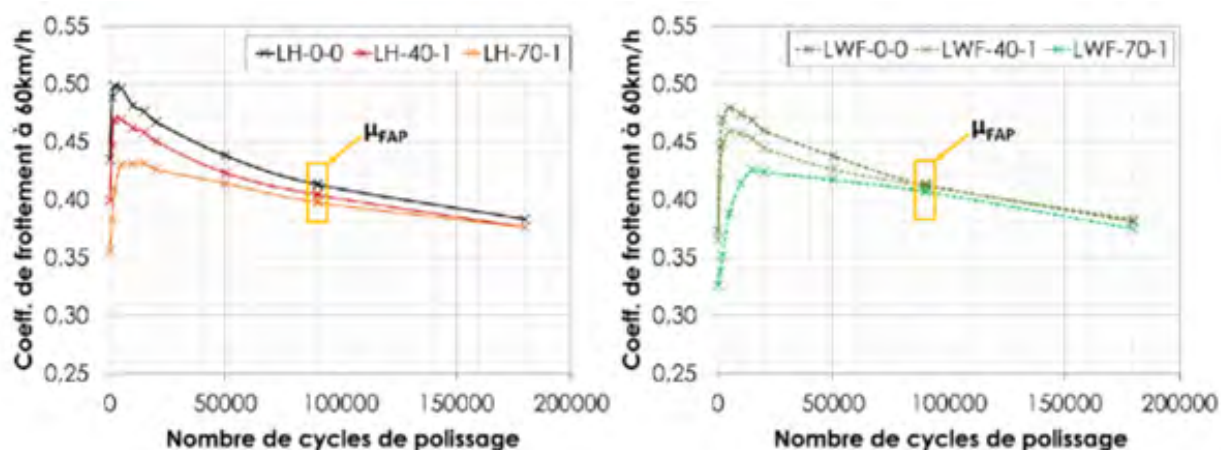


Figure 42 : Essais Wehner et Schulze sur enrobés « à chaud » (LH) et « tièdes » (LWF) à 0,40 et 70 % d'AE après un cycle de recyclage [FL24]

L'analyse des essais réalisés sur des éprouvettes confectionnées avec des AE issus d'un cycle de recyclage montre une baisse de la valeur $\mu_{\max}$ quand le taux d'AE augmente et un allongement de la durée du décapage (Figure 42). Le comportement à court terme est donc influencé par le taux d'AE mais les valeurs de frottement restent satisfaisantes ($> 0,40$). Concernant les performances à long terme, on note que les valeurs de μ à 90 000 cycles et à 180 000 cycles ne varient pas de manière significative en fonction du taux d'AE (moins de 5 % d'écart).

En complément, l'effet du multirecyclage a été évalué sur les formules contenant 40 % et 70 % d'AE (Figure 43 et Figure 44).

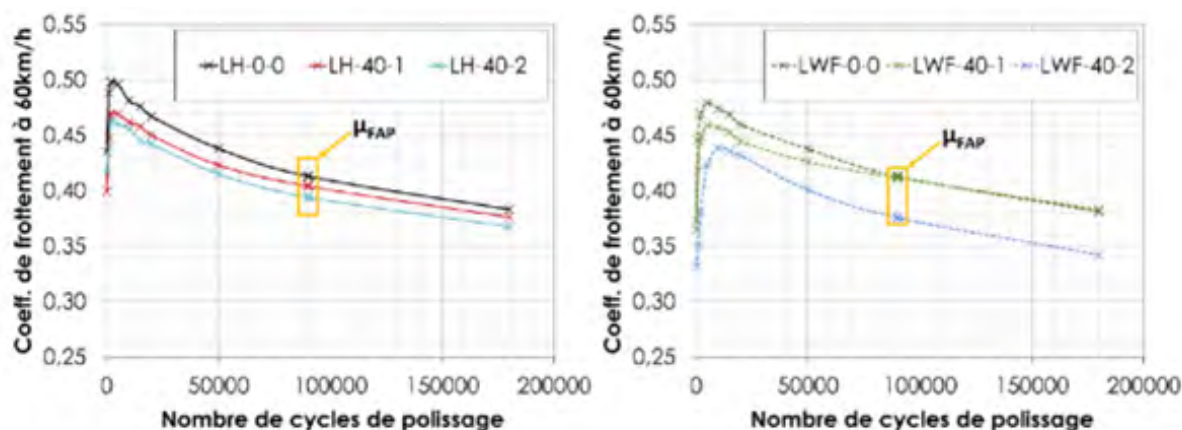


Figure 43 : Essais Wehner et Schulze sur enrobés « à chaud » (LH) et « tièdes » (LWF) contenant 40 % d'AE après 0, 1 et 2 cycles de recyclage [FL24]

Pour les taux d'AE de 40 %, on note une légère baisse du $\mu_{\max}$ avec le nombre de cycles de recyclage (moins de 10 %) et un léger décalage du $\mu_{\max}$ pour la formulation « tiède ». Concernant les performances à long terme, les résultats sont comparables pour la formulation « à chaud » et l'écart sur la formulation « tiède » reste limitée à 10 % environ.

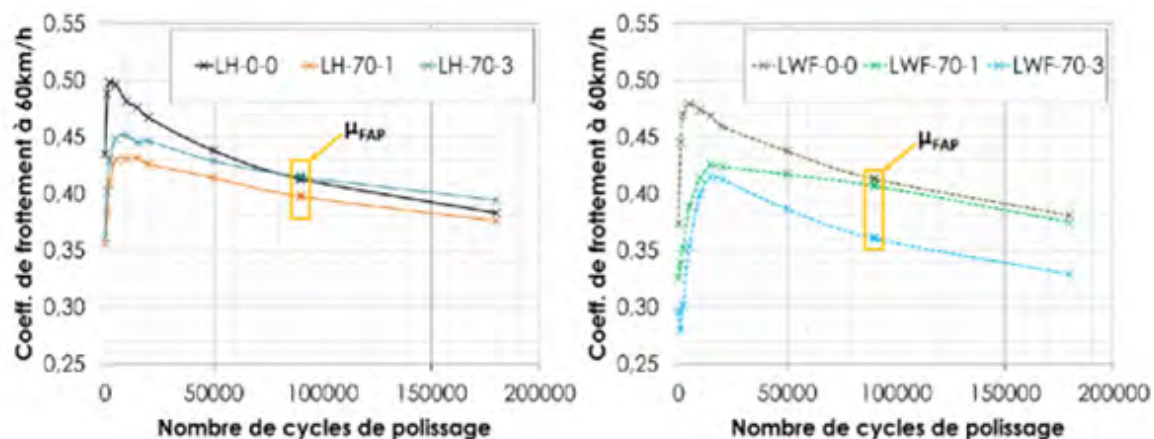


Figure 44 : Essais Wehner et Schulze sur enrobés « à chaud » (LH) et « tièdes » (LWF) contenant 70 % d'AE après 0, 1 et 3 cycles de recyclage [FL24]

Pour le taux d'AE de 70 %, on observe une baisse du $\mu_{\max}$ et un décalage du $\mu_{\max}$ pour la formulation « tiède » mais les valeurs de frottement restent correctes ($\mu > 0,40$). Pour les performances à long terme, on observe que le 3ème cycle de recyclage entraîne une très légère amélioration des performances pour la formulation « à chaud » et une dégradation de l'ordre de 13 % des valeurs de μ à 90 000 et 180 000 cycles pour la formulation « tiède ». On note également que la pente de la courbe entre 90 000 cycles et 180 000 cycles reste la même quel que soit le nombre de cycles de recyclage ce qui semble signifier que le multirecyclage n'a pas d'impact sur la vitesse de dégradation des performances de frottement.

En conclusion, les résultats des essais Wehner & Schulze montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre le niveau de performances d'adhérence à long terme des enrobés de référence et celui des enrobés contenant des AE à 40 ou 70 %.

V. Conclusions

Le présent rapport a analysé l'effet de l'introduction des AE sur les performances d'adhérence en croisant plusieurs sources de données.

Dans un premier temps, la base de données CARAT qui fournit l'évolution du CFL en fonction de la vitesse pour différents taux d'incorporation d'AE a été analysée. Les taux d'AE ont été étudiés par pas de 10 % entre 0 et 50 % et les fiches correspondant à des taux d'AE compris entre 51 et 100 % ont été regroupées compte-tenu de leur faible nombre (20 fiches). L'analyse des fuseaux a montré que quel que soit le taux d'AE, le CFL à basse vitesse (40 km/h) est égal voire légèrement meilleur que celui du fuseau de référence. Ensuite, pour les grandes vitesses (80 km/h et 120 km/h), le CFL est généralement moins élevé que celui de la référence. Pour les taux d'AE entre 10 et 40 %, ceci s'explique par une prédominance de la technique BBSG dans l'échantillonnage avec AE par rapport au fuseau de référence « *tous revêtements* » qui ne contient que 11 % de BBSG et qui est largement dominé par des techniques discontinues (BBTM, BBUM) présentant une bonne macrotexture et des meilleures valeurs de CFL à 80 et 120 km/h. Compte-tenu du nombre de chantiers en BBSG pour les taux d'AE compris entre 0 et 40 %, une 2^{ème} analyse a été réalisée en considérant un fuseau de référence basé sur les BBSG sans AE. Les résultats montrent que l'introduction d'AE ne dégrade pas les performances d'adhérence et qu'elle aurait même tendance, dans certains cas, à améliorer les valeurs de CFL à 40 km/h par un phénomène de polissage différentiel qui tendrait à recréer de la microtexture en éliminant les minéraux les plus tendres de la surface des granulats et en conservant les minéraux les plus durs (usure) afin de générer une texture plus rugueuse. Pour les taux compris entre 41 et 50 %, le fuseau avec AE est comparable à celui sans AE. Enfin, pour les taux supérieurs à 51 %, des valeurs de CFL un peu plus faibles sont observées mais ce résultat est à considérer avec précaution car il est basé sur 20 fiches avec des âges de chantiers ayant entre 4 et 9 ans dans la moitié des cas. Par ailleurs, au-delà de 40 %, il n'a pas été possible de réaliser une analyse uniquement basée sur les BBSG compte-tenu du très faible nombre de fiches disponibles.

Dans un deuxième temps, une analyse documentaire a été réalisée sur la base d'une quarantaine de rapports et articles scientifiques dont 29 ont fait l'objet d'une fiche de lecture détaillée fournie en annexe du présent document. On peut noter que 59 % des études traitent uniquement de résultats obtenus en laboratoire, 34 % d'études in-situ et seulement 7 % comparent des résultats de laboratoire avec leur pendant sur route réelle.

Les études montrent pour des taux AE ≤ 30 % soit un maintien soit une légère baisse des performances d'adhérence (en frottement et/ou en macrotexture) mais rien qui ne soit véritablement notable. Pour des taux compris entre 31 et 50 % d'AE, le rôle des matériaux devient de plus en plus important que ce soit pour les aspects purement mécanique ou d'adhérence, ce qui est cohérent avec les éléments de doctrine actuels [Ref.10]. En effet, l'utilisation d'AE présentant un PSV faible (i.e. de l'ordre de 40) entraîne une baisse non négligeable des valeurs de frottement tandis que l'utilisation d'AE avec fort PSV (i.e. de l'ordre de 60) entraîne un maintien des performances dans le temps. Pour des taux d'AE > 50 %, les enrobés testés respectent les obligations en termes de macrotexture (i.e. maîtrise des formulations et de leur mise en œuvre) avec des niveaux de performances qui restent corrects au regard des besoins en adhérence au fur et à mesure du polissage par le trafic. Par ailleurs, la connaissance du stock d'AE (et notamment de son homogénéité) est également mise en avant pour garantir de bonnes performances d'adhérence lorsque les taux d'AE deviennent importants. Ainsi, plusieurs auteurs soulignent une difficulté à dépasser un taux d'AE de 20 % lorsque le stock d'AE est peu maîtrisé.

Enfin, une partie de l'analyse a porté sur des travaux de caractérisation menés à l'aide de la machine de polissage Wehner & Schulze afin d'étudier en laboratoire le comportement à long terme des enrobés en fonction du taux d'AE. Les différentes recherches exposées ont permis de conclure sur le fait que l'utilisation de taux d'AE supérieurs à 30 % a un effet limité sur la baisse du niveau de performances d'adhérence en comparant avec des échantillons sans AE.

VI. Liste des références (hors fiches de lecture)

- [Ref.1] Woodbridge M.E., Dunford A., Roe P.G. (2006), Wehner-Schulze machine: First UK experiences with a new test for polishing resistance in aggregates, Published project, Report PPR144. TRL Limited, Workingham, UK.
- [Ref.2] Do, MT., Tang, Z., Kane, K., de Larrard, F. (2007), Pavement polishing - Development of a dedicated laboratory test and its correlation with road results, *Wear* 263, pp 36–42.
- [Ref.3] NF EN 12697-49 (2022), Mélange bitumineux – Méthodes d’essai pour mélange Hydrocarboné à chaud – Partie 49 : Détermination du coefficient de frottement après polissage.
- [Ref.4] Navaro, J. (2011), Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers de Bordeaux.
- [Ref.5] Tourenq C., and D. Fourmaintraux (1971), Propriétés des Granulats et Glissance Routière. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 51, pp.61-69.
- [Ref.6] Senga, Y. Dony, A. Colin, J. Hamlat, S. Berthaud, Y. (2013), Study of the skid resistance of blends of coarse aggregates with different polish resistances, *Construction and Building Materials*, 48, pp. 901–907.
- [Ref.7] Senga (2012), Y. Influence de la variabilité des propriétés des granulats sur la résistance au polissage des enrobés bitumineux, Thèse de doctorat, Université Pierre et marie Curie.
- [Ref.8] Zhao, D. (2011). Evolution de l’adhérence des chaussées – Influence des matériaux, du vieillissement et du trafic. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 197 pages.
- [Ref.9] Tang, Z. (2007) Polishing and Skid-Resistance of Road Pavements. PhD Thesis (in French), LCPC, 278 pages.
- [Ref.10] IDRRIM (2021), Recyclage des agrégats d’enrobés dans les mélanges bitumineux à chaud, Etat de l’art et recommandations, Guide technique, Eds. Cerema, 84 pages.
- [Ref.11] NF EN 13036-4 (2012), Caractéristiques de surface des routes et aérodromes - Méthode d’essai - Partie 4 : méthode d’essai pour mesurer l’adhérence d’une surface : l’essai au pendule.
- [Ref.12] ASTM E1911-09 (2009), Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [Ref.13] Nataadmadja A., Wilson D.-J., Costello S.-B. and Do M.-T. (2015), Correlating Laboratory Test Methodologies to Measure Skid Resistance of Pavement Surfaces, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol.2506, Issue 1, pp.107-115.
- [Ref.14] Cerezo (2024), 3rd European Pavement Friction Workshop (EPFW23) - Round robin tests analysis. Nantes, France, 75 pages.

VII. Liste des fiches de lectures

- [FL1] Lauzanne T., Lecoecue A. (2012), Grave de recyclage EMULPAVE à forts taux d'agrégats d'enrobés, Revue générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA), vol.902.
- [FL2] Delorme J.L., Poirier J.E., Moreira S., Piot G., Triquigneaux J.P., Drouadaine I., Wendling L. (2012), Une nouvelle campagne EAPIC – La caractérisation des agrégats d'enrobés, Revue générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA), vol.902.
- [FL3] Leroux C., Ruiz O. (2012), Couche de roulement en enrobés tièdes avec recyclés (3E+R), Revue générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA), vol.902.
- [FL4] Carbonneau X., Combes E., Gileni F. (2012), Recyclage à fort taux des enrobés sur A54, Revue générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA), vol.902.
- [FL5] Olard F., Bonneau D., Dupriet S., Pouget S. (2012), Formulation et durabilité des enrobés à fort taux de recyclage (jusqu'à 70 %), Revue générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA), vol.902.
- [FL6] McDaniel, R. S., K. J. Kowalski, and A. Shah. (2012), Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement for Surface Mixtures. Publication FHWA/IN/JTRP-2012/03. Joint Transportation Research Program, Indiana, Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- [FL7] Pomoni M., Plati C. and Loizos A. (2022), Skid resistance properties against RAP content change in surface asphalt mixture, Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Volume 1 – Hoff, Mork & Saba (eds).
- [FL8] Pomoni M., Plati C., Kane M. and Loizos A. (2022), Polishing behaviour of asphalt surface course containing recycled materials, International Journal of Transportation Science and Technology, Vol.11, issue 4, p.711-725.
- [FL9] Dunfort A., Viner H., Greene M., Carswell I., Ardill O. and Caudwell L. (2014), Use of reclaimed Asphalt Pavement in the surface course – the effect on friction, Safer Roads International Conference.
- [FL10] Georgiou P. and Loizos A. (2021), Characterization of Sustainable Asphalt Mixtures Containing High Reclaimed Asphalt and Steel Slag, Materials, vol.14.
- [FL11] Wang A., Shen S., Li X. and Song B. (2019), Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation, Construction and Building Materials (Vol.201) pp.303–313.
- [FL12] Marsac P., Bocci E., Cardone F., Cannonne Falchetto A., Carbonneau X., Zaumanis M., Carter A., Rubio-Gamez C., Del Sol Sanchez M., Dave E. and Tebaldi G. (2022), International evaluation of the performance of Warm Mix Asphalts with high Reclaimed Asphalt content, Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials, pp.19-25.
- [FL13] White G. (2019), Quantifying the impact of reclaimed asphalt pavement on airport asphalt surfaces, Construction and Building Materials (CBM), vol.197, pp.757–765.
- [FL14] Kandhal P., Rao S., Watson D. and Young B. (1995), Performance of recycled hot asphalt mixtures, NCAT Report 95-01.
- [FL15] Munoz-Caceres O., Raposeirasa A., Movilla-Quesada D., Castro-Fresno D., Lagos-Varasa M., Andres-Valeria V., Valdés-Vidal G. (1995), Evaluation of recycled projects for performance, DOT 21877 (report) – project n°83-1B.
- [FL16] Hu X., Nie Y., Feng Y. and Zhang Q. (2012), Pavement Performance of Asphalt Surface Course Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Journal of Testing and Evaluation.

- [FL17] Pradyumna T., Mittal A., Jain K. (2013), Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol.104), 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG)
- [FL18] Din I. and Mir M. (2021), Effect of copper slag and reclaimed asphalt pavement on the skid resistance of asphalt mixes, *International Journal of pavement Engineering (IJPE)*.
- [FL19] Qasrawia H. and Asi I. (2016), Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared using recycled coarse concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, vol.121.
- [FL20] Munoz-Caceres O., Raposeirasa A., Movilla-Quesadad D., Castro-Fresno D., Lagos-Varasa M., Andres-Valeria V., Vald'es-Vidal G. (2021), Mechanical performance of sustainable asphalt mixtures manufactured with copper slag and high percentages of reclaimed asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, vol.304.
- [FL21] Guo N., You Z., Zhao Y., Tan Y. and Diab A. (2014), Laboratory performance of warm asphalt containing recycled asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, vol.64.
- [FL22] Yang C., Wu S., Cui P., Amirkhanian S., Zhao Z., Wang F., Zhang L., Wei M., Zhou X. and Xie J. (2022), Performance characterization and enhancement mechanism of recycled asphalt mixtures involving high RAP content and steel slag, *Journal of Cleaner Production*, vol.336.
- [FL23] Lizarraga J.M., Ramirez A., Diaz P., Marcobal J., Gallego J. (2018), Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70 %) and total RAP contents (100 %): from laboratory mix design to its full-scale implementation, *Construction and Building Materials*, vol.170.
- [FL24] Ramirez Cardona D., Pouget S. (2018), Propriétés de surface des chaussées en enrobés multi-recyclés, Livrable 3.3, projet Improvmure, 25 pages, www.improvmure.fr, <https://pnmure.fr/>
- [FL25] Suzuki K., Vasconcelos K., Klinsky L.M., Bessa I. (2023), Evaluation of recycled asphalt mixtures with different RAP contents and the effect of recycling agent, *Road Materials and pavement Design*.
- [FL26] Ibrahim M. Abdelazim M Ali A., Mostafa A., Abdelghany M A. (2021), Evaluation of the Safety of Flexible Pavement using Skid Resistance Measurements, *Mansoura Engineering Journal*, vol.46, issue 1.
- [FL27] Sedthayutthaphong N., Jitsangiam P., Nikraz H., Pra-ai S., Tantanee S. and Nusit K. (2021), The Influence of a Field-Aged Asphalt Binder and Aggregates on the Skid Resistance of Recycled Hot Mix Asphalt, *Sustainability*, vol.131, Issue 938.
- [FL28] Pomoni M. and Plati C. (2022), Skid Resistance Performance of Asphalt Mixtures Containing Recycled Pavement Materials under Simulated Weather Conditions, *Recycling*, vol.7, issue 47.
- [FL29] Gabet T., Marsac P., Lopes Genesseeux M. (2018), Propriétés des agrégats et granulats (Rhéologiques et Géométriques), Livrable 3.1, projet Improvmure, 25 pages, www.improvmure.fr

ANNEXES

■ Fiche de lecture n°1

TITRE	GRAVE DE RECYCLAGE EMULPAVE À FORTS TAUX D'AGRÉGATS D'ENROBÉS	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	Juin 2012	
Auteurs/Organisme	Thierry Lauzanne (RAMERY), Axel Lecoeuche (RAMERY)	
Chapitre	-	
Référence	RGRA n°902	
Objectifs	Démarche de développement du procédé Emulpave par l'entreprise RAMERY	
Résumé	-	
Domaine	Grave émulsion - Emulpave	
Mots Clés	Agrégats	
Points forts	Les conditions de fraisage ont un impact sur la courbe granulométrique de l'agrégat obtenu	
Points faibles	Grave émulsion est une couche de structure Pas de sujet d'adhérence.	

Description détaillée du contenu :

Emulpave est une grave emulsion à fort taux d'agrégats (40 %). Le procédé retenu est un recyclage en centrale hyper mobile. Faisabilité validée sur piste cyclable (2005). Chantier RD en 2006 trafic T3 – Utilisation en structure de voirie.

Reconnaissance du stock : Ecart constaté sur tamis de 6.3 mm allant jusque 5 % entre reconnaissance initiale et phase travaux, à associer aux conditions de fraisage. Sur les agrégats obtenus avant désenrobage, 80 % de refus > 2 mm, qui tombe à 55 % après désenrobage.

■ Fiche de lecture n°2

TITRE	UNE NOUVELLE CAMPAGNE EAPIC – LA CARACTÉRISATION DES AGRÉGATS D'ENROBÉS	
Type de document		Outil
	X	Méthodologie
		Expérimentation
		Autre
Date	Juin 2012	
Auteurs/Organisme	Jean-Luc Delorme (CETE), Jean-Eric Poirier (COLAS), Sylvain Moreira (CETE), Géraldine Piot (CETE), Jean-Pierre Triquigneaux (EIFFAGE) Ivan Drouadaine (EUROVIA), Louissette Wendling (CETE)	
Chapitre	-	
Référence	RGRA n°902	
Objectifs	Essais par inter comparaison de caractérisation des agrégats (teneur en liant, granulométrie, caractéristiques du liant récupéré).	
Résumé	Essais réalisés sur des matériaux non maîtrisés initialement, avec des résultats en termes de capacité à identifier les agrégats jugées honorables. Approche des premières valeurs d'incertitudes obtenues pour les opérations de caractérisation des liants.	
Domaine	Agrégats	
Mots Clés	Agrégats – Liants – Pénétrabilité – Température Bille-Anneau	
Points forts	Validation de la méthode d'échantillonnage (division / ré homogénéisation)	
Points faibles	Pas d'essais de caractérisation intrinsèque des granulats – Pas d'information sur le squelette granulaire des agrégats.	

Description détaillée du contenu :

Essais croisés de caractérisation d'agrégats d'enrobés menés par 43 laboratoires (teneur en liant et granulométrie) dont 27 pour TBA et 20 pour pénétrabilité.

L'article présente une méthode d'échantillonnage à grande envergure (320 échantillons).

L'article fournit r (répétabilité = 0.3) et R (reproductibilité = 0.5) sur la mesure de la teneur en liant, identiques aux valeurs de la norme NF-EN 12697-1. Ces résultats confortent l'équivalence des méthodes pour la mesure de la teneur en liants.

Les agrégats sont constitués de particules de granulométrie entre 2 et 15 mm, avec des agglomérats de 40 mm. Les valeurs r et R obtenues sont semblables à celles obtenues sur matériaux neuf et proches des références de la norme NF-EN 12697-2..

Pour les essais réalisés sur le liant récupéré, r et R sont plus élevés que ceux des normes NF-EN 1426 et NF-EN 1427, probablement sous l'effet des différents solvants utilisés.

■ Fiche de lecture n°3

TITRE	COUCHE DE ROULEMENT EN ENROBÉS TIÈDES AVEC RECYCLÉS (3E+R)	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	Juin 2012	
Auteurs/Organisme	Cédric Leroux (COLAS) Olivier Ruiz (DIR Est)	
Chapitre	-	
Référence	RGRA n°902	
Objectifs	Bilan à 3 ans des performances mesurées sur ces enrobés tièdes avec recycles	
Résumé	Cet article présente le suivi à 3 ans des planches réalisées en enrobés tièdes avec 30 % de recycles réalisées sur la RN333. Les essais concluent à une diminution de la microtexture et des variations de macrotexture en PMP non conformées par la PMT.	
Domaine	Enrobés tièdes	
Mots Clés	Agrégats	
Points forts	Utilisation d'agrégats de couche de roulement. Pas d'impact mesuré sur les caractéristiques d'adhérence des enrobés avec agrégats (tièdes ou chaud)	
Points faibles	Pas de caractérisation des caractères intrinsèques des granulats des agrégats. Suivi à 3 ans	

Description détaillée du contenu :

Suivi à 3 ans d'enrobés tièdes avec 30 % d'agrégats sous trafic lourd (4 000 PL/sens/jour). Comparaison de 4 planches de BBMc 0/10, dont 2 avec 30 % d'agrégats. Agrégats de couche de roulement homogénéisés et caractérisés (G %, TL et w % - 0/10) (anciennes couches de roulement réseau DIR).

Suivi de la macrotexture (rugolaser) et du CFL à 3 vitesses (40, 60 et 90 km/h).

Décroissance de la microtexture (CFL40) des 4 planches. Ecart non significatif entre les différentes planches (témoin / agrégats).

Ecart en macrotexture mesurée par CFL non confirmés par les PMT : évolution et niveau d'adhérence identiques sur les 4 planches.

■ Fiche de lecture n°4

TITRE	RECYCLAGE À FORT TAUX DES ENROBÉS SUR A54	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	Mai 2014	
Auteurs/Organisme	Xavier Carbonneau (Colas) Emilie Combes (Colas) Frédéric Gileni (Colas)	
Chapitre	-	
Référence	RGRA n°920	
Objectifs	Fabrication et mise en œuvre d'EME recyclés à 60 % et de BBSG recyclés à 55 %	
Résumé	Présentation des résultats d'un chantier expérimental avec objectifs de performances en place.	
Domaine	Matériaux, adhérence	
Mots Clés	AE – Liants – EME - BBSG	
Points forts	Chantier réel	
Points faibles	Pas d'essais de caractérisation des granulats Pas d'information sur le squelette granulaire des agrégats Article consacré aux EME plus qu'au BBSG.	

Description détaillée du contenu :

Tri soigné des fraisâts destinés au BBSG, issus d'une couche de roulement de 2000.

Granulats d'apport avec PSV élevé.

La caractérisation des agrégats s'est faite sur Pénétrabilité, TBA et module.

Le contrôle de la performance en place s'est fait surtout sur le module.

Des contrôles de rugosité sont mentionnés, mais les valeurs ne sont pas diffusées.

■ Fiche de lecture n°5

TITRE	FORMULATION ET DURABILITÉ DES ENROBÉS À FORT TAUX DE RECYCLAGE (JUSQU'À 70 %)	
Type de document		Outil
	X	Méthodologie
		Expérimentation
		Autre
Date	Juin 2012	
Auteurs/Organisme	François Olard (Eiffage), Dominique Bonneau (Eiffage), Stéphane Dupriet (Eiffage), Simon Pouget (Eiffage)	
Chapitre	-	
Référence	RGRA n°902	
Objectifs	Méthode d'optimisation multi-critères pour la formulation des enrobés fort taux	
Résumé	Méthode expérimentale présentée sur un cas pratique avec incorporation jusqu'à 70 % d'agrégats d'enrobé dans un EME et un BBSG	
Domaine	Agrégats	
Mots Clés	Agrégats d'enrobés – Liants – EME – BBSG	
Points forts	Montre l'importance des essais de fatigue Fabrication d'enrobés contenant jusque 70 % d'AE	
Points faibles	Axé sur les essais mécaniques de fatigue, pour un EME Pas d'éléments sur l'adhérence	

Description détaillée du contenu :

Rappel des solutions techniques Eiffage – Présentation de leur poste de fabrication mobile .

Méthode d'optimisation de la durabilité du mélange au travers des différents facteurs (taux d'agrégats, grade du bitume d'apport).

■ Fiche de lecture n°6

TITRE	EVALUATION OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT FOR SURFACE MIXTURES	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	Juin 2012	
Auteurs/Organisme	Rebecca.S.McDaniel (Purdue University), Karol J.Kowalski Warsaw (University of Technology), Ayesha Shah (Purdue University)	
Chapitre	-	
Référence	McDaniel, R. S., K. J. Kowalski, and A. Shah. Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement for Surface Mixtures. Publication FHWA/IN/JTRP-2012/03. Joint Transportation Research Program, Indiana, Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2012. doi: 10.5703/1288284314665.	
Objectifs	Impact d'agrégats de caractéristiques d'adhérence faibles ou inconnues sur enrobés recyclés, pour estimer un taux maximum d'utilisation.	
Résumé	Les taux inférieurs à 25 % ont peu d'effet, mais 40 % est plus discutable. Des essais in situ ont montré des performances acceptables à 3/5 ans pour des taux de recyclage de 15 à 25 % et à plus de 10 ans pour des taux de 15 %. Essais sur SMA et DGA (Dense graded Asphalt) – incorporation jusqu'à 40 % d'agrégats de mauvaise qualité. Utilisation d'agrégats à 100 % de passants à 9,5 mm.	
Domaine	Matériaux, mécanique	
Mots Clés	Agrégats, enrobés recyclés	
Points forts	L'ajout d'agrégats de mauvaise qualité a un impact sur les performances de glissance. Un taux d'apport réduit n'a pas beaucoup d'impact. Des caractéristiques in-situ de glissance ont été mesurées entre 3 et 10 ans. L'incorporation jusqu'à 15 % d'agrégats ne montre pas d'impacts par rapport à la non-incorporation. La mention est faite de taux supérieurs autorisés dans le cas d'agrégats triés en fonction de leur provenance.	
Points faibles	Pas de caractérisation des caractères intrinsèques des granulats des agrégats Formulations anglo-saxonnes	

Description détaillée du contenu :

La plupart des DOTs n'ont pas autorisé le recyclés en couche de surface, du fait de la crainte d'impacts négatifs sur l'adhérence, du fait de la non-caractérisation des granulats constitutifs des agrégats. La tolérance actuelle était de 15 % pour les routes avec un trafic de dimensionnement < 3 000 000 ESAL, étendu en 2010 à toutes les structures. A partir de 2012, 40 % du liant peut être issu d'agrégats (< 3 000 000 ESAL) ou 15 % (> 3 000 000 ESAL).

Les tests sont réalisés par compactage d'échantillon en laboratoire, puis MPD (Mean profile depth), mesures frottement par Dynamic Friction tester (DFT → DF20 à 20 km/h).

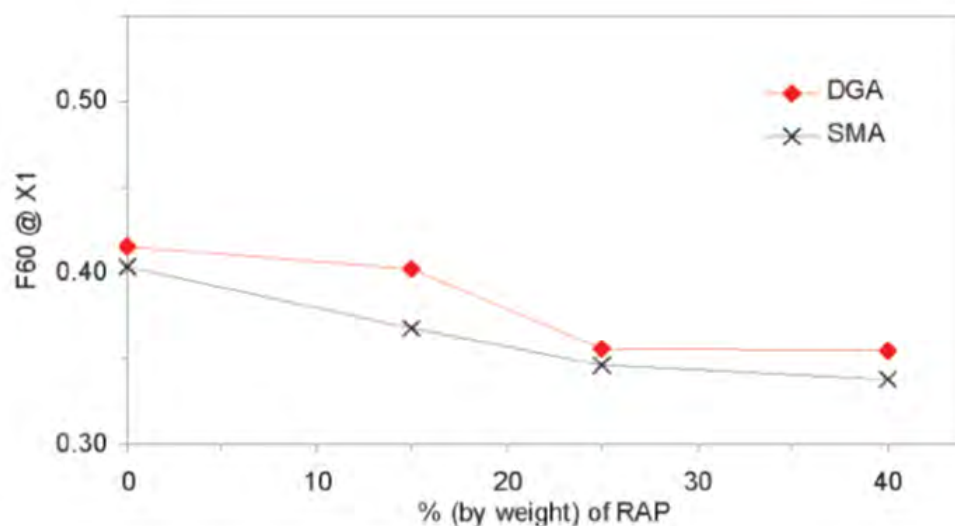
MPD + DF20 pour calculer l'IFI (International Friction Index) → F60 (à 60 km/h). Polissage accéléré par CTPM (Circular Track polishing Machine).

Un modèle de courbe d'évolution du frottement a été développé, en 3 parties.

F60@X1 (càd y3 dans la courbe ci-dessous) a tendance à décroître avec l'ajout d'agrégats, tout en restant satisfaisant. Un taux « *bascule* » se place entre 15 % et 25 %.

Impact sur DGA plus fort que sur SMA.

L'emploi de fraisâts prétriés (surface) permet d'augmenter ces taux.



Tests in-situ sur des recyclés entre 15 et 25 % qui confirment ces résultats de laboratoire.

■ Fiche de lecture n°7

TITRE	SKID RESISTANCE PROPERTIES AGAINST RAP CONTENT CHANGE IN SURFACE ASPHALT MIXTURE	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2022	
Auteurs/Organisme	M. Pomoni, C. Plati & A. Loizos Laboratory of Pavement Engineering, National Technical University of Athens (NTUA), Greece	
Chapitre	Volume 1 – Hoff, Mork & Saba (eds)	
Référence	Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields	
Objectifs	Effet de la teneur en AE sur l'adhérence en conditions sèches, mouillées et contaminées par de la poussière	
Résumé	De nombreux pays utilisent des agrégats d'enrobé avec un taux variant de 10 à 30 %. Jusqu'à présent, les études s'intéressaient aux propriétés mécaniques et aux études de formulation principalement. Cet article se focalise sur les performances d'adhérence des enrobés à chaud utilisés en couche de surface. Un accent a été mis sur l'impact des changements climatiques sur les performances des matériaux. Pour ce faire, un protocole expérimental de laboratoire a été développé afin de simuler les effets des changements météorologiques (température, l'effet de la pluie et la contamination). Des mesures au pendule SRT pont ont été réalisées. L'étude conclut à l'absence d'impact négatif des agrégats d'enrobé sur les performances d'adhérence.	
Domaine	Adhérence, matériaux	
Mots Clés	Adhérence, eau, contaminant, température, AE	
Points forts	Etude de paramètres utiles avec des données supplémentaires par rapport à l'existant	
Points faibles	Pas de référence sur le type de granulats et sur les caractéristiques des contaminants (poussière) Jeu de données réduit Méthode de contrôle du mouillage non explicitée	

Description détaillée du contenu :

- Utilisation d'un enrobé à chaud de référence (i.e. 0 % d'AE) avec une courbe granulométrique 0/5 et un bitume modifié aux polymères 25-55/70 à un taux de 5 %. Le pourcentage de vide est de 16 %.
- Mélange 1 : enrobé de référence avec 30 % d'AE et un pourcentage de vide de 9 %.
- Mélange 2 : enrobé de référence avec 10 % d'AE de taille inférieure à 4mm (finement concassé) et un pourcentage de vide de 7 %
- Etude de laboratoire : variation des valeurs de pendule SRT
 - Effet de la température de l'air : 10, 20 et 30°C
 - T = 20°C, essais propre et sec puis ajout d'eau et de contaminant (poussières)
- Résultats expérimentaux :
 - Si T° augmente alors valeurs au pendule SRT baissent
 - A 10 °C, un fort taux d'AE augmente de manière importante les valeurs au pendule SRT ($70 \geq 85$) – effet probable du % de vides
 - Présence d'eau et de contaminant fait baisser les valeurs au pendule SRT de 15 à 20 points
 - Effet prédominant de la teneur en vides : si elle est élevée, surface plus rugueuse et meilleure adhérence avec drainage notamment de l'eau favorisé

■ Fiche de lecture n°8

TITRE	POLISHING BEHAVIOUR OF ASPHALT SURFACE COURSE CONTAINING RECYCLED MATERIALS	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	12/2022	
Auteurs/Organisme	Maria Pomoni ^a , Christina Plati ^a , Malal Kane ^b , Andreas Loizos ^a ^a Department of Transportation Planning and Engineering, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Zografou Campus, Athens, Greece ^b Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes, 44340 Bouguenais, France	
Chapitre	Vol.11, issue 4, p.711-725	
Référence	International Journal of Transportation Science and Technology	
Objectifs	Etude de l'effet du polissage (i.e. du trafic) sur les performances d'adhérence des enrobés bitumineux à chaud contenant des taux de caoutchouc et d'AE variables	
Résumé	L'adhérence est un facteur clé de la sécurité routière indiquant le frottement fourni par la surface d'une chaussée, qui se détériore au cours de sa durée de vie principalement en raison du polissage du trafic. Ainsi, la compréhension du comportement de polissage de la couche de roulement d'une chaussée est importante pour la sécurité. Il existe de nombreuses études sur le sujet. Par ailleurs, au cours des dernières décennies, l'introduction de matériaux recyclés dans les chaussées a augmenté pour faire face aux défis environnementaux. Cependant, les investigations concernant la couche de roulement sont principalement centrées sur les performances structurelles et peu abordent la question de l'adhérence. Sur ces bases, la présente étude examine les performances d'adhérence au travers du comportement au polissage des enrobés contenant des matériaux recyclés via la machine Wehner/Schulze. Les mélanges étudiés sont un enrobé bitumineux à chaud de référence, cet enrobé bitumineux à chaud avec différents taux d'AE et cet enrobé bitumineux à chaud avec du caoutchouc recyclé. Les résultats d'analyse démontrent que le niveau d'adhérence des mélanges avec AE et caoutchouc recyclé est légèrement inférieur à celui des mélanges conventionnels mais leur performance globale semble présenter une tendance presque similaire sous l'effet de polissage. De manière générale, l'étude propose une approche méthodologique de l'évaluation du potentiel d'adhérence des enrobés bitumineux en couche de roulement qui contiennent des matériaux recyclés (AE ou caoutchouc).	
Domaine	Adhérence, polissage	

Mots Clés	Adhérence, polissage, machine Wehner et Schulze, agrégats d'enrobé, caoutchouc broyé
Points forts	Analyse de l'effet des AE à 10 et 30 % sur des échantillons carottés sur route réelle
Points faibles	Nombre réduit d'échantillons Taux de 30 % maximum d'AE Peu d'informations sur l'intégration du caoutchouc (mais ce n'est pas le sujet de l'étude)

Description détaillée du contenu :

Essais sur deux types d'échantillons :

- Carottes fabriquées en laboratoire avec 10 et 20 % de caoutchouc
- Carottes prélevées sur des sites réels avec 10 et 30 % d'AE

Enrobés bitumienux à chaud avec Dmax de 12,5 mm.

Carottes de caoutchouc : courbes WS « *classiques* » sur les enrobés neufs (croissance/décroissance) et décroissance uniquement sur les enrobés vieillis (pas de décapage a priori).

Carottes prélevées in-situ : pas de phase de décapage du liant et niveau de frottement un peu plus bas que pour les échantillons avec caoutchouc.

Performances un peu plus faibles des enrobés modifiées (0,05 à 0,08 pts à 180 000 cycles environ).

■ Fiche de lecture n°9

TITRE	USE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IN THE SURFACE COURSE – THE EFFECT ON FRICTION	
Type de document		Outil
	X	Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2014	
Auteurs/Organisme	Dunfort Alan ^a , Viner Helen ^a , Greene Martin ^a , Carswell Ian ^a , Ardill Owen ^b and Caudwell Louise ^b ^a TRL ^b Highway Agency	
Chapitre	-	
Référence	Safer Roads International Conference	
Objectifs	Analyse de l'effet des AE dans un SMA 0/14 à l'aide de la machine Wehner & Schulze	
Résumé	Ce papier présente une étude préliminaire concernant l'incorporation d'AE à différents taux dans des enrobés bitumineux. Elle montre que la question de l'adhérence n'est pas limitante de l'usage d'AE. Elle présente une méthodologie d'évaluation basée sur l'utilisation de la machine Wehner & Schulze.	
Domaine	Polissage, adhérence	
Mots Clés	Machine wehner et schulze, frottement, AE, SMA	
Points forts	Etude avec tests jusqu'à 48 % d'AE et PSV des granulats d'apport connu (bon et mauvais granulat)	
Points faibles	Etude préliminaire qui doit être complétée Connaissance du stock d'AE limitée On ne sait pas à quel état de polissage les mesures W&S sont réalisées (on parle juste d'une heure de polissage ce qui doit correspondre à peu près à 30 000 cycles)	

Description détaillée du contenu :

Pratiques au Royaume-Uni : plutôt faible quantité (< 20 %), stock pas très bien maîtrisé ; guides techniques demandent 10 % le plus possible et autorisent jusqu'à 30 %.

Etude de laboratoire avec six formules et deux types de granulats d'apport :

- SMA 0/14 incluant 48 % d'AE (0-20mm filtré à 14mm) + SMA 0/14 avec 0, 10, 20, 30 et 40 % d'AE et PSV des granulats d'apport autour de 60
- SMA 0/14 incluant 48 % d'AE (0-20mm filtré à 14mm) + SMA 0/14 avec 0, 10, 20, 30 et 40 % d'AE et PSV des granulats d'apport autour de 40

En dessous de 20 %, aucun écart de μ WS60 entre les deux types de PSV et au-dessus on perd 0,10 (on passe de 0,35 à 0,25 en moyenne).

■ Fiche de lecture n°10

TITRE	CHARACTERIZATION OF SUSTAINABLE ASPHALT MIXTURES CONTAINING HIGH RECLAIMED ASPHALT AND STEEL SLAG	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2021	
Auteurs/Organisme	Panos Georgiou and Andreas Loizos Laboratory of Pavement Engineering, National Technical University of Athens (NTUA),	
Chapitre	-	
Référence	Materials (vol.14)	
Objectifs	Analyse de l'effet de taux élevés d'AE sur les caractéristiques mécaniques et la macrotexture des formulations	
Résumé	Les décideurs mettent en œuvre la transition vers un modèle circulaire dans tous les secteurs économiques pour atténuer considérablement les effets du changement climatique. À cet égard, les fabricants devraient promouvoir la réutilisation et le recyclage des déchets solides dans la conception de matériaux d'asphalte durables. Cette étude a évalué les performances de trois mélanges hautement recyclés pour les couches de roulement (25, 40 et 50 %). L'étude concernait un enrobé tiède contenant différent taux d'AE et un enrobé à chaud de référence. Sur la base des résultats expérimentaux, les mélanges contenant des AE présentent des performances équivalentes voire meilleures que celles de l'enrobé à chaud de référence en termes de sensibilité à l'humidité, de rigidité, d'orniérage et résistance à la rupture et macrotexture de surface. Par conséquent, l'incorporation combinée de RA et d'acier laitier avec WMA s'est avéré être une option efficace dans la conception de produits respectueux de l'environnement et mélanges de couche de roulement à haute performance.	
Domaine	Adhérence, matériaux, caractéristiques mécaniques	
Mots Clés	Enrobés, tièdes, chaud, AE, comportement mécanique, macrotexture	
Points forts	Etude bien structurée et bonne vision de l'impact sur le comportement mécanique et la macrotexture	
Points faibles	Granulats de bonne qualité (PSV 62) Pas de mesure de frottement Peu d'éléments sur le type d'enrobé	

Description détaillée du contenu :

- Enrobés à chaud (référence) et enrobés tièdes avec 25, 40 et 50 % d'AE
- PSV 62, LA 20, MDE 10, AAV 20
- Essais de caractérisation mécanique (rigidité, sensibilité à l'eau, orniérage, fatigue) et macrotexture
- Forts taux ne dégradent pas les performances mécaniques a priori : l'enrobé devient plus rigide donc bonne résistance
- Incorporation d'AE fait baisser la macrotexture : PMT de 1,7mm en référence et 1,4 mm à 50 %
– ces valeurs sont bien plus fortes que celles utilisées en France ; le maximum de macrotexture est obtenu à 40 % d'AE

■ Fiche de lecture n°11

TITRE	MICRO-SURFACING MIXTURES WITH RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT: MIX DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION	
Type de document		Outil
	X	Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2019	
Auteurs/Organisme	Anping Wang^a, Shihui Shen^{a,b}, Xinghai Li^c, Bo Song^c ^a Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 4800 Cao'an Road, Shanghai 201804, China ^b Department of Engineering, Penn State Altoona, Altoona, PA 16601, United States ^c Beijing Key Laboratory of Highway Engineering Materials and Testing & Authentication Technology, Beijing Road Engineering Quality Supervision Station, Beijing 100076, China	
Chapitre	-	
Référence	Construction and Building Materials (Vol.201) pp.303–313	
Objectifs	Effet combiné de différents taux d'AE sur les performances d'enduits superficiels (mécaniques et adhérence)	

Résumé	L'enduit superficiel est utilisé comme technique de préservation et d'entretien de la chaussée pour améliorer l'adhérence, la résistance à l'abrasion, la résistance à l'eau et la durabilité. Récemment, des enduits contenant des AE ont été utilisés avec de bonnes promesses et une durabilité améliorée. L'utilisation d'AE aide à réduire les émissions de gaz à effet de serre lors de la production d'enrobés bitumineux et à améliorer la durabilité environnementale de l'ensemble de l'infrastructure de transport. Cependant, le fonctionnement du système bitume-émulsion-eau-ciment-agrégat mérite encore d'être approfondi. L'objectif de cette étude vise à proposer une conception de mélange modifiée et une approche d'évaluation des matériaux pour des enduits contenant des AE. Dans cet article, la teneur optimale en bitume (OAC) a été déterminée en fonction de la résistance à l'orniérage. Des adjuvants ont été incorporés pour évaluer leur efficacité sur les mélanges. Un compactage en laboratoire a été proposé pour simuler le roulage sur le terrain. De plus, plusieurs essais ont été utilisés pour évaluer la tenue du mélange, la sensibilité à l'humidité, la résistance au cisaillement et l'adhérence. Les résultats ont montré que l'OAC diminuait avec l'augmentation de la teneur en AE. Les adjuvants ont restauré les caractéristiques initiales du liant d'AE et amélioré son temps de malaxage et sa résistance à l'orniérage. Le compactage en laboratoire pourrait accélérer le durcissement et améliorer la consistance et la résistance à l'orniérage des mélanges. L'ajout d'AE pourrait améliorer le temps de mélange avec un optimum autour de 40 %. Avec l'augmentation de la teneur en AE, la résistance à l'humidité et l'adhérence ont été améliorées. L'utilisation d'AE n'a eu aucun impact constant sur la résistance au cisaillement intercouche. Dans l'ensemble, avec une application appropriée, un contenu élevé d'AE peut être ajouté à l'enrobé avec des avantages à la fois environnementaux et techniques.
Domaine	Adhérence, résistance mécanique
Mots Clés	AE, enrobés bitumineux, caractéristiques mécaniques, microsurfaçage, adhérence
Points forts	Etude avec très fort taux d'AE Optimisation des mélanges et caractérisation des performances mécaniques
Points faibles	Aucune connaissance des AE

Description détaillée du contenu :

On note une augmentation des valeurs au pendule SRT avec l'augmentation du taux d'AE mais la raison est inconnue : SRT = 70 pour 0 % d'AE et 85 pour 80 % d'AE.

■ Fiche de lecture n°12

TITRE	INTERNATIONAL EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF WARM MIX ASPHALTS WITH HIGH RECLAIMED ASPHALT CONTENT
Type de document	Outil
	Méthodologie
	X Expérimentation
	Autre
Date	Janvier 2022
Auteurs/Organisme	Paul Marsac¹, Edouardo Bocci², Fabrizio Cardone³, Augusto Cannone Falchetto⁴, Xavier Carbonneau⁵, Martins Zaumanis⁶, Alan Carter⁷, Ma Carmen Rubio-Gámez⁸, Miguel Del Sol Sánchez⁸, Eshan V. Dave⁹, Gabriele Tebaldi¹⁰ ¹ IFSTTAR, Nantes, France ² Università eCampus, Italy ³ Università Politecnica delle Marche, Italy ⁴ University of Alaska Fairbanks, US ⁵ CST Colas, France ⁶ EMPA, Switzerland ⁷ Ecole de Technologie Supérieure, Canada ⁸ University of Granada, Spain ⁹ University of New Hampshire, USA ¹⁰ University of Parma, Italy
Chapitre	-
Référence	Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials (pp.19-25)
Objectifs	Intercomparaison de 5 laboratoires qui ont testé des enrobés avec 40 % d'AE et évaluation des performances mécaniques

Résumé	Le groupe de travail 2 du comité technique RILEM 264-RAP sur le recyclage non à froid a identifié la nécessité de recueillir des informations sur les éventuels problèmes de durabilité associés à la combinaison d'enrobé tiède (WMA) et d'agrégats d'enrobé (RA) afin de prioriser la caractérisation ou les besoins de recherche pour les types de dommages pertinents. A cet effet, un programme international d'essais inter-laboratoires a été lancé dans 5 laboratoires différents. Celui-ci a été développé sur la base des défis auxquels un concepteur de matériaux routiers est couramment confronté : réduire la température, ajouter des AE, mais conserver les mêmes propriétés. Chaque laboratoire a caractérisé, selon son protocole interne, deux variantes d'un même type d'enrobé (courbe granulométrique similaire, teneur en liant, etc.) : un enrobé bitumineux à chaud (HMA) sans AE pris comme référence et un enrobé bitumineux tiède (WMA) avec 40 % d'AE. Les performances de tous les WMA à 40 % RA sont ensuite comparées afin de voir si des tendances communes se dégagent des différentes méthodes de caractérisation et révèlent des problèmes de propriétés propres aux combinaisons WMA+AE.
Domaine	Matériaux
Mots Clés	AE, enrobé à chaud, enrobé tiède, formulation, caractérisation mécanique
Points forts	Incorporation de 40 % d'AE et résultats sur 5 laboratoires différents dont les caractérisations sont très proches Caractérisation mécanique complète Résultats comparables avec 40 % AE
Points faibles	Aspects mécaniques uniquement et mélange AE et tiède (sensibilité à l'eau, essai PCG, orniérage, module de rigidité, essai de fatigue) Pas de mesure de texture ou d'adhérence (caractéristiques d'usage)

Description détaillée du contenu :

Bitume 50/70 pour l'enrobé à chaud de référence et 160/220 pour celui tiède avec 40 % AE

■ Fiche de lecture n°13

TITRE	QUANTIFYING THE IMPACT OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT ON AIRPORT ASPHALT SURFACES
Type de document	Outil
	Méthodologie
	X Expérimentation
	Autre
Date	2019
Auteurs/Organisme	Greg White School of Science and Engineering, University of the Sunshine Coast, 90 Sippy Downs Drive, Sippy Downs, Queensland 4556, Australia
Chapitre	-
Référence	Construction and Building Materials 197 (2019) 757–765
Objectifs	Evaluer l'impact d'AE à faible taux sur les performances d'enrobés bitumineux mis en œuvre sur chaussée aéroportuaire
Résumé	Les aéroports souhaitent des solutions d'infrastructure durables et les chaussées des aéroports offrent une opportunité pour améliorer la réutilisation et le recyclage des matériaux. Beaucoup d'aéroports sont réticents à utiliser des AE dans leurs chaussées. Deux mélanges d'enrobés bitumineux, tous deux produits avec et sans AE, ont été comparés. Aucune dégradation des propriétés mécaniques n'a été observée avec un taux d'AE de 5 à 10 % mais une légère baisse des valeurs de coefficients de frottement a été mesurée. Des travaux complémentaires sont nécessaires afin de comprendre cette réduction.
Domaine	Adhérence, mécanique, aéroport
Mots Clés	Griptester, AE, coefficient de frottement
Points forts	Chantier réel Mesure de frottement (Griptester) mais est-ce le meilleur appareil à ces vitesses élevées ? Etude mécanique complète
Points faibles	Faible taux d'AE On connaît la granulométrie du stock d'AE mais pas son PSV ou les caractéristiques du liant

Description détaillée du contenu :

Mesure de Griptester à 65 et 95 km/h : baisse de 0,08 avec AE

PMT baisse de 0,02 avec AE (peu significatif)

■ Fiche de lecture n°14

TITRE	PERFORMANCE OF RECYCLED HOT ASPHALT MIXTURES
Type de document	Outil
	Méthodologie
	X Expérimentation
	Autre
Date	Mai 1995
Auteurs/Organisme	Prithvi S. Kandhal, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Alabama Shridhar S. Rao, Auburn University, Alabama Donald E. Watson, Georgia Department of Transportation Brad Young, Georgia Department of Transportation
Chapitre	
Référence	NCAT Report 95-01
Objectifs	Evaluer l'effet d'AE sur 5 sections tests dans l'Etat de Georgie
Résumé	Le DOT de Georgie a construit des chaussées contenant des AE pendant 4 ans environ. Ce projet de recherche a été entrepris pour évaluer les performances de ces chaussées recyclées par rapport aux chaussées sans AE (référence). Cinq projets, composés chacun d'une section avec AE et d'une section témoin, ont fait l'objet d'une évaluation détaillée. Les propriétés du mélange in situ (telles que le pourcentage de vides d'air, le module de résilience et la résistance à la traction indirecte), les propriétés du liant récupéré dans les AE (telles que la pénétration, la viscosité, $G^*/\sin^*$ et $G^*\sin^*$), et les propriétés du mélange recompacté en laboratoire (telles que la stabilité avec essai PCG, indice et module de fluage dynamique confiné) ont été mesurées. Une analyse statistique de test t apparié n'a indiqué aucune différence significative entre ces propriétés du mélange avec et sans AE sur des chaussées en service depuis 1 an et demi à 2 ans et quart. Dix chaussées constituées d'enrobé sans AE et 13 chaussées contenant des AE supplémentaires ont également été évaluées comme deux groupes indépendants. Aucune différence statistiquement significative n'a été trouvée entre les propriétés des enrobés avec et sans AE. Les spécifications de recyclage actuelles du GDOT et les procédures de conception des mélanges semblent satisfaisantes sur la base des résultats de cette étude.
Domaine	Matériaux, formulation
Mots Clés	HMA, AE, propriétés mécaniques

Points forts	Etude in-situ assez vaste Caractérisation mécanique complète Tests statistiques de comparaison des propriétés
Points faibles	Pas de mesure d'adhérence mais une quinzaine de routes en service dont on peut supposer qu'il n'y a pas eu de problème d'adhérence

■ Fiche de lecture n°15

TITRE		EVALUATION OF RECYCLED PROJECTS FOR PERFORMANCE	
Type de document			Outil
			Méthodologie
	X		Expérimentation
			Autre
Date	1995		
Auteurs/Organisme	H.R. Paul Louisiana Department of Transportation and development		
Chapitre	-		
Référence	DOT 21877 (report) – project n°83-1B		
Objectifs	Evaluer les performances de différentes sections routières du point de vue mécanique sur 6 à 9 ans		
Résumé	Ce rapport présente les résultats d'un suivi sur plusieurs années de 10 sections routières en Louisiane. Les essais ont porté sur des éléments structuraux (déflexion, module, etc.). Des taux d'AE de 20 % à 50 % sont testés.		
Domaine	Matériaux, mécanique		
Mots Clés	AE, dégradations		
Points forts	Suivi sur 6 à 9 ans de sections Connaissance du trafic et des formulations Prélèvement de carottes pour analyses en laboratoire des matériaux Taux d'AE jusqu'à 50 %		
Points faibles	Pas de mesure d'adhérence mais a priori aucun problème relevé sur les sections donc par défaut l'adhérence devait être correcte		

■ Fiche de lecture n°16

TITRE	PAVEMENT PERFORMANCE OF ASPHALT SURFACE COURSE CONTAINING RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)
Type de document	Outil
	Méthodologie
	X Expérimentation
	Autre
Date	2012
Auteurs/Organisme	Hu, Xudong; National University of Defense Technology, Nie, Yihua; Hunan University of Science and Technology, Feng, Yu; Hunan Daliu Freeway Construction Development Co.,LTD, Zhang, Qisen; Changsha University of Science & Technology,
Chapitre	-
Référence	Journal of Testing and Evaluation
Objectifs	Evaluer en laboratoire et in-situ les caractéristiques de surface d'un enrobé à chaud contenant de 0 à 30 % d'AE
Résumé	Ce papier décrit les performances d'un enrobé recyclé utilisé sur une route localisée dans le Zhejiang, en Chine. La couche de roulement a été préparée avec le recyclage d'enrobés à chaud. Un enrobé bitumineux de type AC-13 a été choisi comme base pour toutes les formulations. Les performances des enrobés bitumineux (contenant 0 %, 10 %, 20 % et 30 % d'AE) ont été évaluées en laboratoire pour la résistance à la fatigue, la sensibilité à l'humidité, la stabilité à haute température et la fissuration à basse température. Sur la base des résultats du laboratoire, trois tronçons ont été mis en œuvre avec une formule contenant 0 %, 10 % et 20 % d'AE. Le site a été inspecté et observé pendant quatre ans. Les essais in-situ comprenaient des évaluations de la déflexion, de l'adhérence, de l'uni et de la perméabilité. Les résultats des tests en laboratoire ont montré que tous les indicateurs de performances répondaient aux exigences/spécifications, à l'exception de la sensibilité à l'humidité et des performances anti-fissuration à basse température du béton bitumineux recyclé contenant 30 % d'AE. Les données d'inspection ont prouvé qu'un faible pourcentage d'AE n'affectait pas les performances de la couche de roulement, mais des ratios d'AE plus élevés (> 20 %) ne conviennent pas à des routes à fort trafic.
Domaine	Adhérence, matériaux
Mots Clés	AE, centrale de recyclage à chaud, couche de surface, caractéristiques de surface

Points forts	Suivi à 4 ans des sections in-situ avec des mesures des propriétés de surface Nombreuses informations sur les résultats d'essais de laboratoire et sur la formule
Points faibles	Faibles taux d'AE testés in-situ (0 à 20 %) et un peu plus élevés en laboratoire (0 à 30 %)

Description détaillée du contenu :

Le suivi des sections tests est réalisé à 4 périodes : I) Novembre 2007, II) May 2008, III) Décembre 2009 et IV) Juin 2010.

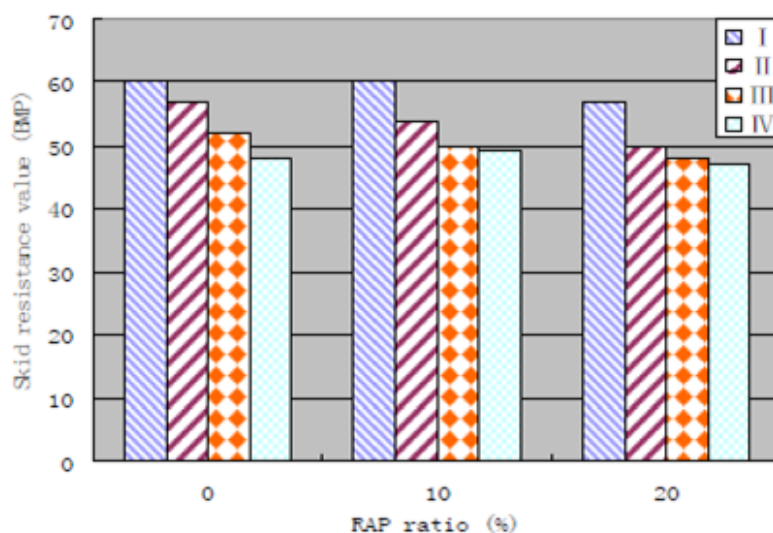


FIG.10—Comparison of the skid resistance values for various RAP ratios.

■ Fiche de lecture n°17

TITRE	CHARACTERIZATION OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) FOR USE IN BITUMINOUS ROAD CONSTRUCTION	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2013	
Auteurs/Organisme	T.Anil Pradyumna ^a , Abhishek Mittal ^{a,b} , Dr.P.K.Jain ^{a,c} ^a Academy of Scientific and Innovative Research ^b Scientist, CSIR- Central Road Research Institute, New Delhi 110025, India ^c Chief Scientist,co-ordinator,AcSIR, CSIR- Central Road Research Institute, New Delhi 110025,India	
Chapitre	-	
Référence	Procedia - Social and Behavioral Sciences (vol.104) 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG)	
Objectifs	Evaluer l'impact de 20 % d'AE et d'adjuvants sur le comportement mécanique d'un enrobé à chaud	
Résumé	Cet article présente une étude de laboratoire visant à comparer les performances entre des enrobés formulés à chaud sans AE et des enrobés à chaud contenant des AE et des adjuvants. Des essais mécaniques de caractérisation (module, orniérage, fatigue, traction indirecte, stabilité) ont été réalisés et montrent que les enrobés contenant des AE et des adjuvants présentent de meilleures performances que les enrobés à chaud sans ajout. Par ailleurs, l'étude met en avant l'intérêt d'essais accélérés afin d'évaluer les performances à long terme des mélanges. Trois dosages d'adjuvants ont été testés (10, 15 et 20 % de la masse totale de bitume des AE et un taux d'AE de 20 % a été testé.	
Domaine	Matériaux, mécanique	
Mots Clés	Adjuvants, AE, Module	
Points forts	Etude de formulation assez précise Essais mécaniques nombreux et complets	
Points faibles	Un seul taux d'AE à 20 % testé Aucune mesure d'adhérence	

■ Fiche de lecture n°18

TITRE	EFFECT OF COPPER SLAG AND RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT ON THE SKID RESISTANCE OF ASPHALT MIXES	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2021	
Auteurs/Organisme	Ishfaq Mohi Ud Din and Mohammad Shafi Mir Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Srinagar, India	
Chapitre	-	
Référence	International Journal of Pavement Engineering (IJPE)	
Objectifs	Analyser l'effet de l'ajout d'AE et de copeaux de cuivre (CS) sur les performances d'adhérence	
Résumé	Cette étude présente les résultats d'une étude expérimentale visant à évaluer l'effet d'AE et d'ajouts de copeaux de cuivre (CS) sur les performances d'enrobés bitumineux. Neuf formules d'enrobés bitumineux ont été préparés avec différentes proportions de CS (0 à 15 %) et d'AE (0, 10, 20 et 30 %). Ces mélanges ont été testés du point de vue mécanique et du point de vue de l'adhérence. L'incorporation de CS a amélioré la stabilité de Marshall et le niveau d'adhérence. Le mélange 3 (0 %RAP, 15 %CS) a montré le niveau de frottement à sec le plus élevé, ce qui s'explique par la plus forte angularité des granulats dans cette formule. A l'inverse l'ajout d'AE a plutôt tendance à faire baisser le niveau de frottement. En conditions mouillées, on retrouve les mêmes tendances si ce n'est que l'effet des AE semble un peu plus important (valeurs à 30 % tombent à SRT = 30). En conditions gelées, le niveau de frottement SRT est assez proche pour toutes les conditions. Dans le cas d'un mélange eau + glace les tendances sont similaires à celles de sec et mouillées avec des valeurs intermédiaires entre ces deux conditions. Dans chaque condition de contamination, l'ajout de CS améliore sensiblement les valeurs de SRT.	
Domaine	Matériaux, mécanique, adhérence	
Mots Clés	AE, Module, SRT, eau, glace, frottement	
Points forts	Les matériaux et les mélanges ont été caractérisés finement en laboratoire	
Points faibles	-	

Description détaillée du contenu :

Le détail des formules et des résultats sont indiqués dans les graphiques ci-dessous :

Table 7. Proportioning of materials for different mix types along with their optimum bitumen contents (OBC)

Aggregate Type	Proportion by weight (%) for different mix types								
	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6	Mix 7	Mix 8	Mix 9
26.5 mm	16	17	17	15	12	15	15	12	12
20 mm	17	15	15	14	17	12	10	15	15
10 mm	29	30	30	20	18	20	17	15	15
Stone dust	35	30	20	28	25	15	25	20	10
Filler (lime)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
RAP	0	0	0	20	20	20	30	30	30
CS	0	5	15	0	5	15	0	5	15
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Optimum Bitumen Content (OBC, by total weight of aggregates, %)	4.55	4.82	5.70	4.14	4.45	5.47	4.06	4.25	4.96

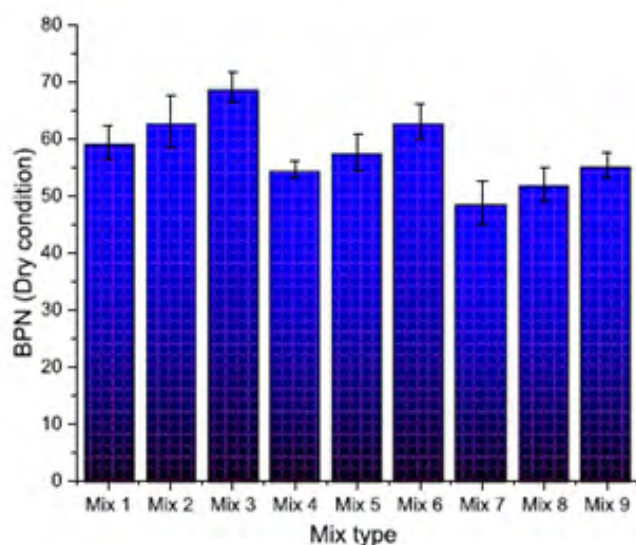


Figure 13. BPN versus Mix type for Dry conditions at 25°C.

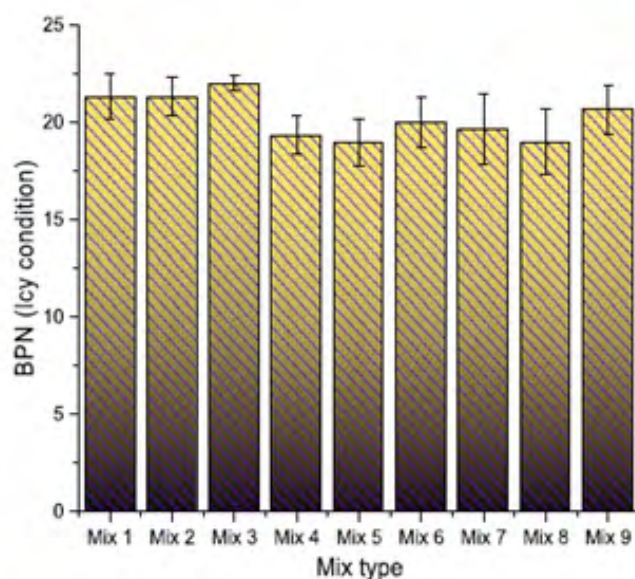


Figure 15. BPN versus Mix type for Icy conditions at -5°C (Unpolished condition).

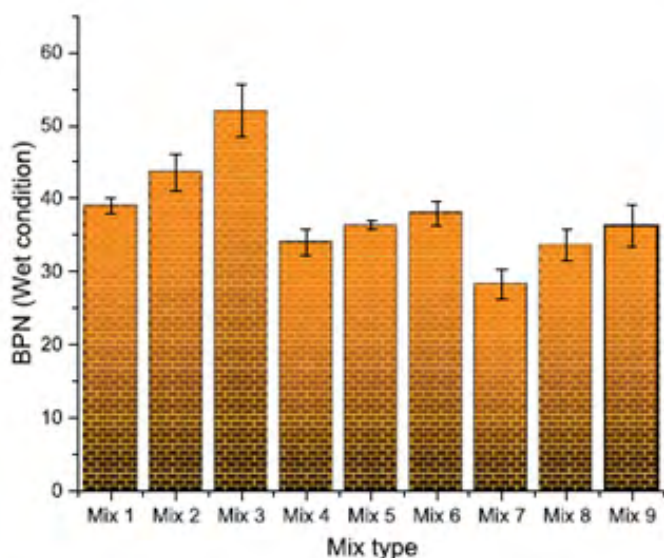


Figure 14. BPN versus Mix type for Wet conditions at 20°C (Unpolished condition).

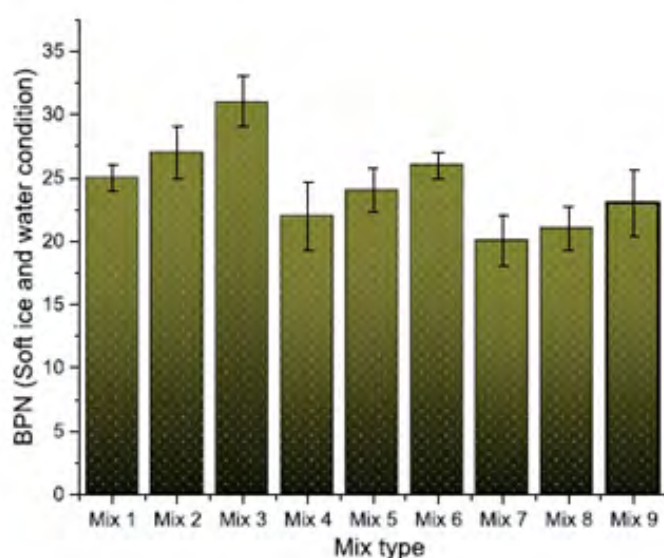


Figure 16. BPN versus Mix type for Soft ice and water conditions at 12°C (Unpolished condition).

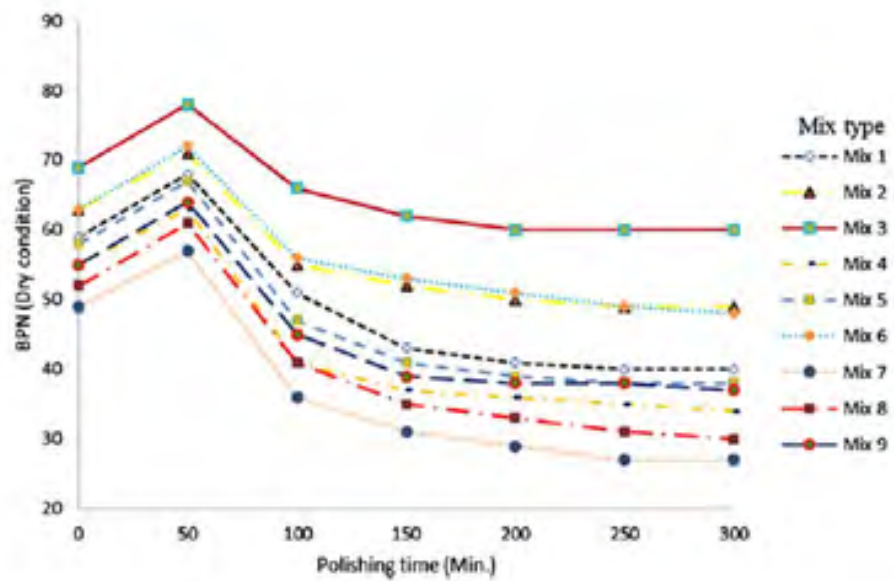


Figure 17. BPN versus Polishing time for Dry conditions (25°C).

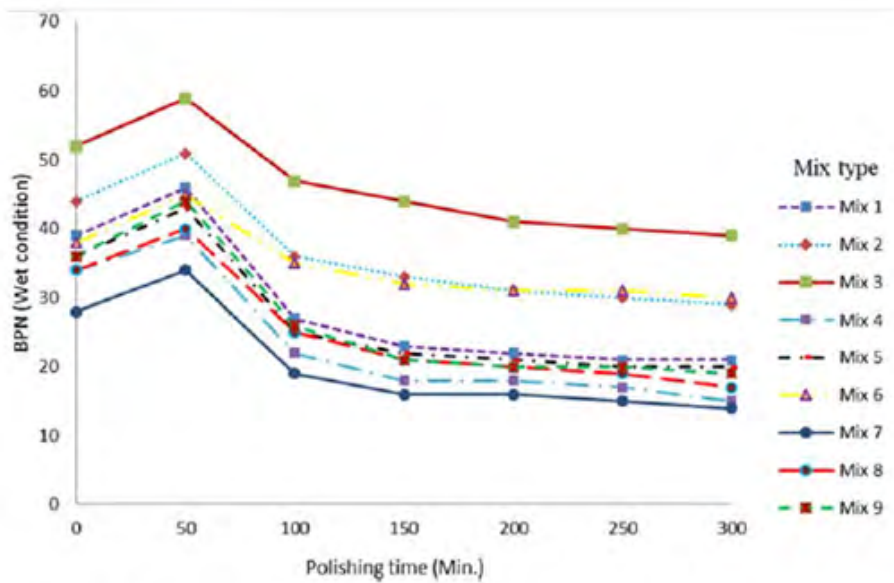


Figure 18. BPN versus Polishing time for Wet conditions (20°C).

■ Fiche de lecture n°19

TITRE	EFFECT OF BITUMEN GRADE ON HOT ASPHALT MIXES PROPERTIES PREPARED USING RECYCLED COARSE CONCRETE AGGREGATE	
Type de document		Outil
	X	Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2016	
Auteurs/Organisme	Hisham Qasrawia ^a , Ibrahim Asi ^b ^a Civil Engineering, Faculty of Engineering, The Hashemite University, Jordan ^b Center of Excellence for Pavement Studies & Evaluation, Arab Center for Engineering Studies, Jordan	
Chapitre	-	
Référence	Construction and Building Materials (vol.121)	
Objectifs	Évaluation de l'effet de l'ajout de granulats issus du béton dans d'enrobés bitumineux formulés avec deux classes du bitume (60/70 et 80/100), par le biais d'essais de performances mécaniques.	
Résumé	Ce papier présente une étude de l'effet de l'ajout de granulats issus du béton (0 %, 20 %, 50 %, 75 % et 100 %) sur les performances mécaniques des enrobés bitumineux, formulés avec deux classes du bitume (60/70 et 80/100). Les résultats ont montré que la teneur optimale de liant augmentait avec le taux de granulat recyclé et que le module résilient était inversement proportionnel au taux de granulat. Cependant, l'adhérence (mesurée avec le SRT) a augmenté avec l'ajout de granulats recyclés. Les enrobés avec granulats recyclés ont présenté une réduction de la sensibilité à l'eau. Cependant, étant donné la réduction de la résistance à la traction lors de l'ajout d'agrégats recyclés, il a été constaté que l'utilisation d'un taux supérieur à 25 % n'est pas recommandé pour des enrobés utilisés sur des routes à fort trafic.	
Domaine	Étude de formulation, performance des enrobés bitumineux en laboratoire avec l'ajout de granulats issus de bétons de ciment	
Mots Clés	Béton recyclé, granulats recyclés, enrobés bitumineux, performance des enrobés bitumineux, classe de bitume (asphalt grade)	
Points forts	Mesures du CFL avec le SRT sur des plaques d'enrobés fabriquées en laboratoire. Mesures de PSV sur les granulats recyclés (50,6) et analyse avec prise en compte de la présence du mortier des anciens bétons. Plusieurs taux de granulats recyclés ont été évalués et jusqu'à la totalité des granulats du mélange.	

Points faibles	Les granulats recyclés sont issus du béton et non d'anciens enrobés. Aucune mesure relative à une autre composante d'adhérence, PMT, par exemple. L'étude doit être suivie afin d'évaluer l'impact sur d'autres types d'enrobés et trafic.
------------------------------	---

Description détaillée du contenu :

L'utilisation des matériaux recyclés est aujourd'hui une pratique incontournable. Cependant, l'expérimentation exposée dans le présent article montre que l'effet de l'ajout de granulats recyclés issus des bétons n'est pas toujours favorable:

- La teneur en liant optimale est augmentée pour atteindre les performances dans l'ajout parce que le granulat recyclé a un pouvoir d'absorption supérieure, et ce pour les enrobés avec les bitumes 60/70 et 80/100. L'augmentation de la teneur en liant est plus significative avec des taux supérieurs à 25 % de granulat recyclé ;
- Il s'est avéré que jusqu'à un taux de 50 %, la tenue à l'eau était augmentée. Compte tenue l'augmentation de la teneur en liant, il est recommandé de ne pas dépasser le taux de 25 % pour les mélanges bitumineux. Une teneur de liant excessive peut avoir une influence négative sur la performance de l'enrobé vis-à-vis de l'orniérage.
- Concernant la tenue à l'eau, les mélanges avec le bitume 80/100 ont présenté une meilleure performance que celles avec le bitume 80/100 et un taux supérieur à 25 % pourrait être accepté.
- L'ajout de granulats recyclés réduit le module résilient, mais augmente le CFL (mesuré avec le SRT), cela est observé de façon plus prononcée pour le bitume 80/100) :
 - Bitume 60/70 : MR de 580 MPa à 550 MPa et SN de 0,87 à 0,95
 - Bitume 80/100 : MR de 470 MPa à 550 MPa et SN de 0,85 à 0,95

Basé sur les résultats obtenus, l'utilisation de taux supérieures à 25 % serait réservée à des chaussées de moyen à faible trafic. Des recherches sont encore en cours pour compléter cette étude.

■ Fiche de lecture n°20

TITRE	MECHANICAL PERFORMANCE OF SUSTAINABLE ASPHALT MIXTURES MANUFACTURED WITH COPPER SLAG AND HIGH PERCENTAGES OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT	
Type de document		Outil
	X	Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2021	
Auteurs/Organisme	Osvaldo Munoz-Caceresa^{b,*}, Aitor C. Raposeirasa^c, Diana Movilla-Quesada^{d,a}, Daniel Castro-Fresno^b, Manuel Lagos-Varasa^b, Valerio C. Andres-Valeria^a, Gonzalo Valdés-Vidal^e ^a Gi2V Research Group, Institute of Civil Engineering, Faculty of Engineering Sciences, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile ^b GITECO Research Group, University of Cantabria, 39005 Santander, Spain ^c Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Superior de Zamora, Universidad de Salamanca, Zamora, España ^d Departamento de Construcción y Agronomía, Escuela Politécnica Superior de Zamora, Universidad de Salamanca, Zamora, España ^e Department of Civil Engineering, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile	
Chapitre	-	
Référence	Construction and Building Materials (vol.304)	
Objectifs	Évaluer, en laboratoire, l'effet de l'utilisation d'AE à fort taux (50 % à 70 %) associé à l'incorporation de 15 % de laitier sur certaines performances des enrobés « semi-dense ».	

Résumé	Aujourd'hui, l'utilisation des agrégats d'enrobés est très répandu par tout dans le monde comme étant une alternative durable pour la fabrication d'enrobés bitumineux. Cependant, la maîtrise d'une composante importante de cette réutilisation est encore en cours, à savoir la réutilisation des AE à forts taux. Cet article a pour objectif d'évaluer, en laboratoire, l'effet sur les performances d'enrobés « semi-denses » avec des taux d'AE entre 50 % et 70 % et l'incorporation de 15 % de laitier. Les caractéristiques faisant partie de cette évaluation sont : macrotexture (MTD), résistance à la fatigue à 20°C, tenue à l'eau et résistance à l'orniérage (Hamburg Wheel Tracking Test). Les résultats ont montré que l'utilisation d'AE améliore la résistance à l'orniérage et la résistance à la fatigue alors que l'effet sur la macrotexture et la tenue à l'eau n'est pas positif. L'incorporation d'AE associée à l'incorporation de laitier améliore la macrotexture et la tenue à l'eau des enrobés, si comparés à ceux avec le même taux d'AE. Cette incorporation accepte également un taux d'AE plus important sans avoir une influence négative sur la résistance à la fatigue et à l'orniérage.
Domaine	Étude de formulation, évaluation de performances, réutilisation de matériaux alternatifs
Mots Clés	Laitier, enrobé recyclé, macrotexture, tenu à l'eau, fatigue et orniérage
Points forts	Mesure de la macrotexture Association de deux matériaux issus du recyclage (AE et laitier)
Points faibles	Des taux d'AE supérieurs à 70 % auraient pu être également testés Le SRT aurait pu être utilisé pour avoir une mesure de CFL sur les échantillons de laboratoire

Description détaillée du contenu :

L'article a comme objectif principal l'évaluation de l'effet combiné du taux d'AE (50 % à 70 %) et de l'incorporation de 15 % de laitier sur un enrobé à chaud à partir de l'évaluation des caractéristiques suivantes : macrotexture (MDT), résistance à la fatigue à 20°C, tenue à l'eau et résistance à l'orniérage (Hamburg Wheel Tracking Test).

Les résultats de l'expérimentations sont les suivants :

- La macrotexture réduit avec l'augmentation du taux d'AE. Les résultats les plus bas sont ceux avec 70 % d'AE. L'incorporation de laitier ne modifie pas l'effet du fort taux sur la macrotexture.
- La résistance à la fatigue est améliorée avec l'augmentation du taux d'AE. L'incorporation de 7,5 % de laitier aide à l'augmentation du taux d'AE sans avoir une influence négative sur la résistance à la fatigue et même, dans certains cas, en l'améliorant.
- L'ajout d'AE réduit la tenue à l'eau des enrobés. L'incorporation de laitier dans les enrobés avec AE améliore la tenue à l'eau.

Basé sur les résultats obtenus dans cette expérimentation, il est recommandé d'utiliser 15 % de laitier en enrobés avec 60 % d'AE et 7,5 % de laitier avec 70 % d'AE.

■ Fiche de lecture n°21

TITRE	LABORATORY PERFORMANCE OF WARM ASPHALT CONTAINING RECYCLED ASPHALT MIXTURES	
Type de document		Outil
	X	Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2014	
Auteurs/Organisme	Naisheng Guo^a, Zhanping You^b, Yinghua Zhao^a, Yiqiu Tan^c, Aboelkasim Diab^b ^a Institute of Road and Bridge Engineering Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China ^b Department of Civil and Environmental Engineering Michigan Technological University, Houghton, MI 49931-1295, USA ^c School of Transportation Science and Engineering Harbin Institute, Harbin, Heilongjiang 150090, China	
Chapitre	-	
Référence	Construction and Building Materials (vol.64)	
Objectifs	Évaluation en laboratoire des performances des enrobés tièdes (Evothrm-DAT et S-I WMA additifs) avec l'ajout d'AE (0 % et 40 %)	
Résumé	Ce papier présente une étude des performances basées sur un certain nombre d'essais mécaniques (orniérage, gel/dégel avec immersion d'éprouvettes Marshal, vieillissement et fatigue, tenue à l'eau, fissuration à basse température) des enrobés tièdes en utilisant deux types d'additifs et avec 40 % d'AE. Les résultats ont montré que la performance la plus sensible à l'ajout d'AE (40 %) est la résistance à l'orniérage, qui est améliorée, mais cet ajout d'AE affaiblit les performances de résistance à la fatigue.	
Domaine	Étude de formulation, performance des enrobés tièdes en laboratoire	
Mots Clés	Enrobés tièdes, agrégats d'enrobés, vieillissement, sensibilité à l'eau	
Points forts	Les essais réalisés ont mis en évidence les performances plus sensibles à l'ajout d'AE, en l'occurrence, la résistance à l'orniérage des enrobés tièdes testés, qui a été améliorée. L'évaluation de du vieillissement (même si en laboratoire) court terme (simulation de la fabrication et mise en œuvre) et long terme (pendant l'exploitation)	

Points faibles	L'étude s'est concentrée sur les essais de laboratoire. L'étude avait l'objectif de mettre en évidence d'abord l'aspect « tiède » que l'ajout d'agrégats Aucune mesure d'adhérence sur les échantillons d'enrobés n'a été réalisée.
------------------------------	--

Description détaillée du contenu :

- Comparaison de deux procédés d'enrobés tièdes (Evotherm et S-I Warm additifs) pour, dans un premier temps, identifier celui qui permet une baisse de température plus importante dans un deuxième temps en termes de performance en laboratoire : sensibilité à l'eau, gel/dégel, fissuration à basse température, résistance à la traction, résistance à l'orniérage et vieillissement avec 40 % d'AE.
- Selon les résultats des essais la baisse moyenne de température avec les additifs varie entre 20 °C et 30 °C, ce qui a été plus prononcé avec les additifs, S-I Warm Additive.
- De façon général, les enrobés avec AE ont présenté une meilleure résistance à l'orniérage, étant légèrement plus importante pour les enrobés tièdes fabriqués avec l'additif S-I WMA.
- L'ajout d'AE a baissé la température de fissuration, et ce pour les deux types d'additifs
- La tenue à l'eau a baissé avec l'ajout d'AE
- Après le vieillissement à court terme, les enrobés tièdes avec AE ont présenté une tenue à l'eau légèrement meilleure que celle des mélanges sans AE.

L'ajout d'AE dans les enrobés tièdes a réduit significativement la résistance à la fatigue.

■ Fiche de lecture n°22

TITRE	PERFORMANCE CHARACTERIZATION AND ENHANCEMENT MECHANISM OF RECYCLED ASPHALT MIXTURES INVOLVING HIGH RAP CONTENT AND STEEL SLAG	
Type de document		Outil
	X	Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2022	
Auteurs/Organisme	Chao Yang^a, Shaopeng Wu^{a,*}, Peide Cui^a, Serji Amirkhanian^b, Zenggang Zhao^a, Fusong Wang^c, Lei Zhang^d, Minghua Wei^e, Xinxing Zhou^a, Jun Xie^{a,**} ^a State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070, China ^b Department of Civil Construction and Environmental Engineering, University of Alabama, Tuscaloosa, AL, 35487, USA ^c School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China ^d Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 7491, Norway ^e School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070, China	
Chapitre	-	
Référence	Journal of Cleaner Production (vol.336)	
Objectifs	Évaluer, en laboratoire, l'effet de l'utilisation d'AE à fort taux (50 % à 70 %) associé à l'incorporation de 15 % de laitier, en évaluant également les caractéristiques géométriques du laitier par rapport à l'origine pétrographique du granulat utilisé (basalte) et la compatibilité entre les interfaces du bitume et du laitier.	
Résumé	L'utilisation d'agrégats d'enrobés est sans doute l'un des moyens de rendre la construction routière durable et respectueuse de l'environnement. Des dernières études ont montré que l'ajout d'AE à un taux supérieure à 30 % est réservé à des enrobés mis en place dans les couches inférieures à cause de la baisse d'adhérence quand les taux d'AE augmentent. L'introduction de laitier peut, grâce à sa forte alcalinité, peut améliorer les performances mécaniques des enrobés avec AE. Des enrobés avec 50 %, 60 % et 70 % d'AE avec le laitier ont été formulés et testés en laboratoire. Les résultats ont montré que l'incorporation de laitier dans les enrobés avec 70 % d'AE ont eu un effet positif sur les performances mécaniques, si comparés au basalte, dû aux caractéristiques géométriques (angularité, texture) et la porosité du laitier. La tenue à l'eau et la résistance à la fatigue on été également améliorées.	

Domaine	Étude de formulation, évaluation de performances, réutilisation de matériaux alternatifs
Mots Clés	Laitier, enrobé recyclé, caractéristiques géométriques, propriétés d'interface
Points forts	Mesure du CFL (SRT), de la microtexture et de la macrotexture Association de deux matériaux issus du recyclage (AE et laitier)
Points faibles	Des taux d'AE supérieurs à 70 % auraient pu être également testés L'étude a besoin d'être complétée Peu de recul

Description détaillée du contenu :

L'article a comme objectif principal l'évaluation de l'effet combiné du taux d'AE (50 % à 70 %) et de l'incorporation de laitier sur un enrobé à chaud, basé sur les performances des enrobés ainsi que la caractérisation géométrique du laitier, sa microtexture et sa compatibilité avec le bitume.

Les résultats de l'expérimentations sont les suivants :

- L'incorporation de laitier améliore la tenue à l'eau, la résistance à l'orniérage et à la fatigue, si comparé au basalte ;
- Les valeurs de SN (CFL avec SRT) et de macrotexture pour l'enrobé avec laitier et 70 % d'AE sont 0,73 et 79 respectivement. Cela veut dire que des enrobés avec taux supérieurs à 70 % d'AE pourraient être utilisés en couche de roulement.
- Les caractéristiques géométriques et l'alcalinité du laitier augment la surface de contact et favorise l'adhésion avec le bitume.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de laitier peut effectivement améliorer les performances des enrobés avec AE, en particulier pour les caractéristiques d'adhérence (CFL), ce qui motive l'utilisation de forts taux dans les enrobés et le développement de techniques durables. Des études supplémentaires nécessitent d'être menées afin de développer de façon plus consistante l'utilisation de laitiers dans les enrobés recyclés.

■ Fiche de lecture n°23

TITRE	SHORT-TERM PERFORMANCE APPRAISAL OF HALF-WARM MIX ASPHALT MIXTURES CONTAINING HIGH (70 %) AND TOTAL RAP CONTENTS (100 %) : FROM LABORATORY MIX DESIGN TO ITS FULL-SCALE IMPLEMENTATION	
Type de document		Outil
	X	Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2018	
Auteurs/Organisme	José Manuel Lizárraga^a, Antonio Ramírez^b , Patricia Díaz^b , José R. Marcobal^c , Juan Gallego^a ^a Department of Civil Engineering-Transport, Technical University of Madrid (UPM), C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, Spain ^b Department of Research, Development and Innovation (R&D), Sacyr Construction, Pº de la Castellana, 83-85, 28046 Madrid, Spain ^c Department of Pavements, Sacyr Construction, Pº de la Castellana, 83-85, 28046 Madrid, Spain	
Chapitre	-	
Référence	Construction and Building Materials (vol.170)	
Objectifs	Étudier certaines performances in situ des enrobés semi-tièdes avec 70 % et 100 % d'agréats d'enrobés. Les enrobés analysés sont destinés à la couche de roulement et couche d'assise de chaussées urbaines.	

Résumé	Compte tenu de l'attention grandissante sur les produits qui permettent la baisse de consommation d'énergie et de matière première ainsi que la réduction d'émissions de CO², ce papier présente une expérimentation sur des enrobés semi-tièdes avec 70 % et 100 % d'AE. Cette expérimentation se concentre sur des enrobés utilisés en couche de roulement et d'assise de chaussées urbaines. Une première étape a été de caractériser les matériaux en place. Ensuite, les enrobés ont été formulés et fabriqués en centrale avec une émulsion à une température inférieure à 100 °C. Les enrobés ont été testés en laboratoire mais une section test a été également mise en œuvre. Sur cette section un tronçon avec un enrobé à chaud. Des échantillons ont été également extraits des sections du chantier suite à la mise en œuvre et un an après. Ces échantillons ont été testés en laboratoire afin de déterminer l'épaisseur, la densité, le module, la traction indirecte, la résistance à la fatigue à 20 °C et orniérage. Le coefficient de frottement longitudinal et la macrotexture ont été également mesurés et comparés avec ceux de l'enrobé à chaud de référence. Les enrobés semi-tièdes ont présenté des performances comparables à celles de l'enrobé à chaud vis-à-vis de la résistance à la fatigue et à l'orniérage. Ces résultats sont encourageants et motivent la poursuite dans le développement et l'utilisation de ce type d'enrobés.
Domaine	Étude de formulation, évaluation des performances in situ des enrobés semi-tièdes pour utilisation sur chaussées urbaines.
Mots Clés	Enrobés semi-tièdes recyclés avec des agrégats d'enrobés, expérimentations in situ, tenu à l'eau, résistance à la fatigue, caractéristiques d'adhérence pneu/chaussés.
Points forts	Mesures en laboratoire et in situ. Mesures du CFL et de la macrotexture Prise en compte du contexte urbain Mise en place d'une centrale adaptée.
Points faibles	L'étude doit être poursuivie afin d'évaluer l'évolution des performances des enrobés semi-tièdes à long terme et sous conditions de trafic réelles. Les résultats de CFL n'ont pas été représentés sur un graphique comme les autres essais

Description détaillée du contenu :

L'article a comme objectif principal la comparaison des performances mécaniques des enrobés semi-tièdes avec 70 % et 100 % d'AE mesurées en laboratoire et sur une section expérimentale avec celles des enrobés à chaud classiques, dans un contexte urbain. Les enrobés sont destinés aux couches de roulement. Les étapes de l'étude sont les suivantes :

- Caractérisation des agrégats;
- Formulation des enrobés en laboratoire (choix de 2 fractions d'AE : 0/5 mm et 5/25 mm) ;
- Mise au point d'un prototype de la centrale d'enrobage ;
- Mise en œuvre de la section expérimentale ;

- Extraction d'échantillons juste après la mise en œuvre et un an après ;
- Monitoring des caractéristiques de surface par des mesures de CFL et de macrotexture.

Les résultats de l'expérimentations sont les suivants :

- Le fait d'avoir utilisé deux fractions d'AE a aidé dans l'insertion des AE et l'obtention de la teneur en liant optimale ainsi que la fabrication en centrale afin d'obtenir les courbes granulométriques ciblées ;
- Les enrobés avec 70 % d'AE et 100 % d'AE ont présenté des tenues à l'eau conventionnelles pour des enrobés de couche de roulement (85 %) et les deux ont également présenté une bonne résistance à l'orniérage ;
- Le contrôle de qualité a mis en évidence une bonne homogénéité et reproductibilité, ce qui rend possible la production en grande échelle ;
- Le module de rigidité des enrobés avec 70 % d'AE a augmenté considérablement, ce qui s'explique par le vieillissement des AE lors de leur première utilisation ;
- En ce qui concerne la résistance à la fatigue, les résultats obtenus pour les enrobés semi tièdes ont été comparables à ceux des enrobés à chaud ; la teneur élevée d'émulsion a pu avoir un effet sur la résistance à la fatigue ;
- L'enrobé semi tiède avec 70 % d'AE a présenté une macrotexture légèrement supérieure à celle des deux autres enrobés.
- L'enrobé semi tiède avec 70 % d'AE et 100 % d'AE ont présenté un CFL (SRT) comparable à celui d'un enrobé à chaud, avec une valeur plus élevée pour le mélange avec 70 % AE : (SN = 0,64) quatre mois après la mise en œuvre. Cela peut être dû au fait que ces agrégats proviennent d'une autoroute, où l'exigence de PSV est supérieure à celle des chaussées urbaines.

Les résultats obtenus dans cette expérimentation sont très encourageants. Ils ont montré que la production d'enrobés semi tièdes est viable en grande échelle, avec un temps de malaxage moins important et températures d'épandage et de compactage plus basses si elles sont comparées à celles des enrobés à chaud classiques.

■ Fiche de lecture n°24

TITRE	PROPRIÉTÉS DE SURFACE DES CHAUSSEES EN ENROBÉS MULTI-RECYCLÉS	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	Septembre 2018	
Auteurs/Organisme	Diego RAMIREZ CARDONA, Simon POUGET (EIFFAGE Infrastructures)	
Chapitre	-	
Référence	Livrable 3.3 – projet ANR IMPROVMURE	
Objectifs	Analyser l'impact de procédés de fabrication des techniques tièdes incorporant des agrégats d'enrobé à différents taux en couche de roulement à l'aide de la machine « Wehner et Schulze » avec des AE issus de plusieurs cycles de recyclage.	
Résumé	Dans le cadre du projet ANR IMPROVMURE, la machine « Wehner et Schulze » a été utilisée pour étudier le frottement après polissage d'un BBSG fabriqué avec plusieurs teneurs en AE (0 %, 40 % et 70 %) issus de plusieurs cycles de recyclage (jusqu'à 3 cycles). Deux procédés de fabrication en laboratoire ont été utilisés : à chaud (référence) et « tiède » avec de la mousse de bitume. Des essais ont aussi été réalisés sur des éprouvettes « mosaïque » de granulats (neuf et AER) seuls. Les éprouvettes ont été fabriquées ou prélevés de trois chantiers routiers en France, réalisés dans le cadre du PN MURE. La campagne d'essais réalisée a permis de mettre en évidence l'évolution des propriétés de surface : • avec l'augmentation du taux de recyclés ; • avec les cycles de recyclage des AER ; • la procédure de fabrication (diminution de la température avec l'utilisation de la mousse de bitume) ; • avec des écarts suivant la provenance des échantillons (labo ou chantier) ; • l'usure des cônes de polissage de la Wehner&Schulze.	
Domaine	Enrobé chaud, enrobé tiède	
Mots Clés	Agrégat d'Enrobé, Wehner & Schulze, enrobé tiède	

Points forts	Comparaison d'échantillons confectionnés en labo et prélevés sur chantiers à partir des mêmes composants (granulats et liant). Techniques chaude et tiède à 3 taux de recyclage (0 %, 40 % et 70 %) analysées. Simulation de plusieurs cycles de recyclage grâce à une méthode de vieillissement accéléré.
Points faibles	Pas de suivi dans le temps : les cycles de vieillissement sont simulés sur un temps « court » grâce à une méthode spécifique (vieillissement thermique). Etude limitée à un BBSG et peu de diversité des AE.

Description détaillée du contenu :

Les propriétés d'adhérence des enrobés pour couche de surface avec des agrégats d'enrobé issus de recyclages successifs ont été étudiées.

Plusieurs paramètres de fabrication ont notamment été investigués :

- la teneur en AER : 0 %, 40 % et 70 % ;
- le nombre de cycles de recyclage dont sont issus les AER : jusqu'à 3 ;
- le procédé de fabrication : enrobage à chaud et tiède à la mousse de bitume ;
- les conditions de fabrication : au laboratoire ou en chantier.

Les enrobés de référence, sans AER, ont été fabriqués avec un bitume 35/50. Ces enrobés ont été produits en laboratoire avec les deux procédés de fabrication : à chaud et tiède mousse. Pour la fabrication des enrobés avec AER, le bitume d'apport a été choisi de façon à avoir un mélange de bitumes (neuf et provenant des AER) avec la même consistance que le bitume des enrobés de référence. De ce fait, du bitume d'apport 50/70 a été utilisé dans les enrobés à 40 % d'AER, et du 160/220 pour ceux à 70 % d'AER. La loi de mélanges log/log a été utilisée avec l'hypothèse du mélange parfait entre bitume vieilli et bitume d'apport.

L'étude a porté sur le coefficient de frottement obtenu par la méthode d'essai avec la machine « *Wehner et Schulze* ».

Les résultats ont permis de conclure sur l'influence des différents paramètres étudiés dans l'adhérence des surfaces des chaussées en enrobés multi-recyclés :

- Dans le cadre de cette étude, les granulats issus des AER desenrobés présentent une meilleure performance dans le temps (en termes d'adhérence) que les granulats neufs. Ils présentent un coefficient de frottement normalisé plus important et une dégradation dans le temps (à trafic équivalent) plus lente.
- L'inclusion d'AER dans les formules d'enrobés, même à un taux de 70 %, n'affecte pas leur classification en termes d'adhérence. Le taux d'AER a, en effet, peu d'influence sur le coefficient de frottement normalisé après 90 000 cycles de polissage et mesurée à 60km/h.
- L'augmentation des cycles de recyclage des AER dans l'enrobé entraîne une variation très faible de ses propriétés d'adhérence. Les variations sont de l'ordre de 10 % pour les enrobés tièdes et de 5 % pour les enrobés à chaud. Ceci a été observé tant pour le coefficient de frottement normalisé comme pour la vitesse de dégradation de l'adhérence dans le temps.
- La procédure de fabrication des enrobés (à chaud ou tiède mousse), avec des AER issus d'un cycle de recyclage (AER0), n'entraîne pas une modification de la classification de l'enrobé en termes d'adhérence. Toutefois, pour des taux d'AER0 élevés, les enrobés fabriqués avec de la mousse de bitume tiède présentent une dégradation dans

le temps plus rapide que ceux fabriqués à chaud.

Les deux méthodes de fabrication sont donc aptes au multi-recyclage. Toutefois, et la méthode de fabrication avec de la mousse de bitume devrait être optimisée pour des taux élevés d'AER (de l'ordre de 70 %).

- La fabrication sur chantier des enrobés entraîne une diminution du coefficient de frottement normalisé de 7 % en moyenne (équivalent à 0,03), par rapport aux enrobés fabriqués en laboratoire. Ceci peut être lié aux différences entre les méthodes de compactage en laboratoire et en chantier, qui créent macro-textures différentes.

Pour les enrobés à chaud fabriqués sur chantier, aucune différence significative n'a été observé entre les enrobés de référence et ceux à 40 % d'AER, en termes d'adhérence. Ceci rejoint les résultats obtenus pour les enrobés à chaud fabriqués en laboratoire.

En contraste, les enrobés tièdes avec AER fabriqués sur chantier présentent des plus faibles performances, en termes d'adhérence, que ceux tièdes sans AER. Pourtant, les résultats sur des éprouvettes fabriquées en laboratoire n'ont pas mis en évidence une telle baisse d'adhérence avec l'ajout d'AER.

La procédure de fabrication tiède avec de la mousse de bitume est donc à optimiser pour permettre d'atteindre les niveaux de performance observés en laboratoire.

- Lors d'une étude d'adhérence avec la machine « *Wehner et Schulze* », il convient d'utiliser les mêmes cônes de polissage pendant toute la durée de l'étude. A défaut, il convient de s'assurer de la stabilité du caoutchouc des cônes neufs avant de réaliser des essais.

■ Fiche de lecture n°25

TITRE	EVALUATION OF RECYCLED ASPHALT MIXTURES WITH DIFFERENT RAP CONTENTS AND THE EFFECT OF RECYCLING AGENT
Type de document	Outil
	Méthodologie
	X Expérimentation
	Autre
Date	2023
Auteurs/Organisme	Karina Suzuki ^a , Kamilla Vasconcelos ^a , Luis Miguel Klinsky ^b & Iuri Bessa ^c ^a Department of Transportation Engineering, University of Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil; ^b CCR S.A., Jundiai, Brazil; ^c Department of Transportation Engineering, Federal University of Ceara, Fortaleza, Brazil
Chapitre	-
Référence	Road Materials and pavement Design https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2191739
Objectifs	Evaluer les performances mécaniques en laboratoire de différents mélanges d'enrobés à chaud contenant des faibles et forts taux d'AE ainsi que l'ajout d'agent régénérateur
Résumé	Cet article présente une évaluation des performances de mélanges bitumineux contenant des AE pour un usage en comme couche de roulement sur les autoroutes à fort trafic. Les principaux objectifs de ces travaux étaient d'étudier l'effet de différents taux d'AE et de l'introduction d'adjuvants sur les propriétés mécaniques des enrobés. Des mélanges avec des taux d'AE faibles (10, 20 et 25 %) et élevées (35, 50 et 65 %) ont été évalués. Deux de ces mélanges (taux d'AE de 25 et 50 %) ont également été évalués après l'ajout d'adjuvants. Les résultats indiquent que les mélanges avec fort taux d'AE présentaient une meilleure résistance à la déformation permanente et aboutissait à une résistance satisfaisante à la fissuration par fatigue. Enfin, l'ajout du régénérateur a amélioré la résistance à la fatigue pour des quantités plus élevées d'AE sans réduire la résistance à l'orniérage.
Domaine	Chaussée, essais mécaniques, agent régénérateur
Mots Clés	Agrégats d'enrobés, fatigue, orniérage, module, régénérants
Points forts	Taux d'AE assez variés et élevés (0, 10, 20, 35, 50 et 65 %) Toute la procédure d'incorporation des AE et de formulation est très détaillée (température de chauffe, etc.) Toutes les données de caractérisation des matériaux sont fournies (TBA, etc.)

Points faibles

Etude en laboratoire uniquement
Pas de mesure d'adhérence ou de texture

Description détaillée du contenu :

Les essais mécaniques ont concerné le module complexe et le « *Flow Number (FN)* » (qui traduit la sensibilité à l'orniérage) avec des essais de déformation permanente sous charge (uniaxial). Deux taux d'AE ont été choisis pour intégrer dans le mélange des adjuvants (agents régénérateurs) et réaliser des essais de fatigue avec des essais de flexion quatre points.

Les échantillons sont des enrobés bitumineux à chaud formulés suivant la méthode brésilienne avec un bitume 30/45, des granulats basaltiques et de la chaux hydratée couramment utilisée comme filler. L'adjuvant est un composé d'un matériau biosourcé. La formulation est réalisée sur la base des résultats d'essais Marshall avec une teneur en vides visée de 4 %. Le taux de bitume a été fixé à 4,9 %. En réalité, la quantité de bitume à ajouter était supérieure, en particulier pour les forts taux d'AE, ce qui traduit le fait que 100 % du bitume des AE n'a pas été remobilisé.

Les résultats des essais mécaniques montrent que :

- Jusqu'à 20 % d'AE, les modules en basses fréquences sont identiques à ceux obtenus sur l'échantillon de référence.
- Au-delà de 25 % d'AE, les modules en basses fréquences sont supérieurs à ceux obtenus sur l'échantillon de référence (rigidité plus forte due au bitume des AE plus vieux ou problème de mise en œuvre des mélanges – auteurs hésitent entre ces deux hypothèses).
- La résistance à l'orniérage augmente avec le taux d'AE (nombre de cycles ou FN augmente très fortement au-delà de 25 % d'AE).
- Les résultats des essais mécaniques sont les plus mauvais à 25 % d'AE mais il est probable qu'un problème de mise en œuvre sur ces échantillons soit à l'origine de ce résultat.
- L'ajout d'un agent régénérateur a pour effet de faire augmenter le module complexe à basses fréquences et de l'augmenter à hautes fréquences par rapport au mélange sans adjuvant.
- L'ajout d'un agent régénérateur fait baisser le FN pour 50 % d'AE et le fait augmenter pour 25 % d'AE par rapport à la référence sans adjuvant. A priori, pour les forts taux d'AE, la limite d'efficacité du transfert thermique due à la surchauffe des granulats est atteinte (effet de saturation).
- La résistance à la fatigue des mélanges à 50 % d'AE avec régénérateur est équivalente à celle de l'échantillon de référence sans AE.

■ Fiche de lecture n°26

TITRE	EVALUATION OF THE SAFETY OF FLEXIBLE PAVEMENT USING SKID RESISTANCE MEASUREMENTS	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2021	
Auteurs/Organisme	Mokhtar F. Ibrahim, Ahmed AbdELazim M.Ali, Abdelzaher E. Mostafa and A. Abdelghany M	
Chapitre	-	
Référence	Mansoura Engineering Journal, vol.46, issue 1, march 2021	
Objectifs	Evaluer l'effet de contaminants sur l'adhérence en laboratoire de mélanges bitumineux avec et sans AE	
Résumé	L'adhérence est l'un des paramètres importants utilisés dans la caractérisation des enrobés de chaussées. L'extension des réseaux routiers et l'augmentation des vitesses pratiquées ont mené à des records de nombre d'accidents qui étaient souvent dus à une offre d'adhérence inadaptée. Divers facteurs affectent l'adhérence comme les caractéristiques des matériaux, la vitesse, l'âge de la chaussée, le climat et le type de contaminant. Ce papier présente l'effet de divers contaminants sur l'adhérence d'enrobés bitumineux avec et sans AE. Les contaminants étaient de l'eau, de l'huile et du sable. Des essais de laboratoire ont été réalisés pendant 140 jours pour les mélanges sans AE et 75 jours pour les mélanges avec AE avec une variation de température allant de 10 à 33 °C. Deux plaques ont été testées pour chaque modalité (contaminant, avec et sans AE) à l'aide du pendule SRT. Les valeurs d'adhérence au pendule sont influencées par la présence de contaminant et par la présence d'AE.	
Domaine	Chaussée, adhérence, formulation	
Mots Clés	Essais au pendule, adhérence, enrobés recyclés, AE	
Points forts	Très bonne connaissance des constituants Méthodologie de l'étude assez claire Mesures d'adhérence	
Points faibles	Analyse n'est pas très poussée, des mesures de texture auraient été appréciées L'effet de la T° peu abordé	

Description détaillée du contenu :

Les travaux ont été réalisés sur des échantillons de laboratoire constitués de plaques d'enrobés sans AE et avec 30 % d'AE. Les caractéristiques mécaniques des matériaux sont détaillées dans l'article (LA, absorption d'eau, etc.). Le bitume est de grade 60/70 largement utilisée en Egypte. Les essais marshall ont conduit à un taux de bitume de 5,35 % pour le mélange sans AE et de 5,1 % pour les mélanges avec AE.

Trois contaminants ont été utilisés : eau (épaisseur du film compris entre 1 et 2mm), huile avec une viscosité de 5W30 (1 à 2 mm) et du sable de diamètre inférieur à 200 pouces.

Les résultats des mesures d'adhérence montrent :

- Une baisse de l'adhérence induite par l'ajout d'eau (7 pts), de sable (23 pts) et d'huile (60 pts) par rapport à l'échantillon sec pour les enrobés sans AE à l'état initial
- Une baisse du niveau d'adhérence dans le temps pour les échantillons contaminés avec de l'huile et du sable
- Un niveau d'adhérence plus élevé sur les échantillons non contaminés contenant des AE par rapport à la référence sans AE mais les valeurs au pendue SRT sont très élevées dans tous les cas
- Une baisse plus importante du niveau d'adhérence des échantillons avec AE contaminés par de l'eau que ceux sans AE
- L'adhérence baisse avec le temps lorsqu'il y a contamination par du sable des échantillons avec et sans AE mais la baisse est plus forte dès le départ sur les échantillons avec AE
- L'adhérence baisse avec le temps lorsqu'il y a contamination par de l'huile des échantillons avec et sans AE mais la baisse est plus forte dès le départ sur les échantillons avec AE

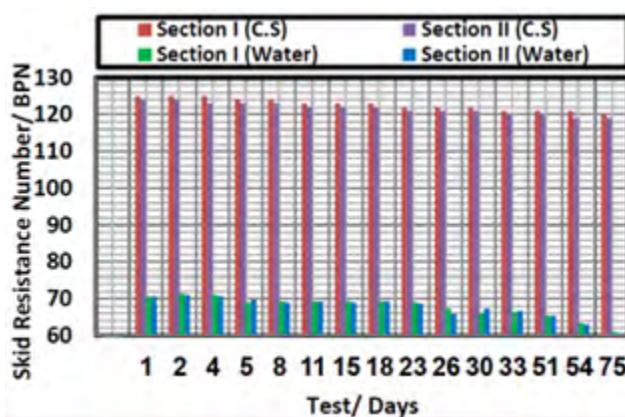
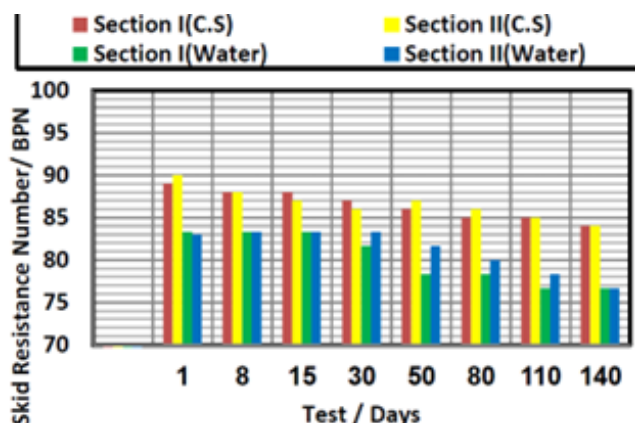


Figure 45: Effet de l'eau sur l'adhérence pour des enrobés sans AE (a) et avec AE (b) au fur et à mesure du temps

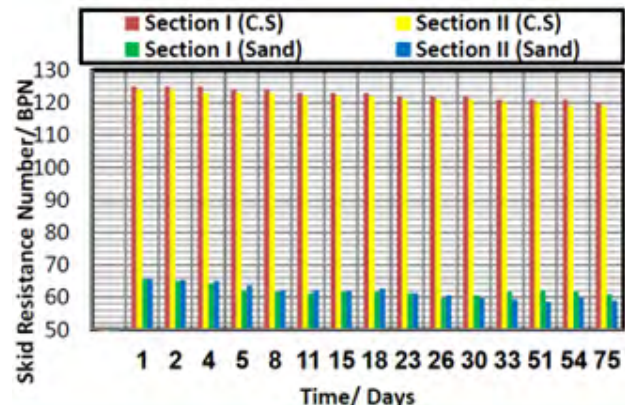
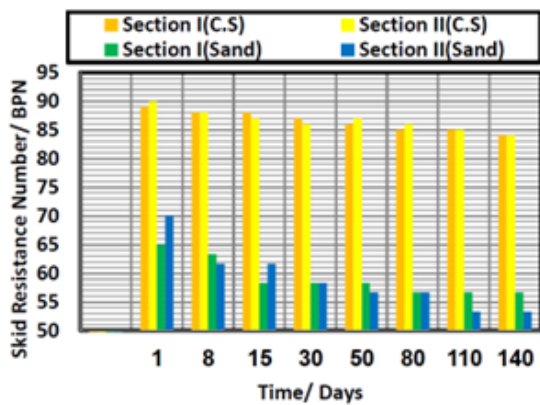


Figure 46: Effet du sable sur l'adhérence pour des enrobés sans AE (a) et avec AE (b) au fur et à mesure du temps

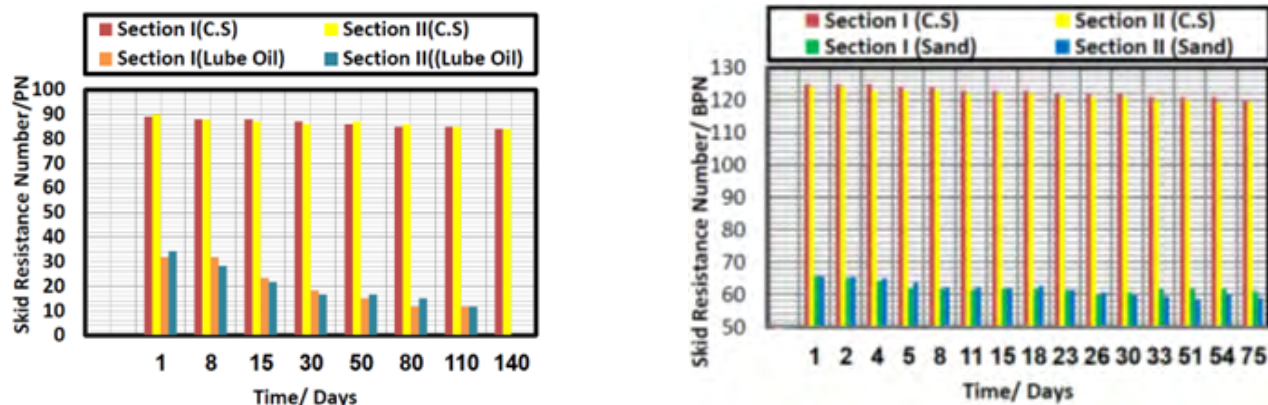


Figure 47: Effet de l'huile sur l'adhérence pour des enrobés sans AE (a) et avec AE (b) au fur et à mesure du temps

■ Fiche de lecture n°27

TITRE	THE INFLUENCE OF A FIELD-AGED ASPHALT BINDER AND AGGREGATES ON THE SKID RESISTANCE OF RECYCLED HOT MIX ASPHALT	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2021	
Auteurs/Organisme	Nathanyawat Sedthayutthaphong^a, Peerapong Jitsangiam^b, Hamid Nikraz^c, Suriyavut Pra-ai^d, Sarintip Tantanee^e and Korakod Nusit^e ^a Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Tha-Po, Mueang, Phitsanulok 65000, Thailand; nathanyawats62@nu.ac.th ^b Center of Excellence in Natural Disaster Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Huai Kaew Road, Mueang, Chiang Mai 50200, Thailand; peerapong@eng.cmu.ac.th ^c School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Bentley Campus, Perth 6102, Australia; h.nikraz@curtin.edu.au ^d GWR Research Unit, School of Engineering, University of Phayao, Mueang, Phayao 56000, Thailand; suriyavut.pr@up.ac.th ^e Centre of Excellence on Energy Technology and Environment, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Tha-Po, Mueang, Phitsanulok 65000, Thailand; sarintipt@nu.ac.th	
Chapitre	-	
Référence	Sustainability, vol.131, Issue 938. https://doi.org/10.3390/su131910938	
Objectifs	Analyser l'effet de forts taux d'AE sur l'adhérence via des mesures de DFT20 réalisées en laboratoire à différents états de polissage	
Résumé	Le développement d'enrobés à chaud contenant des AE constitue un défi en matière de recherche sur les revêtements routiers durables. Il existe de nombreux travaux sur les performances mécaniques des enrobés bitumineux avec AE mais les travaux sur l'adhérence sont encore limités. Ce papier présente les résultats d'une étude sur l'effet du bitume vieilli et des granulats recyclés sur les performances d'adhérence. Les granulats et le bitume des AE ont été caractérisés finement. Le polissage a été simulé en laboratoire. Les valeurs initiales et finales d'adhérence des enrobés à chaud ont été déterminées et corrélées aux caractéristiques des AE. L'adhérence initiale des enrobés avec AE était plus faible que celle du mélange sans AE avec une baisse de la pénétrabilité du liant et de la ductilité du mélange. En revanche à l'état final, de faibles écarts d'adhérence entre les mélanges avec et sans AE ont été observés. Il a également été observé que le niveau d'adhérence final était directement corrélé aux courbes granulométriques des enrobés à chaud avec AE. En effet, la granulométrie	

Domaine	Matériaux, adhérence
Mots Clés	AE, enrobés à chaud, bitume vieilli, polissage
Points forts	Les caractéristiques des matériaux sont fournies de manière très précise (% AE pour chaque fraction granulaire, bitume, etc.) Forts taux d'AE considérés
Points faibles	-

Description détaillée du contenu :

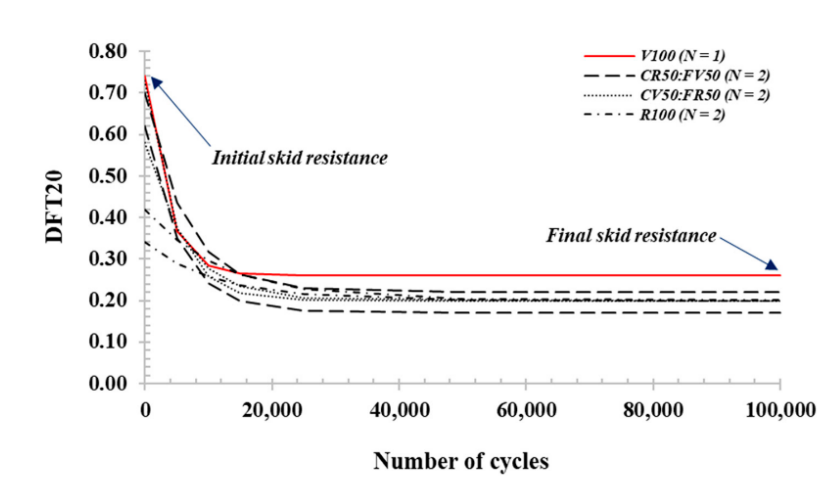
Le bitume d'apport est de grade 60/70 et le taux de bitume dans les AE est de 4,7 %.

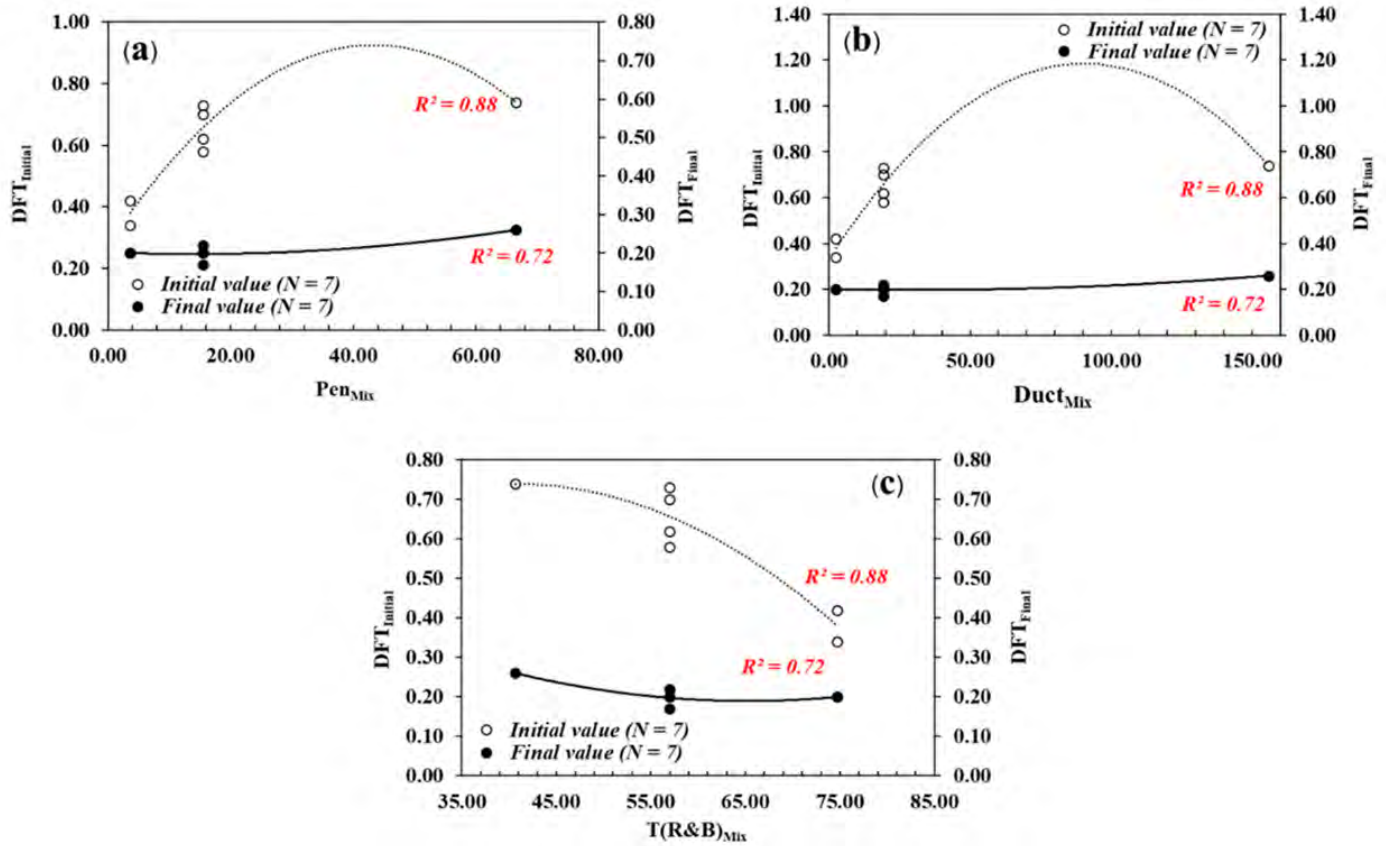
La caractérisation des granulats est faite avec des essais MDE, LA, PSV (52 pour les AE et 54 pour les granulats d'apport).

Quatre types de mélange bitumineux à chaud sont testés : 0 % d'AE, 50 % d'AE pour les granulats 5-20mm, 50 % d'AE pour les petits granulats, 100 % d'AE.

Le polissage est effectué avec la machine TWPD. Des mesures de frottement sont faites à 5000, 10000, 25000, 50000 et 100000 cycles de polissage.

Les mesures d'adhérence sont faites avec le DFT. Les valeurs de DFT20 sont prises en compte avec un niveau initial autour de 0,70 et final de 0,30 pour le mélange de référence. Pour les mélanges à 50 % d'AE, les valeurs de DFT20 varient de 0,40-0,60 à 0,20-0,25. Pour le mélange à 100 % d'AE, les valeurs de DFT20 varient de 0,35-0,40 à 0,20-0,25.





Les valeurs d'adhérence sont directement corrélées aux valeurs des caractéristiques du bitume (pénétrabilité, etc.).

En revanche, de faibles corrélations avec les caractéristiques des granulats sont observées.

Fiche de lecture n°28

TITRE	SKID RESISTANCE PERFORMANCE OF ASPHALT MIXTURES CONTAINING RECYCLED PAVEMENT MATERIALS UNDER SIMULATED WEATHER CONDITIONS	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	2022	
Auteurs/Organisme	Maria Pomoni and Christina Plati Department of Transportation Planning and Engineering, School of Civil Engineering, National Technical, University of Athens (NTUA), 5, Iroon Polytechniou, GR-15773 Athens, Greece; cplati@central.ntua.gr	
Chapitre	-	
Référence	Recycling, vol.7, issue 47 https://doi.org/10.3390/recycling7040047	
Objectifs	Analyser l'effet des ajouts d'AE sur les caractéristiques d'adhérence	
Résumé	L'un des défis liés à l'utilisation de matériaux recyclés dans les structures routières est leur durabilité. Une multitude de recherches ont été menées au fil des années sur divers matériaux recyclés en se focalisant sur les performances structurelles. Néanmoins, un autre aspect crucial est moins étudié à savoir l'adhérence de ces revêtements sous différentes conditions climatiques. Ce papier présente les résultats d'une étude en laboratoire de l'adhérence de différents enrobés bitumineux à chaud (sans AE, avec AE et avec des pellets de caoutchouc). Les enrobés ont été testés à différentes températures et sous différentes conditions de mouillage. L'adhérence a été évaluée à l'aide d'un pendule SRT. Les résultats ont montré que les mélanges recyclés ont des performances similaires à celles des mélanges conventionnels en termes d'adhérence sous différentes conditions de surface et de températures. Dans certains cas, ils ont même obtenu de meilleurs résultats que les mélanges conventionnels.	
Domaine	Matériaux, adhérence, AE	
Mots Clés	AE, adhérence, conditions climatiques, caoutchouc, pendule SRT, contaminants	
Points forts	La caractérisation des matériaux est très précise et bien documentée. Le protocole de test est bien décrit et les conditions de contamination sont variées et représentatives des conditions réelles (sec, mouillées, contaminées par de la poussière, etc.).	
Points faibles	Pas de taux au-delà de 30 % et pas de transposition sur route	

Description détaillée du contenu :

Les formules testées sont : un enrobé bitumineux à chaux avec pellets de caoutchouc, un enrobé bitumineux sans pellets de caoutchouc, des enrobés à chaud avec 15 et 30 % d'AE.

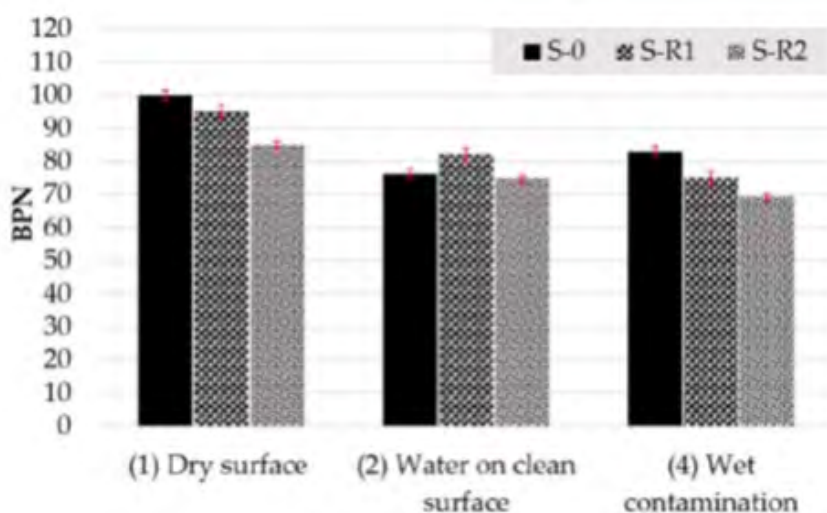
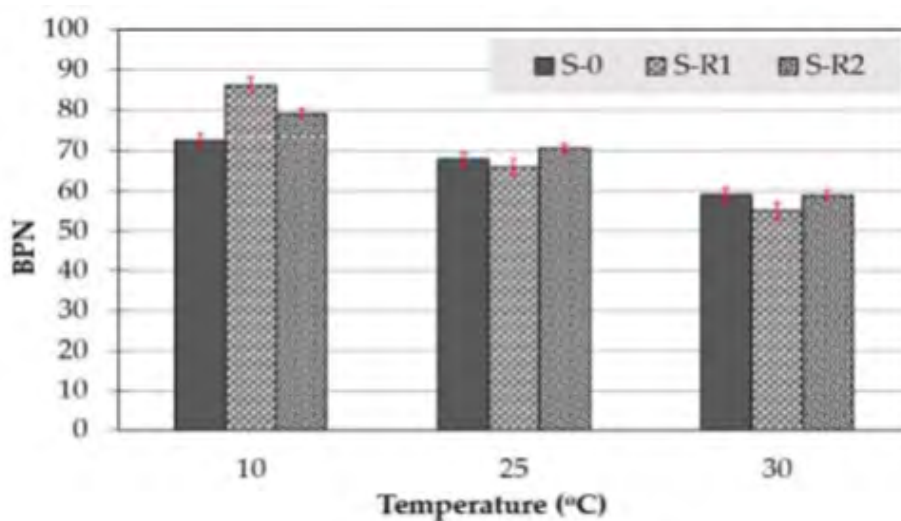
Le bitume est de grade 55/70.

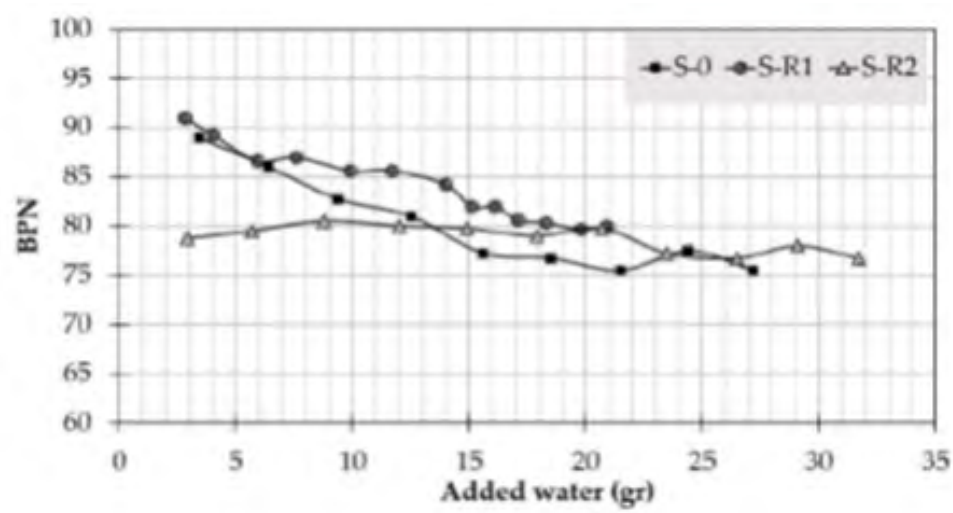
Un ajout de caoutchouc de 10 % en masse de bitume est mis en œuvre.

Des mesures d'adhérence sont réalisées à l'aide du pendule SRT.

Trois températures de l'air de la pièce dans laquelle les enrobés sont testés sont considérées : 10, 15 et 25 °C.

Les conditions de contaminations sont : sec, mouillée et propre, sec et contaminé par de la poussière, mouillée et poussiéreuse, lessivage jusqu'au retour à l'état propre.





■ Fiche de lecture n°29

TITRE	PROPRIÉTÉS DES AGRÉGATS ET GRANULATS (RHÉOLOGIQUES ET GÉOMÉTRIQUES)	
Type de document		Outil
		Méthodologie
	X	Expérimentation
		Autre
Date	Août 2018	
Auteurs/Organisme	Thomas Gabet (IFSTTAR/MAST/MIT), Paul Marsac (IFSTTAR/MAST/MIT), Manuela Lopes Genesseeux	
Chapitre	-	
Référence	Livrable 3.1 – projet ANR IMPROVMURE	
Objectifs	Evaluer le gain d'homogénéité que peut apporter la séparation des agrégats d'enrobés en classes granulaires. Des échantillons d'agrégats d'enrobé (AE0) ont été recomposés (AERC) après séparation en classes granulaires. La teneur en liant et la granulométrie de ces échantillons a été mesurée grâce au vidéogranulomètre VDG40 afin d'évaluer l'homogénéité de ce groupe d'échantillons, en le comparant aux valeurs standard.	
Résumé	Dans la tâche 1 du projet Improvmure dédiée à l'évaluation des AE, la sous-tâche 1.3 traite de la détermination des propriétés des agrégats et des granulats. 3 études ont été réalisées dans ce cadre : 1. une étude sur l'homogénéisation des AE pour montrer l'intérêt de séparer les AE en classes granulaires. 2. une étude sur la caractérisation rapide des AE avec la mise en place d'un essai de péné adapté aux AE dit mini-péné. 3. une étude sur l'influence du recyclage sur les propriétés des AE grâce notamment à l'utilisation du vidéogranulomètre MLPC qui a permis de montrer une évolution relativement faible des propriétés des granulats avec le recyclage. Les granulats perdent un peu de leur angularité, ils s'arrondissent un peu, comme le montre l'évolution du coefficient d'aplatissement. Le type de fabrication et le taux de recyclage influent peu sur les résultats obtenus. Une analyse granulométrique des différents AE, fabriqués pour le projet Improvmure, a confirmé la tendance générale : recycler génère des particules fines, quel que soit le type de recyclage.	
Domaine	Enrobé chaud, enrobé tiède	
Mots Clés	Agrégat d'Enrobé, Wehner & Schulze, enrobé tiède	

Points forts	Comparaison d'échantillons confectionnés en labo et prélevés sur chantiers à partir des mêmes composants (granulats et liant). Techniques chaude et tiède (tiède ou tiède mousse) à 3 taux de recyclage (0 %, 40 %, 70 %) analysées.
Points faibles	La limite principale de l'étude réalisée ici est le manque d'exhaustivité. Les AE testés sont tous issus des matériaux neufs de laboratoire et de l'AE0 commun à tous le projet IMPROVMURE.

Description détaillée du contenu :

Seule la troisième étude sur l'influence du recyclage sur les granulats est présentée ci-dessous car en lien direct avec les propriétés d'adhérence.

L'objectif de cette étude est de montrer l'influence des phases de recyclage, notamment le fraisage sur l'évolution géométriques des granulats, en termes de granulométrie et de forme des granulats. Cette étude expérimentale est réalisée par le biais du vidéogranulomètre laser (le VDG40) de l'IFSTTAR.

Cet appareil d'ombroscopie à base de caméra CCD permet grâce à un algorithme de traitement d'images d'extraire des informations géométriques relatives à chaque granulat (analyse granulométrique, aplatissement, allongement).

Une campagne expérimentale au VDG40 a été réalisée sur différents matériaux bitumineux à différents taux de recyclage, selon différentes techniques de fabrication (chaud, tiède, tiède mousse), ainsi que deux classes granulaires du matériau d'origine.

Ces agrégats ont été fabriqués en laboratoire, posés sur chaussées sans être compactés. Après une période d'1 à 9 mois selon les enrobés, ils ont été fraisés. Ensuite ils ont été désenrobés à l'Asphalt Analysator et passés trois fois au VDG40. Les mesures au VDG40 ont été effectuées sur les fractions granulaires supérieures à 4 mm.

Résultats issus du VDG40 :

- Aplatissement :

- Pas d'effet significatif constaté du paramètre température de fabrication sur l'aplatissement.
- Pour les AE à 40 %, toutes les valeurs sont significativement plus élevées que les valeurs des AE à 70 % de recyclage, pour un même type de fabrication, et dans leur ensemble (c'est-à-dire que toutes les valeurs d'AE à 40 % de recyclage sont plus élevées que toutes les valeurs d'AE à 70 %).

Une pondération linéaire est utilisée pour l'interprétation mais il est difficile d'en tirer des conclusions.

- A priori les matériaux « *s'arrondissent* » avec le fraisage, comme cela a aussi été conclu dans le livrable 4.3 du projet Re-road.

- Angularité :

- Une pondération linéaire est utilisée pour l'interprétation et une approximation acceptable est obtenue.

Toutes les valeurs se situent entre la valeur du matériau de référence et la valeur de l'AE initial.

Cela semble contradictoire, si l'AE initial est moins anguleux que le matériau de référence mais la publi n'apporte pas de réponse définitive.

L'hypothèse la plus probable est que l'angularité varie faiblement avec le recyclage, du moins en laboratoire, et que l'AE0 est peut-être issu d'un matériau moins anguleux que notre matériau de référence.

- Rugosité :

- Les auteurs n'estiment pas être capables d'établir une quelconque corrélation entre la rugosité et le taux de recyclage ou la température de fabrication. Leur analyse sur le sujet est que la fabrication et le rabotage polissent peu les granulats.

Une analyse granulométrique a été effectuée sur les agrégats d'enrobés issus des différentes fabrications, à chaud, tiède et tiède mousse et à différents taux de recyclage 40 % et 70 %. L'analyse des résultats ne fait pas ressortir de corrélation entre la technique de fabrication et la granulométrie ou entre le taux de recyclage et la géométrie.

Le livralbe 4.3 du projet Re-road montre une légère tendance à la fabrication de particules fines.

En conclusion, l'étude de l'influence du recyclage sur les propriétés des granulats a montré une faible influence du recyclage sur l'évolution des propriétés des granulats. On observe peu d'aplatissement, peu de perte de rugosité et peu de perte d'angularité. Les modes de fabrication semblent par ailleurs peu influencer le résultat.

Contributeurs

Auteur :

- V. Cerezo, Université Gustave Eiffel

Contributeurs :

- P. Maillard-Nunes, EGIS
- JM. Deck, Logiroad
- VA. Chavas, Cerema
- D. Chauvet, Cerema
- N. Grignard, Cerema
- M. Bouteldja, Cerema



IDRRIM - PIARC France
9, rue de Berri - 75008 Paris - Tél : +33 1 44 13 32 99
www.idrrim.com - idrrim@idrrim.com
 [@IDRRIM - PIARC France](https://twitter.com/IDRRIM) 
Association loi 1901