

VALORISATION DU BARDEAU D'ASPHALTE POSTCONSOMMATION DANS LES ENROBÉS À CHAUD POUR LES CHAUSSEES NON REVÊTUES

par

Styve Rahim MOUAFO NUENTSA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 19 JUIN 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Styve Rahim Mouafo Nuentisa, 2024



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-Claude Carret, directeur de mémoire
Département en génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Vaillancourt, codirecteur de mémoire
Département en génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel J. Assaf, président du jury
Département en génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, membre du jury
Département en génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 MAI 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Dans le cadre de ce mémoire, je souhaite exprimer ma gratitude profonde envers ceux qui ont joué un rôle essentiel à chaque étape de mon parcours académique. En premier lieu, l'expertise et le soutien de M. Jean-Claude Carret et M. Michel Vaillancourt, respectivement directeur et codirecteur de mes recherches, ont été des pierres angulaires de mon développement professionnel et académique. M. Alan Carter, M. Gabriel Orozco qui ont été présent tout au long de cette recherche. Leur encadrement rigoureux et leur générosité intellectuelle m'ont permis d'explorer de nouveaux horizons dans le domaine de la science des matériaux.

Je tiens également à souligner l'importance de la collaboration et de l'entraide que j'ai trouvées au sein du Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux. L'apport de Bibeau Sylvain, Francis Bilodeau, Juan Mauricio Rios, ainsi que l'engagement de Mohamed Aymen Salhi, étudiant en génie de la construction, ont été cruciaux dans la progression de mes travaux. Leur assistance et leur partage d'expériences ont enrichi mon parcours de recherche.

Je désire également rendre hommage à l'apport précieux des entités qui ont soutenu financièrement ce projet, en particulier le Centre d'études et de recherche intersectorielles en économie circulaire (CERIEC), un acteur majeur sur la thématique de l'économie circulaire au Québec et la régie intermunicipale de traitement des matières résiduelles de Gaspésie (RITMRG). Leur contribution a été déterminante dans la réalisation de cette recherche.

Enfin, je ne saurais terminer sans adresser mes remerciements les plus sincères à ma famille : ma maman Tchuenkam Thérèse et mon feu père Mouafo Samuel, ma sœur Karla. Leur amour, leur soutien inconditionnel et leur compréhension ont été des éléments clés de ma persévérance et de mon succès au début et tout au long de cette aventure académique.

Cette expression de gratitude reflète non seulement mon appréciation pour l'assistance reçue, mais aussi la richesse des interactions humaines qui ont marqué ce parcours.

Valorisation du bardeau d'asphalte postconsommation dans les enrobés à chaud pour les chaussées non revêtues

Styve Rahim MOUAFO NUENTSA

RÉSUMÉ

Dans le cadre de cette recherche collaborative impliquant le CERIEC, la Régie intermunicipale de traitement des matières résiduelles de Gaspésie (RITMRG), Bauval, le Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB), et l'École de technologie supérieure (ÉTS), l'effet de l'intégration de bardeaux d'asphalte post-consommation (BAPC) dans les enrobés bitumineux, a été scruté pour évaluer l'impact sur les propriétés et la performance des mélanges. Les résultats démontrent que les enrobés enrichis de ces matériaux recyclés satisfont aux critères techniques avec des performances équivalentes, voire améliorées, par rapport aux enrobés traditionnels. Notamment, l'enrobé avec 25% de BAPC-Gaspésie et 4% de bitume d'apport a montré un taux de vide de 7%, une stabilité Marshall de 13 341 N pour les éprouvettes trempées et de 15 206 N pour les éprouvettes non trempées, et une tenue à l'eau de 87.7%, surpassant la spécification minimale de 85%. Cette formulation a également exhibé une résilience remarquable à l'orniérage avec un pourcentage d'ornières bien en dessous des seuils définis après 30 000 cycles. L'usage de matériaux divers comme le BAPC de Varennes, le GBR, et les scories, ajustés à 4% de bitume d'apport, a confirmé la possibilité de diminuer l'utilisation de bitume neuf tout en conservant des standards de qualité élevés. Ces découvertes encouragent l'adoption de pratiques de construction plus durables dans le secteur routier, soulignant l'importance d'une caractérisation minutieuse des matériaux recyclés pour garantir la performance et la longévité des enrobés.

Mots-clés : Bardeau d'asphalte, Post consommation, enrobés bitumineux, non revêtues, chaussées

Valorization of recycled asphalt shingles in hot mix asphalt for unpaved roads

Styve Rahim MOUAFO NUENTSA

ABSTRACT

In the context of this collaborative research involving CERIEC, the Régie intermunicipale de traitement des matières résiduelles de Gaspésie (RITMRG), Bauval, the Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB), and the École de technologie supérieure (ÉTS), the effect of integrating recycled asphalt shingles (RAS) into bituminous mixtures was scrutinized to evaluate the impact on the properties and performance of the mixes. The results demonstrate that the mixtures enriched with these recycled materials meet technical criteria with equivalent or even improved performance compared to traditional mixtures. Notably, the mixture with 25% RAS-Gaspésie and 4% added bitumen showed a void content of 7%, a Marshall stability of 13,341 N for soaked specimens and 15,206 N for unsoaked specimens, and water resistance of 87.7%, surpassing the minimum specification of 85%. This formulation also exhibited remarkable resilience to rutting with a rutting percentage well below the defined thresholds after 30,000 cycles. The use of various materials like RAS from Varennes, GBR, and slags, adjusted to 4% added bitumen, confirmed the possibility of reducing the use of new bitumen while maintaining high quality standards. These discoveries encourage the adoption of more sustainable construction practices in the road sector, highlighting the importance of meticulous characterization of recycled materials to ensure the performance and longevity of the mixtures.

Keywords: Recycled asphalt shingles, recycling, asphalt pavement, unpaved, road

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1 Généralités sur les chaussées et enrobés bitumineux.....	3
1.1.1 Structure de la chaussée	3
1.1.2 Dégradation et entretien des chaussées.....	4
1.1.3 Caractéristiques et propriétés des composants des enrobés	8
1.2 Formulation à chaud des EB	11
1.3 Enrobés de surfacage à couches minces	13
1.4 Bardeaux d’asphalte.....	14
1.4.1 Usage et composition des bardeaux d’asphalte	14
1.4.2 Recyclage et revalorisation des bardeaux d’asphalte post consommation	15
1.5 Incorporation de bardeaux d’asphalte dans les matériaux de chaussées.....	18
1.5.1 Incorporation et performances dans les enrobés bitumineux.....	18
1.5.2 Mobilisation du liant présent dans les bardeaux d’asphalte postconsommation	19
CHAPITRE 2 PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	25
2.1 Problématique	25
2.2 Objectifs du projet.....	26
CHAPITRE 3 CAMPAGNE EXPERIMENTALE ET PRESENTATION DES MATERIAUX.....	31
3.1 Description des différents essais réalisés	31
3.1.1 Essais de formulation.....	32
3.1.2 Essais pour déterminer les performances.....	39
3.2 Description de la campagne expérimentale	41
3.2.1 Formulation d’un enrobé de référence sans BAPC.....	44
3.2.2 Étude de l’impact de la teneur en BAPC sur la compactibilité et propriétés volumétriques des enrobés	45
3.2.3 Influence de la teneur en BAPC sur la tenue à l’eau et l’orniérage	46
3.2.4 Impact des propriétés du BAPC sur les caractéristiques volumétriques des enrobés	48
3.2.5 Influence du remplacement intégral des granulats et de l’incorporation extensive de matériaux recyclés sur les propriétés de l’enrobé	49
3.3 Description des enrobés confectionnés	50
3.3.1 Composition et granulométries des enrobés utilisés.....	50
3.4 Description des matériaux utilisés	52
3.4.1 Le bitume	52
3.4.2 Émulsion	53

3.4.3	Caractéristiques des granulats utilisés	54
3.4.4	Matières résiduelles	56
3.4.5	Pierre concassée	62
CHAPITRE 4	PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS	65
4.1	Formulation d'un enrobé de référence R5.8S0G sans BAPC.....	65
4.1.1	Courbe granulométrique du mélange.....	65
4.1.2	Densité maximale, densité brute et % de vides du mélange	67
4.1.3	Essai de tenue à l'eau	68
4.2	Étude de l'impact de la teneur en BAPC sur la compactibilité et propriétés volumétriques des enrobés.....	69
4.2.1	Courbes granulométriques des différents mélanges étudiés	70
4.2.2	Influence de l'ajout de BAPC sur les teneurs en vides d'éprouvettes compactées avec la marteau Marshall ayant différentes teneurs en bitume d'apport.....	71
4.2.3	Influence de l'ajout de BAPC sur la compaction à l'aide de la PCG	75
4.3	Influence de la teneur en BAPC sur la tenue à l'eau et l'orniérage	79
4.3.1	Tenue à l'eau	79
4.3.2	Orniérage.....	82
4.3.3	Essai d'orniérage modifié	83
4.4	Influence des propriétés du BAPC sur les propriétés volumétriques des enrobés : exemple pour une teneur de 10% en BAPC.....	85
4.5	Étude d'un nouveau mélange avec 10% BAPC-Varennnes / 10% GBR	88
4.5.1	Présentation du nouveau combiné granulométrique	89
4.5.2	Détermination de la teneur en bitume d'apport à partir des propriétés volumétriques.....	89
4.5.3	Impact sur la compaction	92
4.5.4	Influence sur la tenue à l'eau et l'orniérage.....	94
CONCLUSION	99
RECOMMANDATIONS	103
ANNEXE I	FICHE TECHNIQUE DE RÉFÉRENCE	105
ANNEXE II	DESCRIPTION ET SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES MATÉRIAUX FOURNIS PAR BAUVAL	107
ANNEXE III	DESCRIPTIONS TECHNIQUES DES DIFFÉRENTS TYPES DE BITUMES UTILISÉS.....	111
ANNEXE IV	COURBES GRANULOMÉTRIQUES DES DIFFÉRENTS COMPOSANTS GRANULAIRES ET BAPC	113
ANNEXE V	ÉTAPES DE CALCULS POUR ESTIMATION DU BITUME D'AJOUT THÉORIQUE.....	115

ANNEXE VI	DESCRIPTION DES ENROBÉS CONFECTIONNÉS	119
ANNEXE VII	ÉNERGIE DE COMPACTION.....	121
ANNEXE VIII	TENUE À L’EAU.....	123
ANNEXE IX	CHOIX DES COMPOSANTS – ENROBÉS (norme 4202)	125
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	127

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Composition en pourcentage des constituants de bardeaux d'asphalte15
Tableau 1.3	Différentes méthodes de quantification de bitume contenu dans le BAPC et GBR24
Tableau 3.1	Présentation des essais réalisés et nombres de répétitions à différentes phases du programme d'étude32
Tableau 3.2	Composition et granulométries des différents enrobés confectionnés. Les chiffres en rouge correspondent aux exigences de la fiche technique du matériau de référence51
Tableau 3.3	Caractéristiques des différents bitumes PG 64E-28 et PG 58S-28 (Données des fournisseurs)53
Tableau 3.4	Caractéristiques de l'émulsion de bitume ENVIRO-COLLE par McAsphalt.....54
Tableau 3.5	Propriétés des granulats utilisés55
Tableau 3.6	Teneur en eau (%) des BAPC provenant de la Gaspésie et varennnes58
Tableau 3.7	Résultats de l'essai d'ignition sur le BAPC Gaspésie et BAPC Varennes59
Tableau 3.8	Résultats de l'essai d'ignition sur le GBR.....60
Tableau 3.9	Description granulométrique des différentes matières résiduelles62
Tableau 4.1	Composition de l'enrobé de référence65
Tableau 4.2	Caractéristiques volumétriques de l'enrobé de référence67
Tableau 4.3	Résultats de l'essai de tenue à l'eau pour l'enrobé de référence69
Tableau 4.4	Vérification de conformité de l'enrobé de référence à la tenue à l'eau69
Tableau 4.5	Energie de compaction des enrobés en fonction des teneurs en vides.....79
Tableau 4.6	Vérification de conformité des enrobés B4.0S25G et B5.0S10G à la stabilité Marshall et fluage.....81

Tableau 4.7	Energie de compaction des enrobés B5.0S10G et B4.0B10B94
Tableau 4.8	Vérification de conformité de l'enrobé B4.0B10B à la stabilité Marshall et fluage.....95

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Coupe type d'une chaussée4
Figure 1.3	Processus général de production des bardeaux d'asphalte14
Figure 1.4	Image interne d'une coupe de bardeau d'asphalte15
Figure 3.1	Descriptif de la codification des enrobés confectionnés31
Figure 3.2	Exemple d'éprouvettes obtenues à la PCG38
Figure 3.3	Ornièreur MLPC40
Figure 3.4	Équipements de tenue à l'eau a. dessiccateur b. bain chaud c. mâchoire pour stabilité Marshall41
Figure 3.5	Cheminement de la campagne expérimentale.....43
Figure 3.6	a. Compactage de la pierre concassée b. Compactage de l'enrobé48
Figure 3.7	Courbes granulométriques des granulats utilisés56
Figure 3.8	Courbes granulométriques du BAPC Gaspésie et BAPC Varennes57
Figure 3.9	BAPC Gaspésie avant tamisage et après tamisage (< 2,5 mm)58
Figure 3.10	Courbe granulométrique du GBR60
Figure 3.11	Courbe granulométrique des scories61
Figure 3.12	Essai Proctor modifié sur la pierre concassée BOMIX 0-3/4 po/in.....63
Figure 4.1	Courbe granulométrique de l'enrobé de référence.....66
Figure 4.2	Courbes granulométriques des mélanges à 10% et 25% BAPC-Gaspésie71
Figure 4.3	Évolution de la teneur en vides en fonction de la teneur en bitume d'apport pour les mélanges avec 10% et 25% BAPC-Gaspésie73
Figure 4.4	Comparaison des pourcentages de bitume d'ajout théoriques selon les facteurs de mobilisation fixés par le MTMD avec le pourcentage obtenu

	selon des critères volumétriques pour les mélanges avec 10% et 25% BAPC-Gaspésie	74
Figure 4.5	Présentation de l'évolution des % de vides à différentes girations.....	78
Figure 4.6	Stabilité Marshall (N) des enrobés R5.8S0G, B4.0S25G et B5.0S10G	80
Figure 4.7	Tenue à l'eau des enrobés R5.8S0G, B5.0S10G et B4.0S25G.....	82
Figure 4.8	Évolution du pourcentage d'ornières pour les mélanges B4.0S25G	83
Figure 4.9	Comparaison de l'évolution du pourcentage d'ornières pour les essais d'orniérage classique et modifié du mélange B4.0S25G.....	84
Figure 4.10	Présentation de l'éprouvette B4.0S25G avant et après le test d'orniérage modifié	85
Figure 4.11	Courbes granulométriques des mélanges à 10% BAPC-Gaspésie et 10% BAPC Varennes de compositions granulaires identiques (TV/Hummer)	86
Figure 4.12	Comparaison des Propriétés volumétriques obtenues des éprouvettes Marshall 60 coups avec l'enrobé de référence, 10% BAPC Varennes et Gaspésie de compositions granulaires identiques.....	88
Figure 4.13	Courbes granulométriques des mélanges à 10% BAPC-Gaspésie et 10% BAPC-Varennes de compositions granulaires différentes	89
Figure 4.14	Évolution de la teneur en vides en fonction de la teneur en bitume d'apport obtenues des éprouvettes Marshall 60 coups avec 10% BAPC- Varennes/10%GBR.....	90
Figure 4.15	Bitume d'ajout théorique et expérimental pour les mélanges (10% BAPC-Varennes) avec 25% et 40% de mobilisation selon le MTMD	92
Figure 4.16	Présentation de l'évolution des % de vides à différentes girations à la PCG des mélanges B5.0S10G et B4.0B10B.....	93
Figure 4.17	Stabilité Marshall (N) des enrobés B5.0S10G et B4.0B10B	95
Figure 4.18	Tenue à l'eau des enrobés B5.0S10G et B4.0B10B	96
Figure 4.19	Évolution du pourcentage d'ornières pour les mélanges B5.0S10G et B4.0B10B.....	98

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
APA	Asphalt Pavement Analyser
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAPC	Bardeau d'Asphalte Post Consommation
BAPF	Bardeau d'Asphalte Post Fabrication
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
BTU	British Thermal Unit
CERIEC	Centre d'études et de recherches intersectorielles en économie circulaire
CEI	Compaction Energy Index
EB	Enrobé bitumineux
EG	Enrobés grenus
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
ESG	Enrobé semi-grenu
GB	Grave Bitume
GBR	Granulats Bitumineux Recyclés
GNM	Grosseur Nominale Maximale
HMA	Hot Mix Asphalt
ISSA	International Slurry Surfacing Association
LC	Laboratoire des Chaussées du MTQ
LCMB	Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux de l'ÉTS
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LVE	Comportement viscoélastique linéaire
MLPC	Matériau du Laboratoire des Ponts et Chaussées
MTMD	Ministère des Transports et de la Mobilité durable
MTMDET	Ministère des Transports, Mobilité Durable et Électrification des Transports du Québec
MTQ	Ministère des Transports du Québec
PCG	Presse à Cisaillement Giratoire
PG	Performance grade – Grade de performance
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RAS	Recycled Asphalt Shingles
RITMR	Régie Intermunicipale de Traitement des Matières Résiduelles
RITMRG	Régie Intermunicipale de Traitement des Matières Résiduelles de Gaspésie
SHRP	Strategic Highway Research Program
TSR	Tensile Strength Ratio
TV	Tout Venant
VMA	Voids in the Mineral Aggregate

INTRODUCTION

Le BAPC est actuellement une source importante de déchets non dégradables dans les sites d'enfouissement et environ 1,25 million de tonnes sont produites chaque année au Canada. Le recyclage de ce déchet peut aider à en tirer le meilleur parti pour contribuer au développement durable et la revalorisation. C'est dans ce sens qu'a été initié ce projet en étroite collaboration avec le CERIEC, un acteur majeur sur la thématique de l'économie circulaire au Québec, la régie intermunicipale de traitement des matières résiduelles de Gaspésie (RITMRG) qui cherche une filière de valorisation pour le BAPC, Bauval qui est un acteur majeur dans le secteur de la construction au Québec, le Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) où s'est déroulé la totalité de la partie expérimentale et l'École de technologie supérieure (ÉTS). L'enrobé incorporé de BAPC sera utilisé comme recouvrement pour des chaussées rurales non revêtues pour différentes routes très nombreuses en régions et généralement difficiles à entretenir.

En raison de sa composition, le BAPC est particulièrement adaptés à une utilisation dans les chaussées asphaltées pour pallier aux nombreux problèmes environnementaux et aussi réduire les coûts non seulement au niveau d'apport en liant bitumineux mobilisé, mais aussi en granulats. Des études indiquent toutefois que le BAPC peut être utilisé comme matériau granulaire dans les sous-couches de chaussée et dans les enrobés bitumineux lorsqu'il est employé dans des quantités appropriées. Selon le MTQ, il peut être ajouté à certains enrobés bitumineux (EB) jusqu'à 5% en masse. Cette limite se focalise plus sur l'utilisation en zone 1 qui requiert des spécifications rudes afin d'éviter la défaillance de l'enrobé sur des routes très sollicitées. En régions et surtout dans les zones à faibles trafiques et basses sollicitations climatiques, il est possible d'incorporer beaucoup plus en termes de masse. Néanmoins, il est important de se rassurer de l'impact de l'ajout du BAPC sur les performances de l'enrobé et aussi sur d'autres propriétés tel que volumétriques et de compactibilité.

Ainsi, pour répondre à cette problématique, les études réalisées dans le cadre de ce projet au LCMB consistent à fabriquer des enrobés avec différentes teneurs de BAPC à savoir 10% et

25% tout en suivant étroitement les limites et spécifications provenant de la fiche technique Micro Hi-Tech édition novembre 2016 par Bauval. Pour réaliser cela, une revue de littérature a été préalablement conduite et ensuite différents enrobés avec différentes teneurs en bitumes ont été confectionnés. Des essais ont été réalisés à savoir la Compaction Marshall, l'aptitude au compactage par la Presse à cisaillement giratoire (PCG), Tenue à l'eau et orniérage. Enfin, dans le souci d'avoir un aperçu sur le comportement des mélanges choisis sur la route, un test d'orniérage modifié a été mis sur pied et la mise en œuvre en chantier par Bauval a été effectué.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Généralités sur les chaussées et enrobés bitumineux

1.1.1 Structure de la chaussée

Avec la croissance du secteur automobile, le nombre de voitures en circulation augmente chaque année, ce qui implique que des revêtements de haute qualité sont nécessaires pour répondre aux exigences des zones à trafic élevé. En conséquence, les chaussées modernes en EB comportent désormais plusieurs couches au lieu d'une seule couche granulaire. L'ingénierie des chaussées a considérablement évolué au cours des 100 dernières années en raison de la composition structurelle, des nouveaux matériaux, de la technologie de construction, des méthodes de conception, des besoins en matière de trafic, des conditions environnementales et du recyclage des matériaux (Y. Liu et al., 2020).

Le volume de trafic attendu, les types de sol, le climat, le coût et l'accessibilité des matériaux de construction dans la région jouent tous un rôle dans la détermination du meilleur type et de la meilleure conception de la chaussée. Néanmoins, la plupart des routes du Québec (>90%) sont recouvertes de chaussées souples et de haut en bas, une structure de chaussée typique se compose de (Lalonde Renaud, 2015) :

- Un revêtement de chaussée, généralement en asphalte ou en béton, qui assure la répartition uniforme des charges tout en imperméabilisant la structure de chaussée et en offrant une adhérence minimale ;
- Une fondation granulaire, généralement en gravier naturel ou concassé qui procure un drainage efficace et aussi une uniformisation des charges

- Une sous-fondation en majeure partie faite de sable et gravier pour assurer la répartition des charges, le drainage de la fondation et l'atténuation des impacts du gel
- Un sol d'infrastructure constituée du sol naturel déjà présent et/ou de remblais granulaires. La composition et l'épaisseur des couches de fondation et de sous-fondation sont déterminées par les propriétés intrinsèques du sol d'infrastructure

Néanmoins, la plupart des routes au Québec sont constitués uniquement d'une couche de base et de surface tel qu'illustrer par la Figure 1.1 ci-dessous.

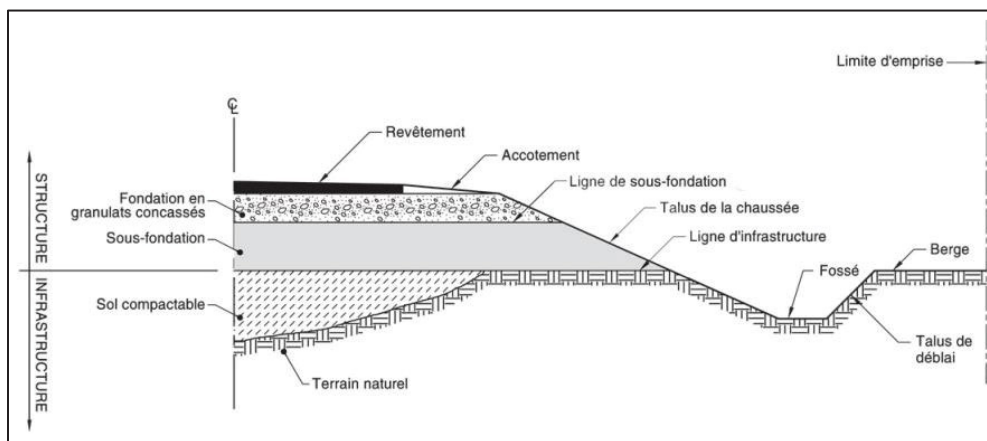


Figure 1.1 Coupe type d'une chaussée
Tirée de ministère des Transports du Québec (2013) Tome II - Structure
de chaussée DN 001

1.1.2 Dégradation et entretien des chaussées

La principale fonction d'une chaussée est de fournir une surface de roulement raisonnablement lisse (faible rugosité) qui est essentielle pour le confort de conduite, et au fil des ans, elle est devenue la mesure de la perception d'une route par les usagers (Rèche, 2004). La rugosité peut provenir d'un certain nombre de causes à savoir une déformation structurelle (Susanna et al., 2017). Outre le confort de conduite, les conducteurs attendent également une sécurité maximale sur la route. L'impression d'insécurité, surtout par temps humide, peut découler d'une diminution de l'adhérence entre le pneu et la surface de la route (Benti et al., 2018). Une

chaussée doit donc offrir une friction et une texture de surface suffisantes pour assurer la sécurité des usagers de la route dans toutes les conditions. Le sol de support sous la chaussée est communément appelé la sous-couche. Si elle est soumise à des contraintes excessives dues aux charges exercées par les essieux, elle se déformera et ne pourra plus soutenir ces charges efficacement. Ainsi, la chaussée doit posséder une capacité structurelle adéquate (résistance et épaisseur) pour répartir efficacement les charges réelles et éviter de dépasser la résistance de la couche de fondation (Lacoffe, 2014). La surface de la chaussée joue le rôle d'une barrière imperméable qui prévient la saturation des couches de support situées en dessous en empêchant l'infiltration de l'humidité.

La dégradation de la chaussée est généralement causée par des facteurs environnementaux, les charges de trafic et la dégradation des propriétés des matériaux qui la constitue. Les quatre principales formes de dégradations courantes de la surface des chaussées comprennent la fissuration, la déformation de la surface, la désintégration (comme les nids-de-poule, par exemple) et les défauts de surface (AltanYılmaz, 2016; Benti et al., 2018; Jiang et al., 2022).

1.1.2.1 La fissuration

Les deux types de fissures les plus courantes dans les chaussées sont la fissuration par fatigue, également connue sous le nom de fissure alligator, et les fissures longitudinales. La fissuration par fatigue se caractérise par une série de fissures interconnectées formant de petits morceaux de chaussée irréguliers, résultant d'une défaillance de la couche de surface ou de base due à une charge de trafic répétée. En revanche, les fissures longitudinales se développent parallèlement à la ligne centrale de la chaussée (Agal, 2005; Rohanatasha, 2019). Elles peuvent être causées par le soulèvement due au gel, par des défaillances de joints, ou elles peuvent être induites par la charge. La compréhension de la cause est essentielle pour choisir la réparation appropriée. En revanche, les fissures transversales se forment presque perpendiculairement à l'axe de la chaussée. Elles sont généralement espacées de manière régulière et partagent certaines des causes des fissures longitudinales (Bathias & Baïlon, 1980). Elles commencent généralement par des fissures capillaires ou très étroites et s'élargissent avec le temps (LANGLOIS, 1987). Et finalement, La fissuration par réflexion qui se produit lorsqu'une

chaussée est recouverte d'un béton bitumineux chaud et que les fissures se reflètent à travers la nouvelle surface. Cette fissuration est appelée fissuration par réflexion car elle reproduit le motif des fissures présentes dans la structure de la chaussée sous-jacente. Avant d'appliquer des revêtements ou des couches de roulement, il est essentiel de réparer correctement ces fissures (Pirmohammad & Ayatollahi, 2020).

1.1.2.2 Déformation de la surface

Cela découle d'une faiblesse dans une ou plusieurs couches de la chaussée, qui ont subi un mouvement post-construction. Ces déformations peuvent être associées à des fissures. Elles représentent un danger pour la circulation. Les principales formes de déformations de surface sont (Adlinge & Gupta, 2013):

L'orniérage, qui est le déplacement du matériau de la chaussée créant des canaux dans la trajectoire des roues. Une orniérage très sévère peut retenir l'eau dans les ornières, souvent causé par la rupture d'une ou plusieurs couches de la chaussée (Meunier et al., 2011). La largeur de l'ornière indique la couche défaillante : une ornière étroite témoigne généralement d'une défaillance de la surface, tandis qu'une ornière large indique une défaillance de la couche de fondation. Un compactage inadéquat peut favoriser la formation d'ornières. Les ornières mineures en surface peuvent être remplies à l'aide de traitements appropriés. Pour des ornières plus profondes, un calage avec une couche de nivellement est souvent nécessaire, suivie de l'application d'un revêtement (Ben Salem, 2017). Si l'enrobé de surface est instable, le recyclage de la surface peut être envisagé. En cas de problème au niveau de la couche de fondation, une rénovation ou une reconstruction complète peut s'avérer nécessaire.

Le glissement, qui est une forme de mouvement plastique dans la couche de surface qui crée un bombement localisé de la chaussée (Hellel et al., 2013). Les emplacements et les causes du bombement sont similaires à ceux des ondulations. Les bombements mineurs sont réparés en les enlevant et en les remplaçant (Adlinge & Gupta, 2013).

1.1.2.3 La désintégration

Elle se manifeste par la détérioration progressive de la chaussée en petits morceaux détachés. Si la désintégration n'est pas réparée dans ses premiers stades, une reconstruction complète de la chaussée peut être nécessaire. Les deux types de désintégration les plus courants sont les suivants :

Les nids-de-poule, caractérisés par des cavités en forme de cuvette, sont des signes de défaillance progressive. Initialement, de petits morceaux de la couche supérieure sont éjectés. Avec le temps, cette dégradation s'étend vers les couches inférieures de la chaussée (Bourg, 2014). Ils se forment souvent dans des zones de mauvais drainage, où la chaussée se détériore sous l'impact de la circulation, en raison d'une résistance insuffisante d'une ou de plusieurs couches de la chaussée, souvent accompagnée de problèmes d'humidité (Naturels, 2020). La plupart des nids-de-poule pourraient être évités si les causes sous-jacentes étaient traitées avant leur formation. Les réparations, telles que l'excavation ou la reconstruction, peuvent être nécessaires pour les nids-de-poule étendus.

Un patch est une section de la chaussée qui a été retirée et remplacée. Les rustines sont généralement utilisées pour réparer les défauts d'une chaussée ou pour couvrir une tranchée de service public. Si une rustine échoue, cela peut entraîner une défaillance plus large de la chaussée environnante. Certains considèrent les rustines comme des défauts de la chaussée, bien que cela soit moins vrai pour les rustines de haute qualité, telles que les rustines semi-permanentes, par rapport aux rustines jetées et roulées qui ne sont qu'une simple couverture. La reconstruction de la chaussée n'est nécessaire que si les problèmes sous-jacents ont causé la formation de nids-de-poule (Adlinge & Gupta, 2013; Wang et al., 2024).

1.1.2.4 Défauts de surface

Les défauts de surface sont liés à des problèmes dans la couche superficielle. Les types de défauts de surface les plus courants sont :

Le ravalement est la perte de matériau de la surface de la chaussée (Adlinge & Gupta, 2013). Il est le résultat d'une adhérence insuffisante entre le liant bitumineux et le granulat. Au départ, les granulats fins se détachent et laissent de petites taches rugueuses à la surface de la chaussée. Au fur et à mesure que la désintégration se poursuit, des granulats plus gros se détachent, laissant des surfaces plus rugueuses. L'effritement peut être accéléré par la circulation et le gel. Le problème peut être réparé avec une couche de roulement ou un revêtement.

Le ressuage est défini comme la présence d'un excès d'asphalte sur la surface de la route qui crée des plaques de liant bitumineux. L'excès de liant bitumineux réduit l'adhérence de la chaussée, qui peut devenir très glissante lorsqu'elle est mouillée, créant ainsi un risque pour la sécurité (Morin, 2022; PIARC, 2023). Ce phénomène est dû à une teneur trop élevée en ciment bitumineux dans le mélange, l'utilisation d'un liant bitumineux dont la viscosité est trop faible (trop fluide), une couche d'apprêt ou d'accrochage trop lourde, ou une couche de scellement mal appliquée (BOUTEBAK, 2023). Il se produit plus souvent par temps chaud, lorsque le liant bitumineux est moins visqueux (plus fluide) et que la circulation plus intense force l'asphalte à la surface.

Le polissage est l'usure des granulats à la surface de la chaussée sous l'effet de la circulation (Edjeou et al., 2022). Il peut donner lieu à une surface dangereuse à faible frottement. Une couche de roulement mince permettra de réparer la surface.

1.1.3 Caractéristiques et propriétés des composants des enrobés

1.1.3.1 Les agrégats

Les agrégats, l'un des matériaux les plus importants du secteur de la construction, constituent la majeure partie d'un revêtement d'asphalte (Dumont, 2005). La plupart du temps, les agrégats sont produits naturellement à partir de minéraux, mais ils subissent parfois un traitement mécanique supplémentaire pour les rendre plus adaptés à des applications particulières. Les revêtements en asphalte utilisent souvent également des agrégats synthétiques, qui sont souvent des scories de haut fourneau provenant de l'industrie sidérurgique. Les trois types

d'agrégats naturels utilisés dans la création d'un revêtement d'asphalte sont la pierre concassée, le gravier et le sable. Selon la densité, les granulats (composants minéraux) représentent environ 95 % de la masse totale de l'enrobé et 80 à 85 % de son volume (Vavrik et al., 2002). C'est un groupe de particules de tailles et de formes différentes. Les granulats peuvent offrir une surface lisse de roulement ou une surface anguleuse selon la méthode de dépôt ou d'extraction. Les roches sédimentaires, métamorphiques et ignées sont les trois classifications géologiques des roches qui constituent les agrégats naturels. En général, les calcaires présentent une bonne adhérence avec le bitume, contrairement aux matériaux siliceux (Lédée et al., 2005; Mohamed Ibrahim, 2020). Cependant, comme l'adhérence entre un pneu et un granulat est généralement faible, il n'est pas conseillé d'utiliser ce type de roche pour une couche de roulement. Parfois, des mélanges de granulats distincts, aux caractéristiques très différentes, sont utilisés pour obtenir certains résultats.

La granularité est l'aspect le plus crucial d'un agrégat qui peut affecter la performance d'un revêtement d'asphalte par sa granulométrie ou son calibrage. La distribution de la taille des particules, exprimée en pourcentage du poids total, est connue sous le nom de granulométrie. Les différentes ouvertures de tamis utilisées pour l'examen de la distribution granulométrique correspondent à une taille minimale "d" et à une taille maximale "D" pour chaque fraction (Sousa et al., 1998).

Le poste d'enrobage à chaud produit lui-même une certaine quantité de charge minérale en raison de la détérioration des agrégats pendant les processus de séchage et de mélange. Cette charge minérale produite est collectée à l'aide d'un " dépoussiéreur à sacs ", un type de dépoussiéreur à sec. Cette poussière recueillie, souvent appelée " fines de dépoussiérage ", est réintégrée dans le mélange bitumineux pour deux raisons, à savoir servir de charge minérale nécessaire dans le mélange d'asphalte à chaud (Y. Chen et al., 2022). Il est parfois nécessaire d'ajouter une charge minérale supplémentaire aux fines du dépoussiéreur à sacs. Puis, En recyclant la poussière dans le mélange d'asphalte plutôt que de la rejeter dans l'air ou de la collecter et de la déverser dans une décharge, les normes environnementales peuvent être respectées (Y. Chen et al., 2022).

Autres caractéristiques tout aussi importantes que la granulométrie sont la Résistance aux efforts, la compatibilité avec le liant (F. Guo et al., 2020) et les performances de surface.

1.1.3.2 Échelle Liant

Le terme "liant" est un terme courant pour désigner la colle ou l'adhésif utilisé dans les revêtements en enrobés (Addaci, 2008). Les goudrons et les liants d'asphalte sont des exemples de ces liants liquides. Les liants d'EB peuvent être fabriqués à partir de pétrole ou provenir de la nature. Selon l'American Society for Testing and Materials (ASTM), le bitume est un groupe de matériaux cimentaires solides, semi-solides ou visqueux, de couleur noire ou foncée, composés principalement d'hydrocarbures de poids moléculaire élevé. L'asphalte, les goudrons, les brais et l'asphaltite sont des exemples de ce groupe (ASTM 2001b). Le liant d'asphalte est responsable de la flexibilité, de la liaison des agrégats et des propriétés d'étanchéité d'un revêtement d'asphalte (Addaci, 2008). Le liant est communément appelé " ciment bitumineux " en Amérique du Nord et " bitume " en Europe. Sous les auspices du United States Strategic Highway Research Program (SHRP), le terme liant, ou plus précisément liant bitumineux, a été développé dans un langage plus récent pour inclure les ciments bitumineux modifiés, les ciments bitumineux non modifiés, les émulsions bitumineuses et les coupes bitumineuses.

La haute cohésion du bitume, qui l'empêche de se désagréger trop rapidement sous les nombreuses contraintes qu'il subit, est sa propriété essentielle. Afin d'assurer la stabilité de la structure granulaire de la chaussée sous les contraintes mécaniques, thermiques et climatiques auxquelles elle est soumise en service, il est intimement mêlé au squelette granulaire en raison des importantes variations de sa viscosité avec la température. Même si le bitume représente moins de 6 % du poids de l'enrobé, les fluctuations de la rigidité de l'enrobé provoquées par les contraintes mécaniques et thermiques (Bordjiba & Guenfoud, 2018) de la route sont principalement déterminées par les propriétés du bitume. Par ailleurs, le bitume est employé pour ce type de nécessité depuis l'Antiquité en raison de ses qualités d'étanchéité, notamment face à l'action de l'eau (Di Benedetto & Corté, 2004).

Les émulsions d'asphalte sont des systèmes biphasés constitués de ciment bitumineux et d'eau, deux liquides non miscibles. Comme le ciment bitumineux est réparti dans la phase aqueuse continue, le système est liquide à température ambiante (Thanaya et al., 2009). Les émulsions d'asphalte peuvent être utilisées dans les régions où l'utilisation d'asphalte coupé pour la construction et l'entretien des revêtements est interdite en raison de leurs émissions d'hydrocarbures faibles ou inexistantes. Les émulsions peuvent également être utilisées pour recouvrir les surfaces de granulats humides, ce qui réduit la quantité de carburant nécessaire pour chauffer les granulats pendant le séchage. Une émulsion d'asphalte se compose d'environ 60 % de bitume et de 40 % de solution savonneuse (SIDIBE AISSATA, 2020). La solution savonneuse est composée d'eau et d'une petite quantité d'un émulsifiant chimique, généralement entre 0,2 et 3 % du poids de l'émulsion. La classification d'une émulsion d'asphalte est également déterminée par l'émulsifiant chimique (James, 2006). Dans l'utilisation typique d'une chaussée, les émulsions d'asphalte se divisent en deux catégories. Les particules d'asphalte sont chargées positivement dans les émulsions cationiques et négativement dans les émulsions anioniques (Jain & Singh, 2021).

1.2 Formulation à chaud des EB

Les enrobés les plus populaires au Québec sont l'enrobé semi-grenu GNM de 10 mm (ESG10) et l'enrobé grave bitume (GB) de 20 mm d'épaisseur (GB20), qui sont utilisés respectivement comme base et comme enrobé de surface (Kotronis, 2020). Le GB20 est un enrobé axé sur la couche de base (Kotronis, 2020). Deuxième enrobé le plus utilisé au Québec et en 2014, le GB20 représentait 18,6 % des tonnes totales posées sur les routes de cette province (Paradis, 2015). Son faible pourcentage de bitume (3,0 % à 4,5 %) lui confère une bonne résistance à l'orniérage. Mais en raison de sa faible concentration en bitume, le GB20 est plus sujet au décapage et à la fissuration, il doit donc être posé en couche de base puis recouvert d'une couche intermédiaire ou de surface. D'ailleurs, depuis 2008, le réseau du MTQ au Québec n'utilise pratiquement que le GB20 comme enrobé pour les couches de base (Paradis, 2015). En 2014, l'ESG10 était l'enrobé le plus utilisé au Québec, constituant 55 % de toutes les tonnes

de MTMDET mises sur les chaussées. La granulométrie de cet enrobé semi-grossier crée une surface d'usure plus fermée et plus dense, augmentant son imperméabilité par rapport à un enrobé grossier.

En 1997, la technique LC a été normalisée par le MTQ qui s'est d'abord basé sur l'utilisation du système Superpave dans le nord des États-Unis (Philippot, 2010). Cependant, le Laboratoire des Chaussées a choisi d'adapter cette approche en la fusionnant avec la Formulation Française créée en 1991 afin de correspondre au cahier des charges qu'il avait préalablement établi (Barco, 2007). Toute technique de conception des mélanges a pour objectif de maximiser les ratios des composants. La méthode LC est basée sur l'idée de maximiser le pourcentage de bitume afin d'assurer une meilleure durabilité de l'enrobé puisque la teneur en bitume a un impact significatif sur le fonctionnement des enrobés (résistance à la fissuration, au décapage et à l'écaillage) (St-Laurent, 2010). Étant donné que les fortes charges ont tendance à déformer facilement les enrobés à forte teneur en bitume, la résistance à l'orniérage doit être assurée en utilisant suffisamment de pierres anguleuses.

La composition des mélanges est calculée en utilisant une technique volumétrique pour tenir compte de la variabilité des densités des constituants et de l'absorption du bitume par les granulats. Seule l'approche LC utilise le volume effectif de bitume comme spécification pour la conception du mélange (Lachance Tremblay, 2014; Malo, 2013). Le volume effectif de bitume pour chaque type d'enrobé est calculé comme une portion du volume global de l'enrobé moins le volume des vides interstitiels. Cette quantité de bitume représente environ 5,3 % à 5,5 % de l'ensemble du mélange pour un EG-10, en poids, après avoir été compensée pour le taux d'absorption des granulats (St-Jacques & Bertrand, 2003). Contrairement à la technique Marshall, la procédure de conception du mélange consiste à modifier la granulométrie ou les sources de granulats pour répondre au critère des vides plutôt que de faire varier la quantité de bitume pour déterminer la proportion idéale. Seul 0,1% de la teneur en bitume cible peut être modifié lors de la création d'un mélange. La quantité de bitume réellement choisie pour chaque mélange permet de s'assurer qu'il a une teneur en bitume suffisamment élevée pour offrir une longue durée de vie (FERRARO MAIA et al., 1986).

1.3 Enrobés de surfacage à couches minces

Dans les régions peu peuplées, les chaussées à couche mince sont largement utilisées dans les réseaux routiers à faible trafic. Les enrobés ultra-minces ont été conçus à l'origine en France dans le but principal d'améliorer l'uniformité des chaussées et d'accroître leur adhérence. Depuis, des recherches poussées menées par des chercheurs aux États-Unis et en Europe ont favorisé leur développement rapide au cours des dernières décennies (M. Guo et al., 2023; Jähren & Behling, 2004).

En règle générale, ces chaussées sont constituées d'un sol de fondation bien compacté, d'une ou plusieurs couches granulaires et d'une couche bitumineuse mince (de 25 à 50 mm d'épaisseur) (AYAD & BADJEBBAR, 2020). Les matériaux granulaires de ses chaussées constituent une part importante de leur capacité de charge, la couche bitumineuse qui les recouvre servant principalement de couche d'étanchéité et ne contribuant que très peu à la rigidité en flexion (F. Li et al., 2021).

L'introduction des enrobés de surfacage à couches minces au Québec répond à la nécessité de trouver des solutions durables pour prolonger la durée de vie des routes tout en minimisant les coûts de maintenance et les impacts environnementaux (X. Li et al., 2020; Z. Liu et al., 2019). Ces enrobés, caractérisés par leur faible épaisseur et leur application efficace, offrent une alternative prometteuse pour améliorer la résistance et la performance des chaussées face aux variations climatiques sévères, telles que les cycles de gel-dégel fréquents dans les régions (S. Chen et al., 2019). Les recherches et les expériences menées au Québec ont démontré que ces enrobés améliorent significativement la résistance à l'usure et à la formation de nids-de-poule, contribuant ainsi à une meilleure sécurité et confort de conduite.

1.4 Bardeaux d'asphalte

1.4.1 Usage et composition des bardeaux d'asphalte

Avant l'introduction des bardeaux d'asphalte en 1901, des options de couverture en vrac, notamment des rouleaux d'asphalte préparé, étaient disponibles (Berger, 1951). En raison de ses nombreux avantages par rapport aux autres types d'enveloppes, notamment la compétitivité des prix, la légèreté et la facilité d'installation et d'entretien, les tuiles bitumineuses ont rapidement augmenté leur part de marché. En général, la production de bardeaux d'asphalte tel qu'illustrer dans la Figure 1.2 et comporte six processus : la saturation de la base, le revêtement, l'application d'un agrégat de surfacage, le séchage, l'application d'une finition et l'emballage. Pour obtenir l'épaisseur nécessaire, le support en feutre, cellulose ou fibre de verre est immergé dans un bassin d'asphalte chaud jusqu'à saturation. L'une des faces est ensuite recouverte d'un agrégat minéral pour retarder le vieillissement et les dommages. La face opposée est recouverte de mica, de sable à grain fin ou d'une couche d'asphalte. La composition (Elseifi Mostafa A. et al., 2012) de ses différents constituants est résumé dans le Tableau 1.1.

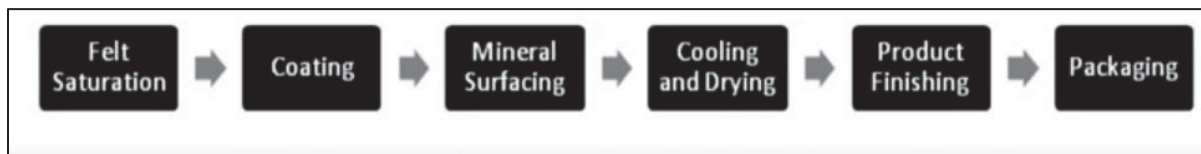


Figure 1.2 Processus général de production des bardeaux d'asphalte
Tiré de Asphalt Shingles Recycling (2023)

Tableau 1.1 Composition en pourcentage des constituants de bardeaux d'asphalte
Tiré de Salari (2012, p. 8)

Composants	Bardeau organique (%)	Bardeau en fibres de verres (%)
Teneur en bitume	30-35	15-20
Granulats	30-50	30-50
Fibres / Particules fines	15-35	20-35

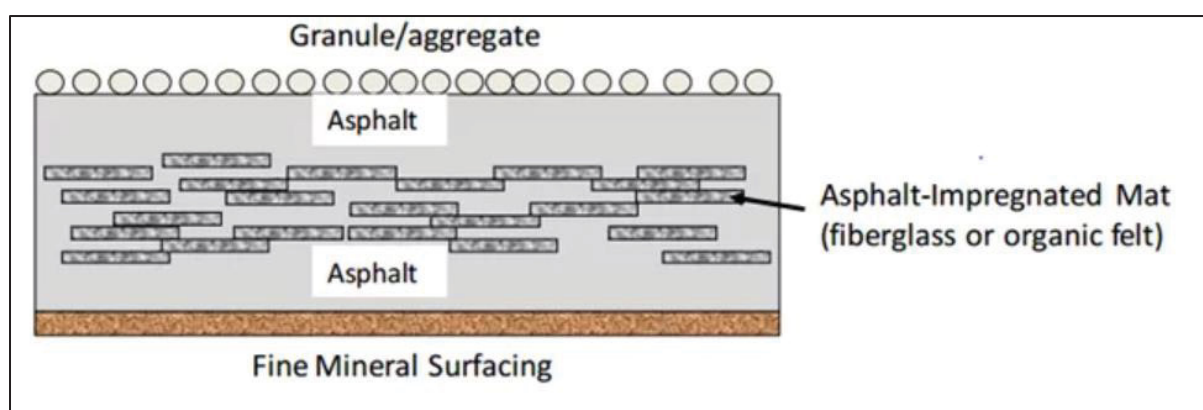


Figure 1.3 Image interne d'une coupe de bardeau d'asphalte
Tiré de Asphalt Shingles Recycling (2023)

1.4.2 Recyclage et revalorisation des bardeaux d'asphalte post consommation

Les générateurs de déchets de bardeaux d'asphalte peuvent être divisés en deux catégories : les déchets d'arrachage (ou déchets post-consommation) et les déchets industriels (ou déchets post-production) (Légaré Bilodeau, 2011). Les premiers résultent de la démolition et de l'entretien des toits résidentiels et commerciaux, tandis que les seconds sont les déchets produits à chaque étape de la fabrication, tels que les découpes et les matériaux non conformes. On peut parfois découvrir que les arrachages et les débris industriels sont associés à des substances nocives, auquel cas ils doivent être isolés avant tout traitement ultérieur. Les lois de l'EPA exigent la séparation avant la mise en décharge lorsqu'ils sont découverts mélangés à des substances spécifiques, notamment de la peinture, des produits chimiques, des pesticides et d'autres déchets ménagers dangereux (Boser & El-Gafy, 2011). En général, on trouve du bois, des emballages en plastique, des clous et de la cellulose dans les bardeaux d'asphalte,

ainsi que d'autres composants indésirables. Le recyclage des bardeaux d'asphalte comprend les étapes suivantes : séparation des matériaux, déchetage des tuiles, tamisage ou criblage, mélange, refroidissement par eau, broyage, criblage et une deuxième étape de tamisage et de criblage. Les déchets post-production sont assez similaires pour chaque type de produit bitumineux et représentent 5 à 10% des 11 millions de tonnes de déchets générés annuellement aux États-Unis (« Asphalt Shingles Recycling », 2023). Les 90 à 95 % restants sont constitués de déchets d'arrachage post-consommation. Selon le procédé de fabrication utilisé, les différentes tuiles bitumineuses ont des durées de vie prévues différentes ; néanmoins, les estimations courantes de la durée de vie des produits placent l'âge moyen des toits entre 12 et 15 ans (Sengoz & Topal, 2005; Zickell, 2003).

Le grand potentiel de recyclage des bardeaux d'asphalte est démontré par sept utilisations potentielles du produit récupéré, à savoir le remélange dans l'enrobé à chaud, l'intégration dans les plaques de béton à froid, les routes rurales et temporaires, les espaces de stationnement, l'incorporation dans divers agrégats minéraux, l'utilisation comme source d'énergie ou de carburant, et la réintégration dans de nouveaux produits bitumineux (Elseifi Mostafa A. et al., 2012; Habbouche et al., 2022). Contrairement à l'utilisation d'asphalte vierge, le recyclage des bardeaux d'asphalte offre la possibilité de réduire les coûts d'élimination, d'épargner les décharges et de soutenir des méthodes de production plus rentables. Toutefois, le lancement d'opérations de recyclage n'est pas sans risque en raison des incertitudes liées aux coûts, de la volatilité du marché, de l'acquisition des licences et permis requis et d'un degré potentiellement élevé de fluctuation de la chaîne d'approvisionnement en termes de qualité des matériaux.

Les constructeurs de routes et le secteur des enrobés à chaud constituent le plus grand marché pour la réutilisation des tuiles bitumineuses en Amérique du Nord (Pouranian & Shishehbor, 2019). En raison de la contamination et de la dégradation due à l'âge, dont on pense qu'elles affectent les matériaux d'arrachage et augmentent la variabilité de l'approvisionnement, la loi de la plupart des États favorise l'utilisation de bardeaux provenant des rebuts des fabricants dans les mélanges HMA jusqu'à 5 % (Zhou et al., 2014).

L'enrobé de rapiéçage à froid contient également un solvant qui prolonge la durée d'utilisation du mélange, en plus des composants de l'enrobé chaud ou tiède (Crispino, 2019). Le granulat minéral et l'émulsion qui composent l'amalgame de rapiéçage peuvent être combinés au BAPC comme composant du mélange. Aux États-Unis, ce type de rapiéçage est fréquemment utilisé pour réparer temporairement les chaussées endommagées et pour recouvrir les nids de poule. Outre une meilleure résistance de la chaussée et des avantages environnementaux, le rapiéçage à froid associé aux BAPC permet également de réaliser des économies et d'allonger la durée de vie (Habbouche et al., 2022). Des recherches sur le terrain ont montré que les plaques à froid à base d'un mélange BAPC fonctionnaient mieux et étaient plus durables que les plaques à froid faites de HMA et les plaques à froid sans BAPC. Ce résultat a été attribué à l'inclusion de fibres de verre et de fibres organiques dans les combinaisons, qui améliorent la stabilité structurelle sous des charges importantes et maintiennent le patch intact.

L'asphalte ayant un contenu énergétique de 20 000 BTU par livre, les pratiques de recyclage peuvent être étendues à des utilisations telles que la récupération d'énergie par extraction de carburant (Saoud & Meddahi, 2022). La récupération de combustible à partir de déchets de tuiles bitumineuses est depuis longtemps une procédure régulière sur le continent européen, mais elle ne l'est que depuis peu aux États-Unis. Les tuiles de substrat organique avec une teneur en asphalte de 30 à 36 % peuvent prendre des valeurs énergétiques comprises entre 6 000 et 7 000 BTU par livre, tandis que les tuiles de substrat en fibre de verre peuvent prendre des valeurs énergétiques comprises entre 3 800 et 4 000 BTU par livre étant donné la teneur en asphalte présente dans les bardeaux. Des valeurs énergétiques allant jusqu'à 8500 BTU par livre sont documentées dans la littérature actuellement disponible. Bien que l'utilisation de débris bitumineux comme supplément de combustion ait le potentiel de provoquer la libération d'amiante dans l'atmosphère à des températures inférieures à 980°C, la viabilité de cette préoccupation dépend de la découverte initiale d'amiante dans les bardeaux. Les fours à ciment sont une des utilisations des tuiles bitumineuses comme source de combustible (Belley-Vézina & Truong, 2016; Lavoie, 2009; Nicholson, 2007).

1.5 Incorporation de bardeaux d'asphalte dans les matériaux de chaussées

1.5.1 Incorporation et performances dans les enrobés bitumineux

Les bardeaux d'asphalte post-consommation sont de plus en plus utilisés dans les chaussées depuis une dizaine d'années. L'utilisation d'un maximum de 5 % en masse pour une couche de base et d'un maximum de 3 % dans une couche de surface est permise en vertu des spécifications générales du MTMD [CCDG13.3.2.2 et norme 4202 du MTMD] (Malo, 2013). Les BAPC ne sont pas autorisés en surface des autoroutes, mais la norme 4202 permet l'utilisation d'une combinaison de matériaux recyclés jusqu'à 20 %.

La performance des enrobés bitumineux comprenant des BAPC a fait l'objet de recherches approfondies remontant aux années 1980. Les résultats varient considérablement ; certaines chaussées se comportent admirablement alors que d'autres se dégradent au cours des premières années. Le respect des normes de bonnes pratiques semble donc être la clé d'une application efficace du BAPC dans les chaussées en asphalte. Lors de l'examen des recherches antérieures, il n'est pas clair si ces meilleures pratiques ont été appliquées pendant la production et la mise en place, malgré le fait que plusieurs organisations ont publié des lignes directrices sur les recommandations des meilleures pratiques dans l'utilisation des BAPC (Elseifi Mostafa A. et al., 2012; Hansen, 2009; Noël et al., 2006; Willis, 2013; Zhou et al., 2012).

En Géorgie, Watson et al. (1998) ont étudié comment les déchets municipaux tel que le BAPC affectaient le vieillissement des mélanges de surface. Il est arrivé à la conclusion que, bien que les deux mélanges aient eu une performance similaire après deux ans, le mélange de surface avec BAPC semblait visiblement vieillir davantage que les mélanges de contrôle (Watson et al., 1998).

Nam et al. (2014) ont étudié comment la stabilité Marshall, la résistance à l'humidité et la résistance à l'orniérage des mélanges d'asphalte étaient affectées par des changements progressifs de la quantité de BAPC et des augmentations de la concentration en liant. Le mélange présentant la stabilité Marshall et la rigidité les plus élevées avait 6 % de bardeaux et

3,77 % de teneur en liant vierge ; le mélange présentant la stabilité Marshall la plus faible avait 0 % de bardeaux et 5,77 % de teneur en liant vierge. Le rapport de résistance à la traction a démontré la grande sensibilité à l'humidité du mélange de liant vierge. Les combinaisons avec 3 % ou 6 % de bardeaux et 4,77 % de liant vierge ont satisfait aux exigences du TSR avec des valeurs de 0,81 et 0,87, respectivement. La combinaison qui n'a pas satisfait aux exigences minimales du TSR comportait 4,77 % de liant vierge et aucun bardeau. À l'aide d'un analyseur de chaussée en asphalte (APA), on a testé la résistance à l'orniérage d'échantillons contenant 4,77 % de liant vierge et 0,3 et 5 % de bardeaux. Les résultats ont montré que l'ajout de bardeaux diminuait la tendance du mélange à l'orniérage (Nam et al., 2014).

1.5.2 Mobilisation du liant présent dans les bardeaux d'asphalte postconsommation

Lorsque le BAPC est utilisé dans les EB à chaud, on pense qu'une partie du bardeau contribuera à la teneur globale en liant du mélange. Le terme " pourcentage activé " fait référence à la proportion de bitume de bardeau asphalte qui est censée se mélanger au bitume vierge et contribuer à la teneur globale en liant (Farris, 2016). Toutefois, il n'existe aucun moyen précis de déterminer la quantité de bitume de bardeaux activé réellement présente dans les mélanges d'asphalte (Swiertz et al., 2011). Une estimation incorrecte de la quantité de bitume activé peut donner lieu à des mélanges contenant une quantité insuffisante ou excessive d'asphalte, car la teneur totale en liant d'un mélange est utilisée pour calculer bon nombre des propriétés volumétriques importantes utilisées comme critères pour la conception des mélanges et les essais d'assurance de la qualité des mélanges produits en usine (Swiertz et al., 2011; Yan et al., 2019). Afin de prévoir les propriétés de l'asphalte composite, il est également crucial de connaître la proportion d'asphalte de bardeaux mélangée à l'asphalte vierge, car il est nettement plus rigide que l'asphalte de pavage traditionnel. La résistance du mélange à différents types de fissures diminuera probablement si le liant composite est trop rigide, et s'il est trop mou, il pourrait être plus enclin à la déformation irréversible.

Une approche permettant de déterminer le pourcentage d'activation de l'asphalte de bardeaux a été suggérée dans l'ancienne publication provisoire de l'American Association of State and

Highway Transportation Officials (AASHTO) AASHTO PP 53-09 Design Considerations When Using Reclaimed Asphalt Shingles (RAS) in New Hot Mix Asphalt (HMA). Pour cette technique, deux mélanges ont dû être créés : l'un avec des BAPC et l'autre sans BAPC. Les teneurs en asphalte vierge idéales pour les deux combinaisons ont été déterminées à l'aide de la norme AASHTO M323-13. On a affirmé que la différence entre les teneurs en asphalte vierge idéal des deux mélanges montrait que l'asphalte de bardeaux activé avait pris la place de l'asphalte vierge comme liant. Le facteur de disponibilité du liant bitumineux, ou la proportion d'asphalte à bardeaux activé, a été déterminé à l'aide de l'équation 1.1 (AASHTO PP 53-09 2012) (Farris, 2016).

$$F_c = \frac{P_{bv} - P_{bvr}}{(P_{sr})(P_{br})} \quad (1.1)$$

F_c = facteur de disponibilité estimé de liant d'asphalte, en pourcentage ;

P_{bv} = contenu en liant d'asphalte vierge de conception d'un mélange sans BAPC, en pourcentage ;

P_{bvr} = contenu en liant d'asphalte vierge de conception du même mélange avec BAPC, en pourcentage ;

P_{sr} = pourcentage de BAPC dans le mélange, en décimal ;

P_{br} = pourcentage d'asphalte de bardeaux dans le RAS, en décimal ;

Selon l'AASHTO PP 53-09, F_c (calculé dans l'équation 1.1) indique la proportion de l'asphalte de bardeaux activé dans le mélange, mais il sous-estime probablement la valeur réelle. Afin de calculer la valeur correcte de F_c l'AASHTO PP 53-09 a utilisé l'équation 2 (AASHTO PP 53-09 2012) (Farris, 2016).

$$F = 100 \left(\frac{1 + F_c}{2} \right) \quad (1.2)$$

Les estimations de l'AASHTO PP 53-09 étaient basées sur la présomption que les mélanges avaient tous la même quantité de liant optimal, et que les variations des teneurs en liant vierge indiquaient la quantité d'asphalte à bardeaux activé. Cependant, l'ajout d'asphalte à bardeaux a quelque peu compensé l'augmentation de la teneur en liant optimal provoquée par l'augmentation de la VMA. Huber est arrivé à la conclusion que la teneur en liant vierge du mélange diminuera chaque fois que le pourcentage de bardeaux d'asphalte dépassera la variation de la teneur en liant optimale provoquée par la variation du VMA (Farris, 2016; Huber, 2013b, 2013a).

Dans une version plus récente de la norme AASHTO PP 53-09, intitulée AASHTO PP 78-14 : Design Considerations When Using Reclaimed Asphalt Shingles (RAS) in Asphalt Mixtures, le calcul du facteur de disponibilité et les exigences de conception ont été supprimés de la norme. Pour déterminer la proportion d'asphalte dans les bardeaux (ou d'asphalte de recyclage et d'asphalte de bardeaux recyclés) dans la teneur totale en liant du mélange, l'équation 1.3 a été ajoutée. Le grade du liant d'asphalte vierge est ajusté en fonction de ce pourcentage. Le calcul a utilisé le facteur de disponibilité du liant bitumineux (F), et la spécification précise qu'il est supposé varier entre 0,70 et 0,85, mais une étude plus approfondie est nécessaire. Cette approche est plus rapide, plus facile à calculer et plus utile pour les concepteurs de mélanges, mais elle ne constitue pas une solution concluante à la question. Le facteur de disponibilité n'est qu'une estimation, et sans savoir précisément comment les caractéristiques du mélange seront impactées par l'asphalte à bardeaux, l'utilisation d'un liant vierge plus souple n'est pas garantie pour offrir des performances supérieures (Farris, 2016).

$$P_{bst} = \left[\frac{F(P_s)(P_{bs}) + (P_r)(P_{br})}{P_b} \right] 100 \quad (1.3)$$

P_{bst} = pourcentage du liant BAPC et/ou GBR dans la teneur en liant asphaltique du mélange conçu ;

F = facteur de disponibilité du liant asphaltique BAPC, exprimé en décimal ;

P_s = pourcentage de BAPC dans le mélange asphaltique, exprimé en décimal ;

P_{bs} = pourcentage de liant asphaltique dans le BAPC, exprimé en décimal ;

P_r = pourcentage de GBR dans le mélange asphaltique, exprimé en décimal ;

P_{br} = pourcentage de liant asphaltique dans le GBR, exprimé en décimal ;

P_{bst} = teneur en liant asphaltique conçue dans le mélange asphaltique, exprimée en décimal ;

L'AASHTO M323 (2017) part de l'hypothèse que le liant BAPC se mélange entièrement au liant vierge, même si cela peut ne pas se produire dans les mélanges réels. En ce qui concerne le BAPC, bien qu'il ait été reconnu que seule une petite partie du liant BAPC se combine avec le liant vierge, il n'existe actuellement aucune méthode pour déterminer précisément le niveau de mélange (Farris, 2016).

Zhao et al. (2015) ont créé une technique chimique pour étudier le taux de mobilisation du bitume des matériaux BAPC en utilisant le test de chromatographie par perméation de gel (GPC). Le taux de mobilisation a atteint un pic d'environ 60 % à une teneur en BAPC de 5 % et a ensuite commencé à diminuer à mesure que la teneur en BAPC augmentait, ce qui est très cohérent avec les valeurs normalisées du MTMD (S. Zhao et al., 2015). Cependant, la procédure nécessite un équipement très spécialisé (GPC), qui n'est pas souvent présent dans les laboratoires pour les matériaux de pavage. Les recherches s'accordent généralement à dire que les paramètres de mélange ainsi que la quantité de composants recyclés dans l'enrobé affectent ce taux de mobilisation.

Les conclusions de Zhao et al. sont conformes à celles fournies par Daoudi et al. (2022), qui démontrent que le véritable taux de mobilisation semble être d'au moins 50 % du bitume total contenu dans les matériaux BAPC (K. Zhao & Wang, 2022). Cette découverte est cruciale pour la formulation de l'asphalte avec BAPC, mais elle doit être vérifiée avant d'être considérée comme légitime.

La validation a surtout été possible à l'échelle du mastic (une combinaison de charges et de bitume). Comme tous les enrobés examinés ici avaient une structure granulaire très similaire, la majorité des études ci-dessus sont basées sur cette observation. Cependant, différents fillers

issus de ressources recyclées composent le mastic de nos enrobés (notamment le BAPC, très riche en fines particules de différents types). Ces variations peuvent avoir un impact sur l'analyse.

Dans une étude récente, A. Daoudi et al. (2022) a déterminé le bitume actif (taux de mobilisation) des matériaux recyclés en estimant le comportement viscoélastique linéaire (LVE) des mélanges bitumineux comprenant un mélange de GBR et/ou de BAPC à partir du comportement rhéologique du liant approprié. Le comportement mécanique attendu des mélanges de liants avec 6 % de RASB pour les matériaux BAPC semble être plus proche des résultats expérimentaux. La RASB aurait été mobilisée à au moins 50% dans ce cas (Daoudi et al., 2022).

Les techniques de quantification proposées par Y. Ma et al. (2022) se répartissent en plusieurs catégories, dont celles énumérées dans le Tableau 1.3 (Ma et al., 2022): méthode basée sur les propriétés volumétriques, méthode basée sur le four d'allumage, méthode basée sur les propriétés rhéologiques des liants bitumineux, méthode basée sur les propriétés chimiques des liants bitumineux, méthode basée sur la visualisation et méthode numérique.

Tableau 1.2 Différentes méthodes de quantification de bitume contenu dans les
BAPC et GBR
Adapté de Ma et al., (2022, p. 8)

Type de méthode de quantification	Paramètre de quantification	Avantages	Inconvénients
Méthode volumétrique	Propriétés volumétriques et teneur en bitume	Simple et pratique. Peut être utilisé dans les usines d'asphalte	<ul style="list-style-type: none"> • Difficile de conserver la granulométrie et les propriétés volumétriques dans la pratique. • Variabilité des propriétés volumétriques des enrobés bitumineux.
Méthode au four à ignition	Teneur en asphalte des granulats RAP	Simple et pratique	<ul style="list-style-type: none"> • Le tamisage à chaud peut entraîner une variabilité des enrobés. • Le tamisage à chaud ne peut être utilisé que pour des granulométries spécifiques. • Impossible de quantifier le liant BAPC
Méthode basée sur les propriétés rhéologiques du liant	Tableau de mélange, $G^*/\sin\delta$, PG, etc.	Les tests de rhéologie sont pratiques. Caractérisent les propriétés du liant.	<ul style="list-style-type: none"> • Le "tamis de retenue" peut ne pas représenter les mélanges d'asphalte réels. • Difficile d'appliquer cette méthode dans une centrale d'enrobage
Méthode basée sur les propriétés chimiques du liant (GPC, FTIR)	Diagramme de mélange, LMSP, indice de vieillissement	Rapide pour les essais. Caractérisent les propriétés du liant.	<ul style="list-style-type: none"> • L'équipement peut ne pas être pratique dans l'industrie. • L'analyse des données est un peu compliquée. • Difficile d'appliquer cette méthode dans une usine d'asphalte.
Méthode basée sur la visualisation (FM)	Diagramme de mélange, MGv	Rapide à tester. Peut être appliqué dans les mélanges en usines.	<ul style="list-style-type: none"> • L'équipement peut ne pas être pratique dans l'industrie. • Sensible à la température et la lumière
Méthode basée sur la visualisation (SEM, x-ray CT, et AFM)	Rapport entre les éléments	Visualiser l'interaction et la zone de transition entre le liant vierge et le liant GBR Évaluer et visualiser le processus de diffusion	<ul style="list-style-type: none"> • L'équipement peut ne pas être pratique dans l'industrie • Difficile de quantifier l'efficacité du mélange. • Procédures d'essai compliquées
Méthode numérique	E^* rétrocalculé	Simple et pratique. Peut être appliqué en centrale d'enrobage.	<ul style="list-style-type: none"> • La prédiction de E^* à partir du modèle de Hirsch présente une grande variabilité. • Variabilité des propriétés volumétriques des enrobés bitumineux.

CHAPITRE 2

PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

2.1 Problématique

L'incorporation de bardeaux d'asphalte post-consommation (BAPC) dans la fabrication d'enrobés bitumineux représente une voie prometteuse pour répondre aux enjeux de durabilité environnementale, notamment par la réduction des déchets non dégradables dans les sites d'enfouissement. Avec environ 1,25 million de tonnes de BAPC produites annuellement au Canada, l'urgence d'exploiter ce matériau dans des applications valorisantes est palpable. Ce travail s'inscrit dans une démarche visant à explorer l'utilisation des enrobés incorporant du BAPC comme solution durable pour le revêtement des chaussées, plus spécifiquement celles situées en milieu rural, et envisage spécifiquement leur utilisation comme enrobés de micro-surfacement. Ces routes, caractérisées par des défis d'entretien et une sollicitation moindre, tant au niveau du trafic que des conditions climatiques, se présentent comme des candidates idéales pour l'application de telles innovations.

La collaboration entre divers acteurs clés, incluant le CERIEC, la RITMRG, Bauval, le LCMB, et l'ÉTS, souligne l'approche multidisciplinaire et sectorielle adoptée pour aborder cette initiative. L'objectif principal étant de valoriser le BAPC dans un contexte d'économie circulaire, en visant une réduction significative de l'impact environnemental associé à la gestion des déchets de construction tout en optimisant les coûts liés à l'entretien des infrastructures routières.

Cependant, l'intégration du BAPC dans les enrobés bitumineux soulève des questions cruciales quant à son impact sur la qualité et la performance des chaussées, notamment leur application en tant qu'enrobés de micro-surfacement. Il est impératif d'évaluer comment différentes proportions de BAPC affectent la résistance, la durabilité, ainsi que les propriétés volumétriques et de compactibilité des enrobés. Par conséquent, ce travail vise à éclaircir ces aspects en explorant les effets de l'ajout de BAPC, à hauteur de 10% et 25%, sur les

caractéristiques techniques des enrobés bitumineux. Des essais, tels que la Compaction Marshall, la Presse à cisaillement giratoire, la tenue à l'eau et l'orniérage permettront de déterminer les impacts de l'ajout de BAPC dans les enrobés, tout en offrant une perspective quant à leur comportement une fois déployés sur les routes.

Ce mémoire se propose également d'identifier les contraintes techniques relatives à l'utilisation des BAPC et d'explorer des solutions pour les surmonter. La finalité étant de formuler des recommandations concrètes pour une mise en œuvre efficace et responsable du BAPC dans le secteur de la construction routière. Ainsi, ce travail contribuera à une meilleure compréhension des bénéfices et des limites associés à l'utilisation des BAPC dans les enrobés bitumineux, en vue d'encourager leur adoption dans la pratique courante de la construction et de l'entretien des chaussées, particulièrement dans les zones rurales.

2.2 Objectifs du projet

Cette étude s'intéresse à l'incorporation de particules de BAPC dans un enrobé de micro-surfçage. Ce faisant, cette recherche a pour objectif principal de déterminer comment l'ajout de ces particules modifie le comportement des enrobés. Ainsi, différents sous-objectifs sont fixés et serviront de guide pour planifier de manière efficace la méthodologie à savoir :

- Étudier l'impact de la teneur en BAPC sur la compactibilité et propriétés volumétriques des enrobés.
- Évaluer l'influence de la teneur en BAPC sur la tenue à l'eau et l'orniérage.
- Étudier l'impact des propriétés du BAPC sur les caractéristiques volumétriques des enrobés.
- Examiner l'influence du remplacement intégral des granulats et de l'incorporation extensive de matériaux recyclés sur les propriétés de l'enrobé.

Ces objectifs serviront de base pour élaborer le programme de recherche qui se focalise sur l'étude approfondie de l'intégration des BAPC dans la formulation d'enrobés bitumineux, avec une attention particulière sur leur impact sur les propriétés volumétriques, la compactibilité, la tenue à l'eau, et la résistance à l'orniérage des chaussées. Ce programme de recherche commence par la formulation d'un enrobé de référence sans BAPC, suivant les spécifications de la fiche technique MICRO HI-TECH, pour établir une base de comparaison pour les tests ultérieurs. Puis, il explore l'effet de différents teneurs en BAPC de Gaspésie (10% et 25%) sur les enrobés, en termes de compactibilité et propriétés volumétriques, en utilisant une combinaison de bitume PG 64E-28 et de granulats spécifiques. Une phase subséquente évalue l'influence de ces teneurs en BAPC de Gaspésie sur la tenue à l'eau et la résistance à l'orniérage, y compris un essai d'orniérage modifié pour simuler le comportement réel de l'enrobé. L'impact des propriétés du BAPC sur les caractéristiques volumétriques des enrobés est également étudié, comparant des BAPC de sources différentes (BAPC Gaspésie et BAPC varennés). Enfin, le programme considère l'influence du remplacement intégral des granulats par des matériaux recyclés pour évaluer l'optimisation de la quantité de bitume nécessaire et la conformité de l'enrobé en termes de performances mécaniques et de durabilité. Ce programme de recherche vise à déterminer les formulations d'enrobé les plus efficaces qui intègrent le BAPC, contribuant à la durabilité environnementale tout en maintenant ou améliorant les performances routières.

CHAPITRE 3

CAMPAGNE EXPERIMENTALE ET PRESENTATION DES MATERIAUX

3.1 Description des différents essais réalisés

La Figure 3.1 présente un exemple de description de la nomenclature des enrobés confectionnés. 'B' ou 'R' correspond à l'enrobé avec bardeau ou de référence respectivement. '5.0' correspond au dosage massique de bitume d'ajout. 'S' ou 'B' correspond à la provenance des granulats, soit de la carrière de St-Philippe ou celle de Varennes de Bauval respectivement. '10' correspond au dosage massique de bardeau ajouté au mélange. Enfin, 'B' ou 'G' donne des indications sur la provenance du bardeau, à savoir de Varennes ou de Gaspésie respectivement.

Dans la même optique, le Tableau 3.1 précise le nombre d'essais réalisés à différentes phases du projet pour chacun des enrobés confectionnés. Les différentes sous-sections donneront une description détaillée de ces différents essais énumérés.

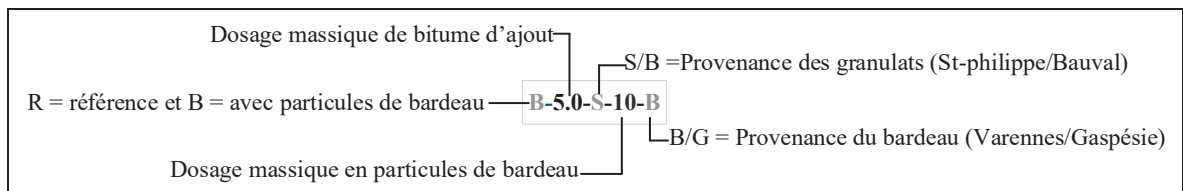


Figure 3.1 Descriptif de la codification des enrobés confectionnés

Tableau 3.1 Présentation des essais réalisés et nombres de répétitions à différentes phases du programme d'étude

Enrobés	Densité max LC26-045	Compaction Marshall LC26-020		Densité brute LC26-040	PCG LC26-003	Tenue à l'eau LC 26-001	Orniérage LC 26-410	
		60 coups	40 coups				Standard	Modifié
R5.8S0G	2	2	2 *	2	6 *	1		
B5.8S25G	2	2	2 *	2	6 *			
B4.0S25G	2	2	2 *	2	6 *	1	2	1
B3.5S25G	2	2		2				
B4.0S10G	2	2		2				
B4.5S10G	2	2		2				
B5.0S10G	2	2	2 *	2	6 *	1	1	
B5.8S10G	2	2		2				
B5.0S10B	2	2		2				
B5.0B10B	2							
B4.5B10B	2							
B4.0B10B	2	2	2 *	2	6 *	1	2	
B3.5B10B	2							
<div>Phase I</div> <div>Phase II</div> <div>Phase III</div> <div>Phase IV</div> <div>Phase V</div>								
* Les éprouvettes Marshall 40 coups serviront à établir LA HAUTEUR DE RÉFÉRENCE pour les éprouvettes de tenue à l'eau fabriquées avec la PCG.								

3.1.1 Essais de formulation

3.1.1.1 Détermination de la densité maximale

L'essai visant à déterminer la densité maximale (D_{mm}) de l'enrobé repose sur le principe d'Archimède. Cette méthode consiste à mesurer la densité d'un échantillon d'enrobé en éliminant la présence de vides, afin d'obtenir une mesure précise de sa densité maximale. La D_{mm} d'un enrobé est cruciale car elle permet de définir ses propriétés volumiques, lesquelles sont essentielles pour évaluer sa qualité et ses performances. La procédure suivie pour cette

détermination est décrite dans la méthode d'essai LC26-045. La collecte de cette donnée est indispensable pour la conduite et l'analyse de la majorité des essais dans le cadre du programme de recherche. L'essai est méticuleusement conçu pour assurer la précision et la fiabilité des résultats, fournissant ainsi une base solide pour l'évaluation des caractéristiques de l'enrobé. Voici une description détaillée du processus :

Préparation de l'échantillon

Séparation des particules : L'échantillon doit être manipulé de manière à séparer les particules sans fracturer les particules minérales. Les particules issues de l'agglomération de granulats fins ne doivent pas excéder 5 mm de diamètre.

Traitement des enrobés durs : Si l'échantillon est trop dur pour être séparé manuellement, il doit être chauffé dans un récipient jusqu'à devenir maniable.

Séchage des échantillons humides : Les échantillons contenant de l'humidité doivent être séchés jusqu'à atteindre une masse constante à une température de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. La masse constante est atteinte lorsque la perte de masse entre deux pesées, effectuées à intervalles de 15 minutes, est inférieure ou égale à la sensibilité de la balance.

Pesée et décohésion de l'échantillon

Refroidissement : Après traitement, l'échantillon est refroidi à la température ambiante.

Pesée : L'échantillon est placé dans un récipient et pesé.

Ajout d'eau : Assez d'eau est ajoutée pour recouvrir l'échantillon. On s'assure que l'enrobé est bien décohésionné en le brassant légèrement avec une tige de verre, d'acier ou de plastique dur non poreux.

Évacuation de l'air

Vide partiel : Le contenu est soumis à un vide partiel pour chasser l'air, utilisant une pression absolue égale ou inférieure à 4 kPa.

Agitation : Le récipient et son contenu sont agités de 5 à 10 minutes avec un agitateur mécanique. Le vide et le rétablissement de la pression doivent se faire graduellement via un robinet de purge.

Méthode volumétrique pour la détermination de la densité

Mesure de la température et de la masse : Le récipient est rempli d'eau et sa température est mesurée. La masse totale du récipient complètement rempli est mesurée conformément à des instructions spécifiques.

Calcul de la densité maximale : La densité maximale est déterminée en utilisant une équation spécifique (équation 3.1).

$$D_{mm} = \frac{A}{(A + F) - (G - H)} \times \frac{dw}{0.997044} \quad (3.1)$$

Où

A	masse de l'échantillon sec dans l'air, en g;
F	masse du récipient rempli d'eau à la température de l'essai, en g;
G	masse du récipient rempli d'eau et contenant l'échantillon à température de l'essai, en g;
H	correction de la dilatation thermique du bitume, en g;
$\frac{dw}{0.997044}$	rapport de la masse volumique de l'eau à T°C sur celle à 25°C;

3.1.1.2 Préparation d'éprouvettes à l'aide du compacteur Marshall

Les éprouvettes préparées selon cette procédure sont soumises à un certain nombre de coups sur chaque face. Dans ce travail, les éprouvettes compactées avec 60 coups sur chaque face seront utilisées pour évaluer la compactibilité. Parallèlement, celles compactées avec 40 coups seront destinées à être utilisées comme références pour fabriquer les éprouvettes utilisées pour les essais de tenue à l'eau à l'aide de la presse à cisaillement giratoire (PCG). La procédure détaillée pour la préparation, le moulage, et le compactage des éprouvettes est décrite ci-après :

Préparation des matériaux :

Peser séparément les granulats pour chaque éprouvette d'essai afin d'obtenir une éprouvette moulée de la hauteur désirée ($63,5\text{mm} \pm 3,0\text{mm}$). Une quantité de $1217\text{g} \pm 50\text{g}$ est recommandée pour des granulats avec une densité brute entre 2,50 et 2,80. Une fournée de 5kg peut être préparée pour mouler trois éprouvettes et réaliser une prise d'essai pour la densité maximale.

Chauffage des granulats :

Chauffer les granulats à une température ne dépassant pas 30°C au-dessus de la température de malaxage, sans excéder $180^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Des instructions spécifiques sont fournies pour les enrobés additionnés de matériaux recyclés. Il est important de ne pas chauffer directement le GBR et le BPC, mais plutôt de régler la température des granulats entre 15°C et 25°C au-dessus de celle recommandée pour le malaxage, sans excéder 190°C . La température exacte de chauffage des granulats doit être ajustée selon plusieurs facteurs, dont le type de matériau, la viscosité du bitume, la rapidité de l'essai, et la quantité de matériau à malaxer, afin d'atteindre la température adéquate pour le compactage. Par exemple, une augmentation de 25°C est suggérée pour malaxer 25kg de granulats contenant 20% de GBR, et une augmentation de 20°C pour ceux contenant 10% de GBR. En outre, avant le malaxage en laboratoire, il est

recommandé de chauffer le GBR ou le BAPC à $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ dans un four à micro-ondes pour prévenir l'oxydation excessive du bitume, une méthode plus rapide que le chauffage à l'étuve à $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, bien que cela nécessite de remuer fréquemment. Pour des raisons de sécurité, l'utilisation de lunettes de protection est fortement conseillée lors de la manipulation des matériaux chauffés au micro-ondes.

Mélange des matériaux :

Il est essentiel de préchauffer le bol de malaxage à la température adéquate avant d'introduire le mélange granulométrique. Une fois les matériaux recyclés chauffés au micro-ondes, ils doivent être ajoutés au mélange de granulats secs présent dans le bol et mélangés de manière homogène de façon manuelle. Un puits doit être créé au sein de ce mélange pour accueillir le bitume d'ajout, qui doit être préalablement chauffé et dosé conformément à la proportion de bitume spécifiée dans la formule.

Compaction de l'éprouvette :

Nettoyage et chauffage du moule : Nettoyer le moule à éprouvette et la surface du pied de dame, et les chauffer à la température de chauffage pour le compactage $\pm 15^{\circ}\text{C}$. Placer un disque de papier au fond du moule avant d'ajouter l'enrobé.

Placement de l'enrobé : Mettre tout l'enrobé dans le moule, utiliser une spatule pour enfoncer l'enrobé 15 fois autour du moule et 10 fois au centre, et lisser le sommet de l'éprouvette.

Compactage : Avec le pied de dame, appliquer 40 ou 60 coups de la masse frappante sur chaque face de l'éprouvette selon l'usage des éprouvettes après compaction.

Refroidissement et démoulage : Enlever la semelle et la hausse, laisser le cylindre de moulage refroidir à l'air ambiant jusqu'à atteindre la température ambiante pour démouler sans déformer. Utiliser des ventilateurs pour accélérer le refroidissement si nécessaire.

Manipulation post-démoulage : Démouler l'éprouvette et la poser à plat sur une surface horizontale lisse pour éviter toute déformation jusqu'au moment des essais.

3.1.1.3 Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire

Conformément à la méthode d'essai LC26-003, l'évaluation de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud s'effectue grâce à l'utilisation d'une presse à cisaillement giratoire. Cette presse simule l'action mécanique d'un rouleau compacteur par l'application de mouvements giratoires et d'une pression constante de 600 kPa. Pour garantir la précision des résultats dans ce projet, il a été procédé à la réalisation de deux essais pour chaque mélange d'enrobé. Il est essentiel de respecter les normes MTMD, notamment en ce qui concerne le nombre de gyrations adapté au type d'enrobé utilisé. Des moules de 100 mm de diamètre seront employés pour cette étude.

La hauteur finale de l'enrobé, telle que spécifiée par l'appareil, et les vides interstitiels au sein de l'enrobé bitumineux sont déterminés après compaction. Cette dernière est évaluée en utilisant la méthode d'essai LC 26-320, qui permet de déterminer le pourcentage de vides et la compacité des enrobés à chaud compactés. La conversion nécessaire est réalisée à l'aide de l'Équation (3.2), permettant de déterminer la hauteur en fonction du volume de l'enrobé Marshall compacté avec 40 coups en remplaçant le diamètre du moule. La masse des matériaux versés dans le moule sera la même que celle utilisée pour la méthode Marshall, soit $1217\text{g} \pm 50\text{g}$.

$$V = \pi r^2 h \quad (3.2)$$

Où

- V** Volume;
- r** rayon de l'éprouvette;
- h** Hauteur de l'éprouvette.

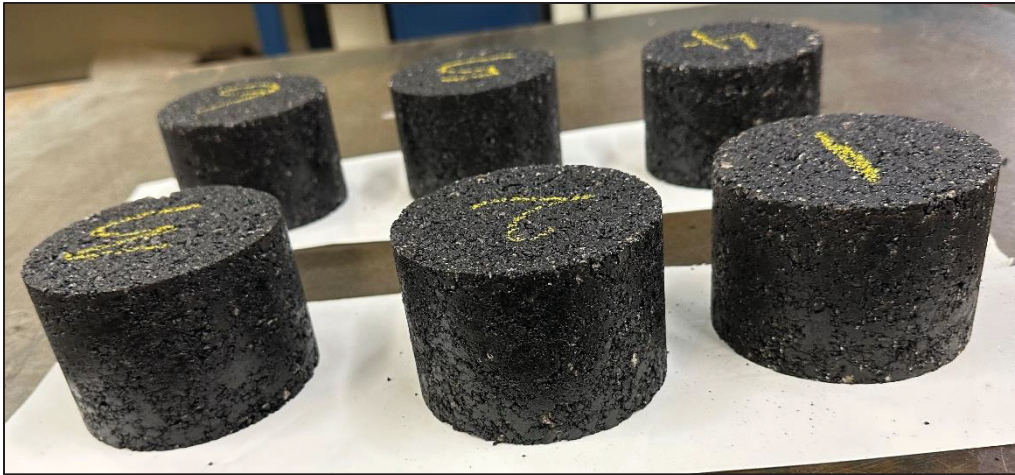


Figure 3.2 Exemple d'éprouvettes obtenues à la PCG

3.1.1.4 Densité brute et pourcentage de vides

La densité brute représente le rapport entre la masse d'une éprouvette mesurée à 25°C et la masse d'eau que cette même éprouvette déplace à la même température, en considérant son volume brut ou total. Pour mesurer la densité brute d'un enrobé compacté, l'éprouvette est pesée à la fois dans l'air et dans l'eau, suivant les procédures détaillées dans la méthode d'essai LC 26-040 : Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés.

La densité brute obtenue à partir de cette mesure permet ensuite de calculer le pourcentage de vides dans l'enrobé. Cette étape se fait en appliquant la méthode d'essai LC 26-320 : Détermination du pourcentage de vides et de la compacité dans les enrobés à chaud compactés, et en utilisant les équations (3.3) et (3.4) spécifiées dans cette même méthode.

$$\text{Pourcentage de vides (\%)} = 100 \left(1 - \frac{\text{densité brute}}{\text{densité maximale}} \right) \quad (3.3)$$

$$\text{Compacité (\%)} = 100 - \text{Pourcentage de vides (\%)} \quad (3.4)$$

3.1.2 Essais pour déterminer les performances

3.1.2.1 Résistance à l'orniérage

L'essai de détermination de la résistance à l'orniérage utilisant l'orniérage MLPC permet de déterminer le comportement aux déformations permanentes d'un enrobé bitumineux soumis à une charge roulante répétée en condition isotherme, tel que défini dans la méthode d'essai LC 26-410 : Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage.

Les éprouvettes utilisées dans les tests sont des plaques d'enrobé avec des dimensions précises : une longueur de 500 mm, une largeur de 180 mm, et une hauteur qui peut varier entre 50 mm et 100 mm, en fonction de l'application prévue pour l'enrobé. Plus précisément, une hauteur de 50 mm est adaptée aux couches de surface ou de correction, tandis que 100 mm convient aux couches de base ou aux couches uniques, tel que décrit dans la méthode d'essai LC 26-400, intitulée "Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC". Pour cette étude, des éprouvettes de 50 mm de hauteur ont été sélectionnées. La masse d'enrobé nécessaire à remplir chaque moule est déterminée à l'aide de l'équation (3.5).

Après leur fabrication, les éprouvettes ont été laissées à l'air libre pendant une période de 48 heures. Par la suite, et avant le début des essais, des pesées hydrostatiques ont été effectuées pour évaluer le pourcentage de vides au sein des éprouvettes.

$$m = \frac{L \times l \times h \times D_{mm} \times 95}{100} \times \frac{1g}{cm^3} \quad (3.5)$$

Où

m masse d'enrobé exprimée en g.

L longueur du moule exprimée en cm.

l largeur du moule exprimée en cm.

h hauteur du moule exprimée en cm.

D_{mm} densité maximale à 25°C de l'enrobé déterminée selon la méthode d'essai LC 26-045



Figure 3.3 Ornièreur MLPC

3.1.2.2 Tenue à l'eau

Pour évaluer la résistance à l'eau des enrobés, des tests de tenue à l'eau ont été réalisés. L'objectif de ces tests est de mesurer la résistance maximale, exprimée par la valeur de la Stabilité Marshall (N), au moment de la rupture sous charge d'une éprouvette d'enrobé préalablement saturée d'eau et vieillie, par rapport à une éprouvette témoin du même enrobé, qui n'a subi aucun vieillissement ni détérioration. Une fois fabriquées, les éprouvettes sont divisées en deux groupes, basés sur leurs densités brutes. Chacun de ces groupes est ensuite soumis à l'essai de stabilité Marshall, qui est réalisé conformément à la méthode d'essai LC26-060 : Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvette. Cette méthode permet de quantifier la résistance des enrobés à la déformation et, par extension, leur capacité à résister aux effets néfastes de l'eau.

$$\text{Tenue à l'eau ou stabilité conservée (\%)} = \frac{AT}{ST} \times 100 \quad (3.6)$$

Où

AT Stabilité des éprouvettes d'enrobés avec trempage ;

ST Stabilité des éprouvettes d'enrobés sans trempage.

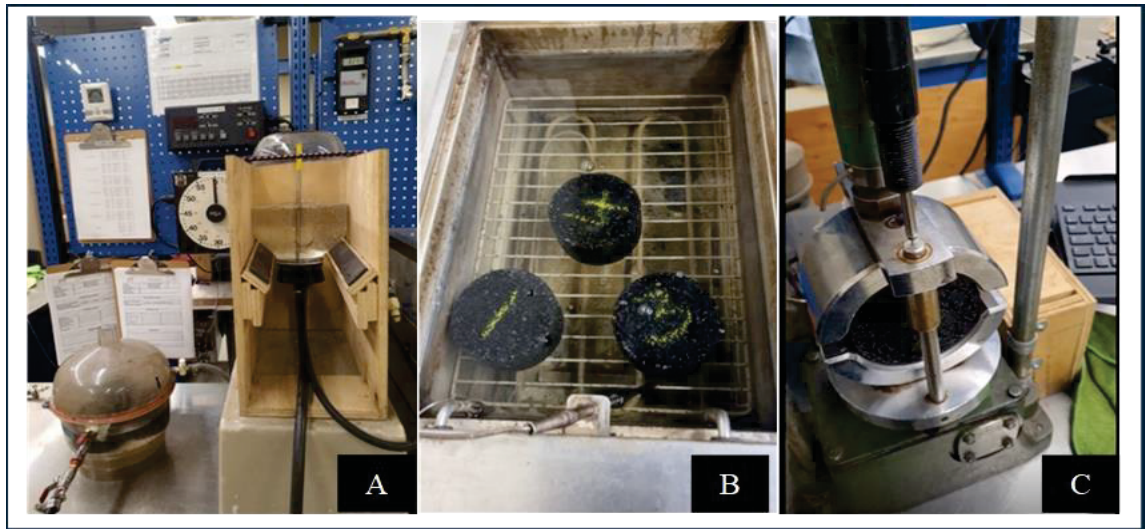


Figure 3.4 Équipements de tenue à l'eau a. dessiccateur b. bain chaud c. mâchoire pour stabilité Marshall

3.2 Description de la campagne expérimentale

Cette section décrit le programme de recherche conçu pour évaluer l'intégration de particules de BAPC dans des enrobés bitumineux pour micro-surfage, visant à maintenir des performances comparables à celles d'un enrobé traditionnel, comme le démontre la fiche technique MICRO HI-TECH de Bauval. La recherche a procédé à une comparaison entre les propriétés d'enrobés contenant des particules de bardeaux recyclés et celles d'un enrobé standard. Les critères utilisés pour cette comparaison seront détaillés dans cette section et dans le but de rendre plus compréhensible ces différentes étapes, la Figure 3.5 présente les différentes phases avec les différents essais associés.

Le programme expérimental de ce projet est structuré en cinq phases distinctes : I) Formuler un enrobé de référence sans BAPC, II) Étudier l'impact de la teneur en BAPC sur la compactibilité et propriétés volumétriques des enrobés, III) Évaluer l'influence de la teneur en BAPC sur la tenue à l'eau et l'orniérage, IV) Étudier l'impact des propriétés du BAPC sur les caractéristiques volumétriques des enrobés, V) Examiner l'influence du remplacement intégral des granulats et de l'incorporation extensive de matériaux recyclés sur les propriétés de l'enrobé.

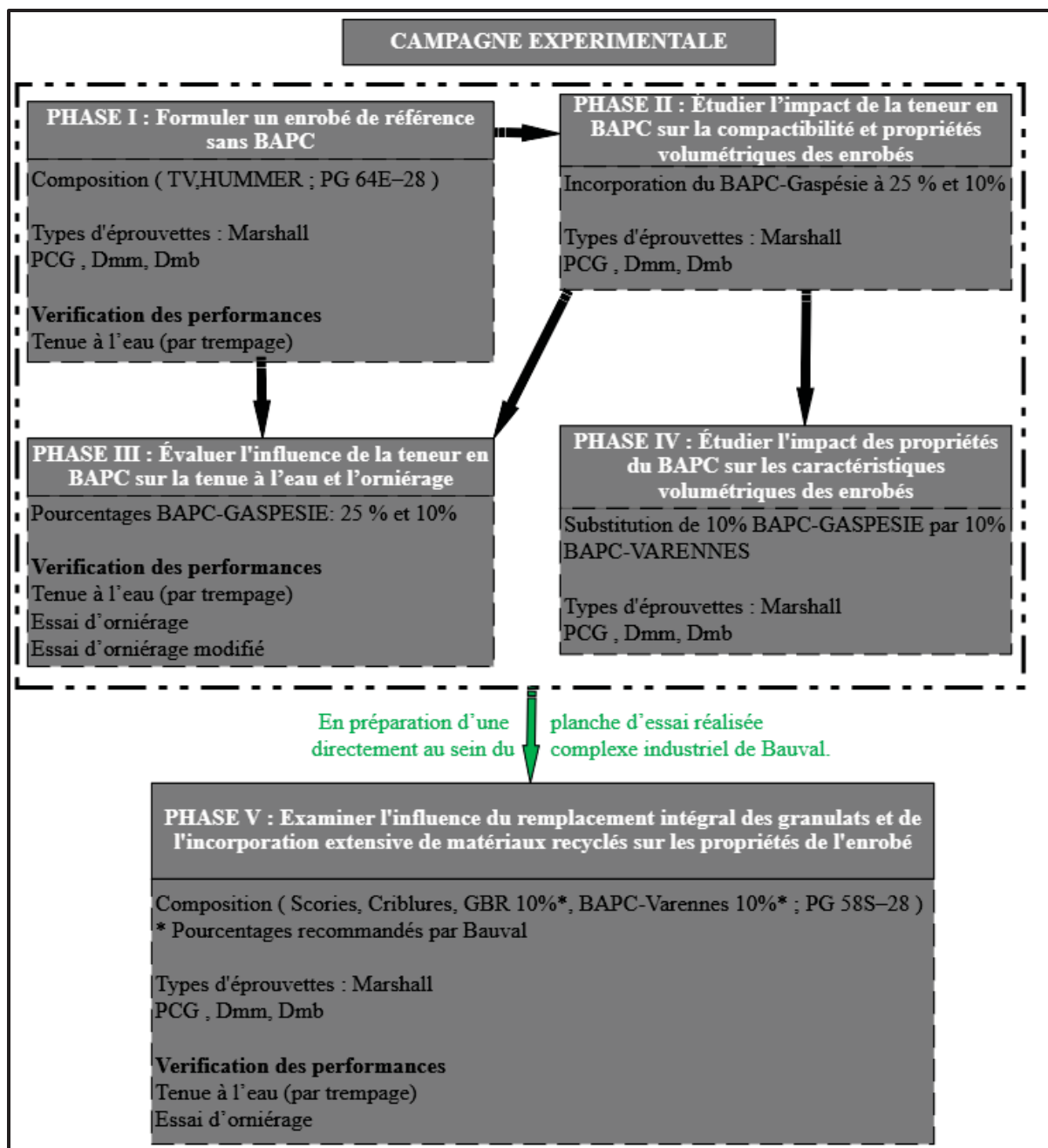


Figure 3.5 Cheminement de la campagne expérimentale

3.2.1 Formulation d'un enrobé de référence sans BAPC

Cette étape implique la formulation d'un enrobé de référence, conforme aux spécifications de la fiche technique de MICRO HI-TECH. Pour cette phase, aucun ajout de BAPC ni de GBR n'a été réalisé. L'importance de cette étape réside dans le fait que les propriétés de l'enrobé de référence serviront de base pour les phases suivantes. Pour cette phase, seule une teneur en bitume de 5,8 % (le maximum indiqué dans la fiche technique) a été considérée, en raison de la granulométrie fine de nos matériaux, qui implique une consommation plus importante de bitume. A cet effet, des essais de formulation et d'évaluation des performances ont été entrepris. Cela inclut les essais de D_{mm} , qui représentent une étape cruciale dans toute formulation.

Ensuite, des essais de compaction Marshall ont été effectués : initialement avec 60 girations pour déterminer les pourcentages de vides et la compacité utile, permettant ainsi de choisir la formule adéquate. Par la suite, 40 girations ont été réalisées pour acquérir les mesures nécessaires (telles que la hauteur) à spécifier dans la machine de presse à cisaillement giratoire qui serviront dans les phases suivantes du projet pour l'étude sur la compactibilité. De plus, elles serviront aussi de référence pour fabriquer les éprouvettes de tenue à l'eau.

Concernant l'évaluation des performances, seuls les essais de tenue à l'eau ont été menés. De plus, la résistance à la déformation (N) était suffisamment élevée, ce qui laisse présager une performance accrue en matière de résistance à l'orniérage. Une seconde raison tient au manque de matériaux disponibles en cette saison (hiver), rendant ainsi une utilisation judicieuse des ressources disponible primordiale. La principale préoccupation concernant l'intégration du BAPC réside dans leur performance par basses températures, où la résistance à l'eau sert d'indicateur clé. Par conséquent, l'étude dans cette phase s'est principalement concentrée sur cet aspect dans le but d'économiser des granulats.

3.2.2 Étude de l'impact de la teneur en BAPC sur la compactibilité et propriétés volumétriques des enrobés

Pour cette étape du projet, un pourcentage de 25 % et 10 % de BAPC de la Gaspésie, ainsi que du bitume PG 64E-28 et des granulats de St-Philippe, sont employés. Des essais de formulation ont été réalisés sur différents enrobés pour déterminer le pourcentage de bitume additionnel nécessaire, comme indiqué dans le Tableau 3.8 et illustré par la Figure 3.10. Au total, trois différentes combinaisons de teneurs en bitume ont été étudiées pour la formule avec 25 % de BAPC, tandis que quatre combinaisons ont été évaluées pour celle avec 10 % de BAPC. Parmi ces différents mélanges, un seul sera sélectionné pour la phase III en fonction des résultats volumétriques obtenus, qui seront ensuite comparés aux spécifications de la fiche technique.

Selon les informations fournies par le MTMD, il est envisageable de considérer des taux de mobilisation de bitume différents pour le BAPF (Bardeau d'Asphalte Post-Fabrication) et pour le BAPC. Plus précisément, un taux de 40 % est suggéré pour le BAPF, tandis qu'un taux de 25 % est recommandé pour le BAPC. Une étude comparative sera effectuée entre les résultats obtenus en considérant les deux taux de mobilisation proposés par le MTMD et les résultats expérimentaux. Les calculs théoriques, qui sont présentés dans le Tableau-A V-1, seront utilisés dans cette analyse. L'équation (3.7) sera utilisée pour déterminer le pourcentage théorique de bitume d'apport.

$$\left(\begin{array}{c} \% \text{ Bitume d'apport} \\ \text{theorique} \end{array} \right) = 5,8\% - (\% \text{ BAPC}) \left(\begin{array}{c} \% \text{ Bitume} \\ \text{du BAPC} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \% \\ \text{Mobilisation} \end{array} \right) \quad (3.7)$$

Où

5,8 % Pourcentage de bitume du mélange de référence

% BAPC Pourcentage massique de BAPC dans le mélange

Exemple : Pour B4.0S25G (% BAPC =24 %), car 25 % est le pourcentage de BAPC dans la partie granulaire et 4,0% le pourcentage de bitume dans le mélange.

% Bitume du BAPC Pourcentage de bitume dans le BAPC obtenue à l'essai d'ignition

% Mobilisation Taux de mobilisation théorique du MTMD (25% ou 40%)

Des essais de compaction à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) seront effectués sur chaque mélange sélectionné (un pour chaque pourcentage de BAPC) afin de recueillir des données sur l'évolution de la compaction et de réaliser directement les essais de tenue à l'eau.

En se basant sur les résultats obtenus, une analyse sera conduite pour évaluer l'impact de la teneur en BAPC sur les propriétés volumétriques des enrobés.

3.2.3 Influence de la teneur en BAPC sur la tenue à l'eau et l'orniérage

Des essais de vérification de conformité ont été réalisés sur les formulations sélectionnées contenant 10 % et 25 % de BAPC, issues de la phase 2, afin de s'assurer qu'elles respectent les spécifications techniques de MICRO HI-TECH fournies par Bauval. Les tests d'orniérage ont été effectués sur deux plaques compactées différemment : l'une avec la formulation à 25 % de BAPC et 4 % de bitume et l'autre, contenant 10 % de BAPC et 5 % de bitume, n'a été testée qu'avec une seule plaque. Les paramètres tels que la Tenue à l'eau (%), la Stabilité Marshall (N) et le Fluage (mm) ont été évalués sur six éprouvettes issues de la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG).

Dans le but d'étendre nos recherches et de produire un enrobé de faible épaisseur adapté pour les chaussées non revêtues, un essai d'orniérage modifié a été conçu. Utilisant la formulation à 25 % de BAPC de la Gaspésie, cet essai visait à simuler le comportement potentiel de l'enrobé à l'échelle réelle. Une épaisseur de 30 mm pour l'enrobé a été choisie. Pour cela, un moule d'orniérage de 100 mm de hauteur a été employé, les 70 mm restants étant remplis de pierres compactées avec un marteau piqueur, afin de reproduire les conditions réelles de chantier, tel que présenté sur la Figure 3.6. Cette méthode s'inspire de la norme d'essai LC 26-400 pour la fabrication des éprouvettes au compacteur LCPC.

Un essai Proctor modifié est nécessaire afin de déterminer la densité maximale et la quantité d'eau optimale requise pour la compaction. La norme canadienne CAN/BNQ 2501-255 établit une procédure d'essai visant à évaluer la relation entre la teneur en eau et la masse volumique du sol ainsi que des mélanges sol-granulat, en utilisant une technique de compaction standard. Cette technique consiste à compacter les matériaux dans un moule normalisé à l'aide d'un marteau de 4,54 kg, libéré d'une hauteur de 457 mm.

La cohésion entre les couches d'enrobé est essentielle pour assurer la qualité et l'efficacité des routes. Une liaison faible entre ces couches peut compromettre la répartition uniforme des charges sur la chaussée, entraînant divers problèmes. Pour renforcer cette liaison, une fine couche d'émulsion, qui peut être anionique ou cationique, a été appliquée sur la surface de pierre compactée.

Afin d'assurer une bonne adhésion entre les deux couches, une fine couche d'émulsion a été appliquée sur la surface de la pierre compactée. L'émulsion sélectionnée pour cette opération est l'EnviroColle de McAsphalt, qui contient un pourcentage de résidu bitumineux de 63,4 %. Selon le 'Guide de bonnes pratiques' édité par Bitume Québec (ISBN 978-2-923714-00-4), la quantité d'émulsion nécessaire est déterminée en divisant le taux de résidu bitumineux souhaité par le pourcentage de bitume présent dans l'émulsion. Dans notre cas, pour une émulsion à 63,4 % de bitume, le calcul pour estimer la quantité d'émulsion totale à appliquer est le suivant : $0,20 \text{ l/m}^2$ divisé par 0,634, résultant en une application de $0,31 \text{ l/m}^2$. Pour une surface test de $0,09 \text{ m}^2$, 0,03 litre d'émulsion a été appliqué. L'émulsion a ensuite été diluée avec de l'eau dans un ratio de 1:1 pour en réduire la viscosité, facilitant une pulvérisation efficace. Cette technique permet de remplir les petites fissures et cavités ou d'appliquer de très petites quantités de bitume résiduel de manière précise.

Les résultats de l'essai d'orniérage modifié seront comparés à ceux obtenus avec une plaque standard d'orniérage de 50 mm utilisant la même formulation. Cette comparaison fournira un aperçu du comportement de l'enrobé lors de sa mise en œuvre et de sa durabilité en tant que chaussée.



Figure 3.6 a. Compactage de la pierre concassée b. Compactage de l'enrobé sur la base granulaire c. plaque d'orniérage modifié

3.2.4 Impact des propriétés du BAPC sur les caractéristiques volumétriques des enrobés

Dans cette section, notre étude de cas se concentre sur une incorporation de 10 % de BAPC, une limitation principalement due aux procédures actuelles de la majorité des centrales

d'enrobage au Québec, qui ne permettent pas l'ajout de pourcentages plus élevés. Pour cette étude, le BAPC de la Gaspésie a été remplacé par celui fourni par Bauval, originaire de Varennes, afin d'évaluer l'influence de ce type de bardeau en utilisant les mêmes matériaux que précédemment. Pour rappel, ces deux sources de BAPC ont des propriétés bien différentes (teneur en bitume, teneur en eau et granulométrie), donc cette étude permettra d'évaluer l'influence des propriétés du BAPC sur les propriétés volumétriques des enrobés. Les paramètres étudiés pour mesurer l'effet de ce changement incluent ainsi la densité brute, les vides en pourcentage (%), la stabilité Marshall, et la compacité (% Dmm), tous évalués avec un taux de bitume constant de 5,0 %, qui correspond au taux fixé dans la phase II du projet pour la teneur de 10% de BAPC.

3.2.5 Influence du remplacement intégral des granulats et de l'incorporation extensive de matériaux recyclés sur les propriétés de l'enrobé.

Le BAPC fourni par Bauval, originaire de Varennes, a été sélectionné pour cette étape du projet, ainsi que tous les matériaux proposés par Bauval, notamment le GBR, les scories, et les criblures qui, dans ce contexte, remplacent les granulats de St-Philippe. L'utilisation du bitume PG 58S-28 a été privilégiée pour cette phase. L'objectif consiste à déterminer la quantité optimale de bitume à ajouter et à vérifier la conformité de l'enrobé sélectionné en termes de performances mécaniques et de durabilité, de manière similaire à ce qui a été réalisé avec 10 % de BAPC de la Gaspésie, pour ensuite effectuer une comparaison entre les deux.

Quatre pourcentages de bitume différents, variant de 3,5 % à 5 %, ont été explorés, en prenant en compte les propriétés volumétriques, comme lors des phases précédentes. Un seul enrobé sera choisi parmi ceux-ci et sera utilisé pour les divers tests de compaction à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) et d'évaluation des performances.

Comme indiqué dans la section 3.3.2, une étude comparative sera également réalisée pour obtenir un aperçu du taux de mobilisation. Cette étude prendra en compte une optimisation basée sur les propriétés volumétriques et les taux proposés par le MTMD. Les résultats de cette

étude seront présentés en annexe dans le Tableau-A V-2. L'équation (3.7) sera aussi utilisée dans cette analyse.

Dans le cadre de cette phase, nous avons formulé un matériau spécifique, intégrant 10% de BAPC Varennes, en nous appuyant sur la méthodologie et les connaissances acquises lors des phases précédentes. Ce mélange, élaboré en laboratoire, a ensuite été produit à l'échelle industrielle et appliqué à une épaisseur de 30mm. Il est crucial de souligner que cette formulation a été conçue spécifiquement pour une série d'essais menée au sein du complexe industriel de Bauval. Enfin, une comparaison a été effectuée entre ce mélange et d'autres mélanges contenant également 10% de BAPC Varennes, afin d'évaluer sa performance relative. Des échantillons ont également été fournis par l'entreprise. Ces échantillons seront utilisés pour des études futures.

3.3 Description des enrobés confectionnés

3.3.1 Composition et granulométries des enrobés utilisés

La granulométrie a été définie dans la fiche technique, stipulant que la courbe granulométrique de l'ensemble des matériaux doit se situer entre les points de contrôle sans sortir de la zone de restriction préétablie. Le Tableau 3.2 présente la courbe granulométrique des différents enrobés examinés, ainsi que les points de contrôle spécifiques à la zone de restriction.

Au total, 13 enrobés distincts ont fait l'objet d'une étude, avec des pourcentages de bitume sélectionnés sur la base du taux de bitume de l'enrobé de référence mentionné dans la fiche technique.

3.4 Description des matériaux utilisés

3.4.1 Le bitume

Les Industries BITUMAR Inc.-Broadway et SUNCOR Énergie-Montréal ont respectivement fourni les deux types de bitume utilisés dans ce travail : un PG 58S-28, qui est un bitume standard, et un PG 64E-28, un bitume incorporé de polymères. Les principales caractéristiques de ces bitumes sont présentées dans le Tableau 3.3, et les propriétés détaillées sont disponibles dans l'ANNEXE III.

Conformément à la fiche technique, le bitume de classe PG 58-34 était initialement prévu pour être utilisé. Cependant, en raison de son indisponibilité au démarrage du projet, le bitume de classe PG 64E-28 a été sélectionné en remplacement. Pour la dernière phase du projet, qui inclut l'introduction de nouveaux matériaux et l'utilisation d'un nouveau type de bardeau, le bitume PG 58S-28 a été choisi. Cette sélection s'explique par le fait qu'il est couramment utilisé par la majorité des entreprises au Québec et qu'il possède des propriétés se rapprochant davantage de celles du PG 58-34. Le bitume de classe PG 64E-28 est recommandé pour la zone climatique 1. En revanche, pour la zone 2, la classe PG 58S-28 est préférée, comme le précise la fiche technique et le Bulletin d'information technique du DGLC (voir ANNEXE IX).

Tableau 3.3 Caractéristiques des différents bitumes PG 64E-28 et PG 58S-28
(Données des fournisseurs)

Essais de caractérisation et de contrôle	PG 64E-28	PG 58S-28
Masse volumique (g/cm ³), à 25 °C	1,019	1,026
Stabilité au stockage (°C)	0,3	0,3
TBA moyenne (°C)	59,8	-
Viscosité Brookfield (Pa*s), à 135 °C	1,232	0,268
Viscosité Brookfield (Pa*s), à 165 °C	0,332	0.081
Température élevée de caractérisation Te (°C)	75,3	59,0
Température basse de caractérisation Tb (°C)	-29,8	-29,3
Module de rigidité S (60) (MPa)	183,5	255
Teneur en cendre (%)	0,18	0,09
Température de malaxage (°C)	156-170	138-152
Température de compactage (°C)	160	135

3.4.2 Émulsion

L'ENVIRO-COLLE est une émulsion cationique à rupture rapide, formulée à partir de bitume dur. Une de ses principales applications est l'amélioration de l'adhérence entre les couches de surface, éliminant ainsi le glissement et assurant une liaison efficace entre la nouvelle couche et la surface existante. Cela s'avérera extrêmement utile pour le projet, en offrant une solution au problème d'arrachement fréquemment rencontré sur les routes rurales québécoises traitées par des enrobés de micro-surfaçage.

Les taux de vaporisation de l'ENVIRO-COLLE varient typiquement entre 0,15 l/m² et 0,40 l/m². Le taux de résidu de distillation pour ce dernier est de 63,4 % ; la valeur de $G^*/\sin\delta$ à 64°C, mesurée à 1 kPa via l'essai Dynamic Shear Rheometer (DSR), indique que le bitume utilisé est de grade PG 64. Pour plus de détails, les caractéristiques de l'ENVIRO-COLLE sont résumées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Caractéristiques de l'émulsion de bitume ENVIRO-COLLE par McAsphalt

Essais sur l'émulsion	Méthodes	Résultats	Spécifications	
			Min	Max
Viscosité Saybolt Furol, 25°C, SFS	ASTM D7496	35,5	20	100
Rés. de distillation to 260°C, %	ASTM D6997	63,4	57	-
Port. huil. distillat, % vol/mass	ASTM D6997	Trace	-	3
Tamis, 850 µ, %	ASTM D6933	0,01	-	0,10
Démulsibilité, 35ml DOSSS 0.8, %	ASTM D6936	75	40	-
Charge des particules	ASTM D244	Positive	Positive	
Essais sur le résidu				
$G^*/\sin(\delta)$, 64°C, kPa	AASHTO T 315	1,00	1,00	3,50
Teneur en cendre, %	LC 25-008	0,13	-	0,8

3.4.3 Caractéristiques des granulats utilisés

Le choix des granulats fins, majoritairement de dimensions inférieures à 5 mm, a été fait en fonction du type de matériau choisi pour ce projet, à savoir des enrobés de micro-surfçage qui se posent sur des épaisseurs faibles (de l'ordre de 30 mm). Ces granulats fins 0-5 mm proviennent de deux sources différentes, à savoir la carrière de St-Philippe de Laprairie et la Carrière de Varennes. La première source a fourni deux types de granulats : Tout Venant (TV), qui correspond à un granulat non lavé qui contient beaucoup de particules fines, et Hummer, qui correspond à un granulat lavé caractérisé par une granulométrie plus grossière et plus uniforme que le TV. La seconde source a fourni les Criblures. Leurs caractéristiques physiques sont détaillées dans le Tableau 3.5 et la Figure 3.7.

Une similarité a été observée chez tous les granulats en termes de densité. Cependant, l'absorption varie significativement entre les deux provenances, ce qui peut s'expliquer par plusieurs facteurs tels que la nature du matériau, sa porosité, sa densité et la taille de ses particules. Cette différence dans les propriétés a un impact considérable sur la quantité totale de bitume nécessaire pour les enrobés qui seront confectionnés en utilisant ses granulats.

Tableau 3.5 Propriétés des granulats utilisés

Matériaux		TV	Hummer	Criblures
Tamis(mm)	Provenance	St-Philippe de Laprairie	St-Philippe de Laprairie	Carrière Varennes
	Densité	2,694	2,683	2,623
	Absorption	1.01	1.19	2.7
28	Tamisat (%)	100	100	100
20		100	100	100
14		100	100	100
10		100	100	100
5		97	98	99
2,5		65	54	78
1,25		42	24	54
0,63		29	10	38
0,315		21	7	26
0,16		16	6	19
0,08		13,8	5,2	12,8

Les tests de granulométrie, d'absorption et de densité ont été réalisés dans les laboratoires de l'ÉTS pour les matériaux provenant de St-Philippe de Laprairie. Quant aux résultats pour les Criblures, ils ont été obtenus auprès des responsables de la carrière de Varennes, en plus d'autres caractéristiques intrinsèques présentées dans l'ANNEXE II. Les granulats ont été caractérisés selon la méthode d'essai LC 21-040 pour la granulométrie, et selon les méthodes

d’essai LC 21-065 et LC 21-066 pour la densité brute et apparente, ainsi que le pourcentage d’absorption.

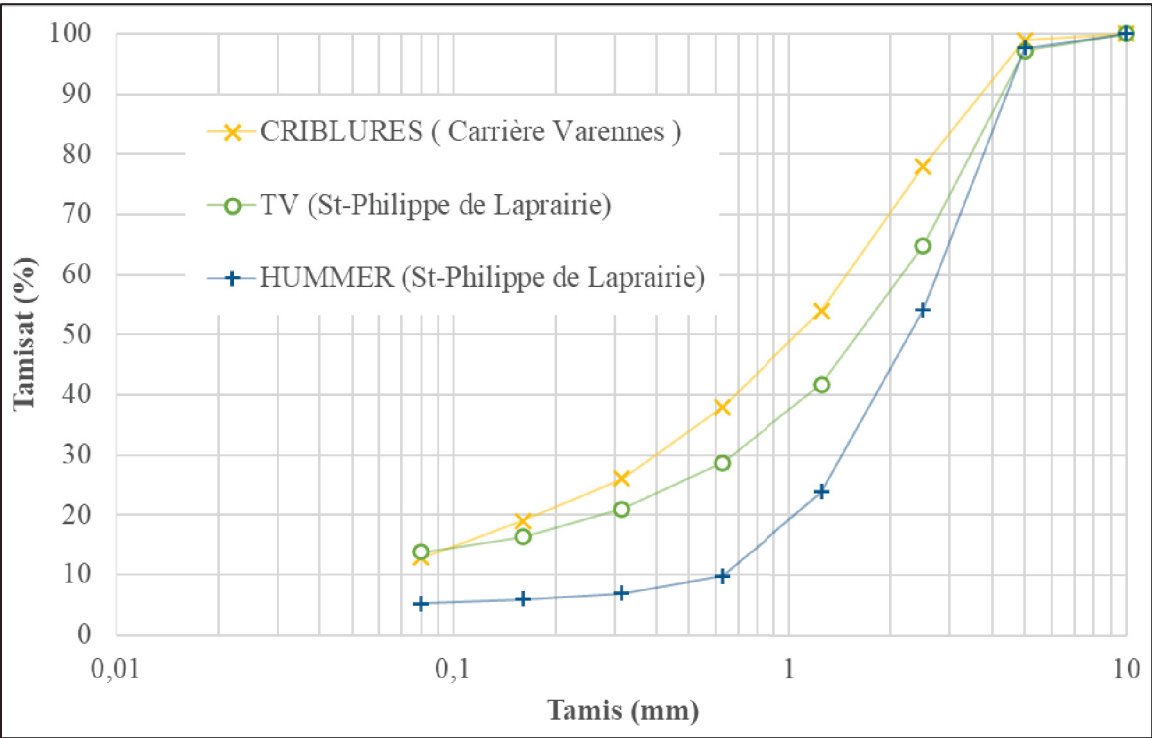


Figure 3.7 Courbes granulométriques des granulats utilisés

3.4.4 Matières résiduelles

Le recyclage du bardeau d’asphalte post-consommation en granulat pour la construction routière, ainsi que l’utilisation de granulat bitumineux recyclé, offrent des alternatives écologiques réduisant la nécessité d’extraire de nouvelles matières premières. Les scories, sous-produits de l’industrie métallurgique, se transforment en matériaux de construction valorisés, contribuant à la durabilité et à l’économie circulaire. Le Tableau 3.9 ci-dessous présente les détails concernant la granulométrie des matériaux résiduels utilisés dans ce projet, à savoir : le GBR provenant des Pavages de Varennes, le BAPC de Gaspésie et de Varennes, ainsi que les scories issues de Harsco Minéraux.

Bardeaux d'Asphalte Postconsommation (BAPC)

Les BAPC utilisés dans la confection des enrobés proviennent de BAUVAL INC. et de la région de la Gaspésie, gérés par la RITMRG. Ces matériaux, reçus décontaminés et déchiquetés en particules inférieures, ont été conditionnés dans des sacs étanches avant d'être acheminés au laboratoire du LCMB. Les échantillons ont ensuite été mélangés, homogénéisés, et préparés en différentes quantités pour divers essais et mélanges.

Le Tableau 3.9 et la Figure 3.8 illustrent la granulométrie des BAPC utilisés dans cette étude, entre 0-2,5mm pour ceux de la Gaspésie et 0-5mm pour ceux des pavages de Varennes. La granulométrie des BAPC de la Gaspésie a été adaptée aux besoins du projet, en effectuant un tamisage puis en utilisant uniquement la fraction inférieure à 2,5mm du lot fourni, ce qui facilite la formulation et élimine les impuretés présentes (Figure 3.9).

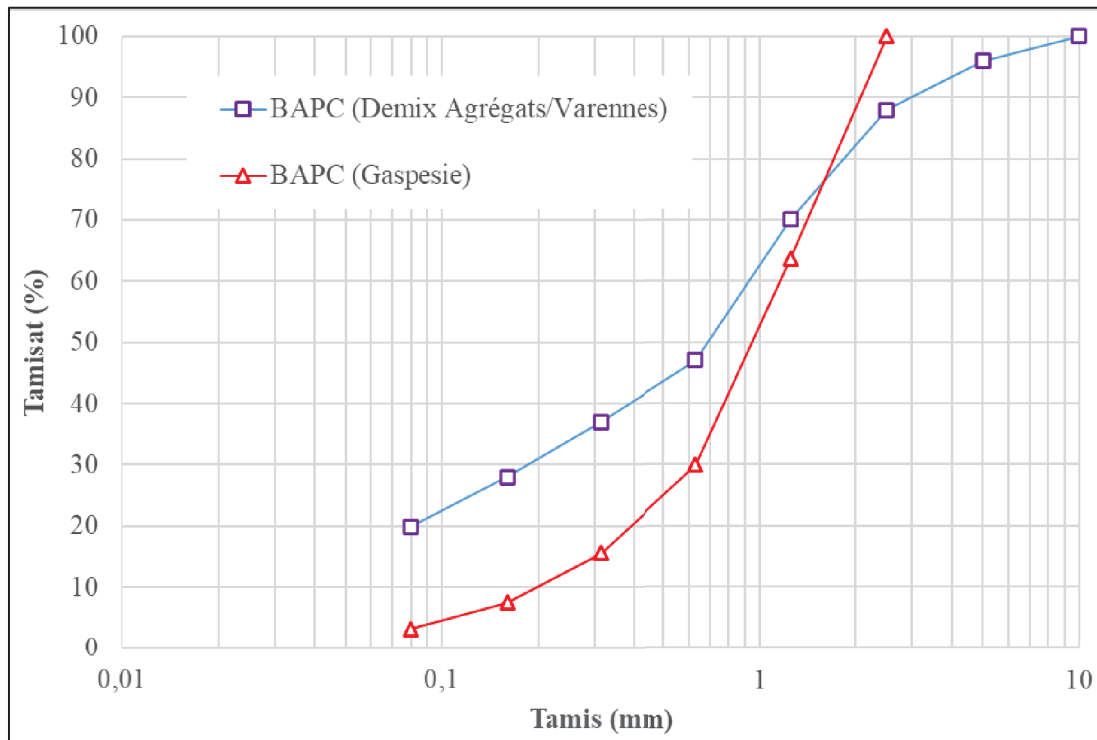


Figure 3.8 Courbes granulométriques du BAPC Gaspésie et BAPC Varennes

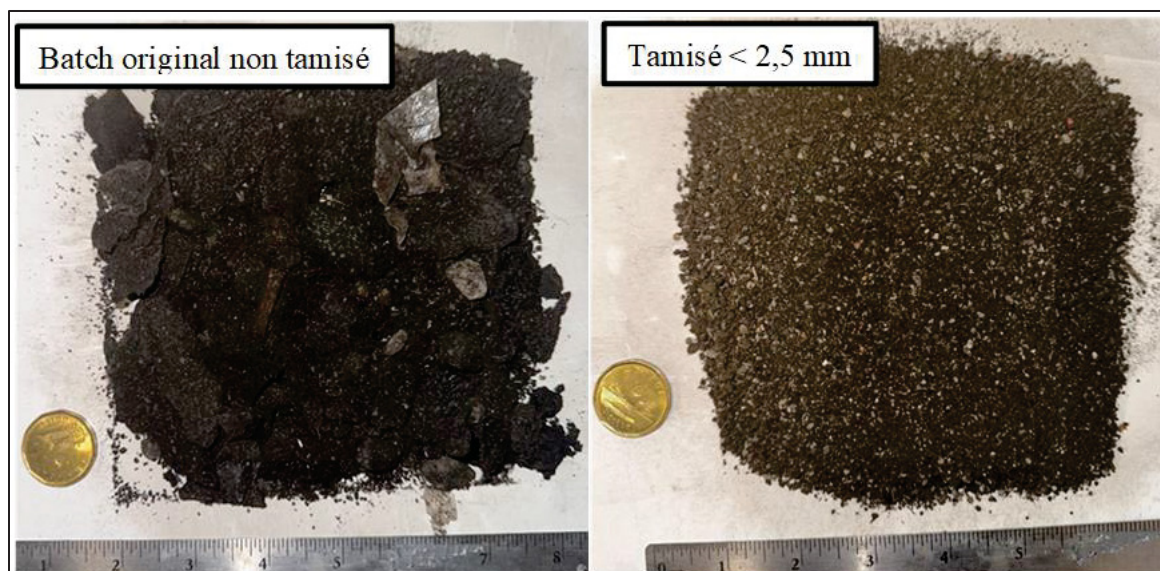


Figure 3.9 BAPC Gaspésie avant tamisage et après tamisage (< 2,5 mm)

La teneur en eau des BAPC, présentée dans le Tableau 3.6, est de 0,2% pour la Gaspésie et de 8,2% pour Varennes. La faible teneur en eau du BAPC Gaspésie résulte du processus de séchage appliqué immédiatement après leur réception, et ce, avant l'étape de caractérisation. En revanche, la teneur en eau des BAPC de Varennes a été déterminée à la réception.

Tableau 3.6 Teneur en eau (%) des BAPC provenant de la Gaspésie et varennes

Echantillon	BAPC Gaspésie	BAPC Varennes
Masse initiale 1	7595,0	499,8
Masse initiale 2	6676,0	496,1
Masse finale 1	7577,0	458,2
Masse finale 2	6660,0	455,6
%Eau 1	0,2	8,3
%Eau 2	0,2	8,2
% Eau moyenne	0,2	8,2

Pour évaluer la quantité de bitume présente dans différentes sources de bardeaux, un test d'ignition a été réalisé selon la méthode d'essai LC 26-006 et les résultats sont présentés dans le Tableau 3.7. Ceux-ci indiquent une perte de masse mesurée dans un four d'ignition et révèlent que le BAPC provenant de Varennes contient une plus grande quantité de bitume, soit 27,9%, par rapport à celui de la Gaspésie, qui en contient 16,3%.

Tableau 3.7 Résultats de l'essai d'ignition sur le BAPC Gaspésie et BAPC Varennes

Echantillon	BAPC Gaspésie	BAPC Varennes
Masse Initiale 1	1096,1	957,0
Masse Initiale 2	1098,2	970,3
Masse Finale 1	921,5	689,0
Masse Finale 2	915,7	701,2
% Bitume 1	15,9	28,0
% Bitume 2	16,6	27,7
% Bitume moyen	16,3	27,9

Granulats Bitumineux Recyclés (GBR)

Le GBR est composé de granulats recyclés provenant de la démolition de chaussées bitumineuses. Ces granulats sont mélangés à un liant bitumineux, qu'il soit neuf ou recyclé. Provenant notamment des pavages de Varennes, le GBR participe aux objectifs de réduction des émissions de CO₂ et d'économie de bitume du projet. La granulométrie utilisée dans cette étude, présentée dans le Tableau 3.9 et la Figure 3.10, est comprise entre 0 et 10mm.

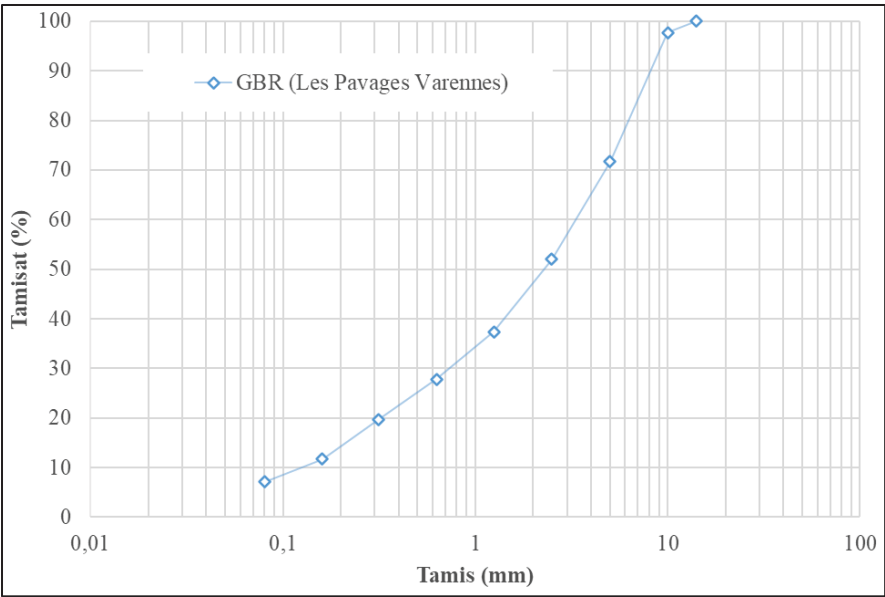


Figure 3.10 Courbe granulométrique du GBR

Tout comme pour les BAPC, les caractéristiques des GBR varient en fonction de la provenance et de l'âge de l'asphalte, ce qui affecte le degré d'oxydation du bitume. Cela rend difficile la détermination précise de la quantité de bitume pouvant être récupérée. Cependant, un test d'ignition a été réalisé, comme présenté dans le Tableau 3.8. La perte de masse mesurée au four d'ignition, suivant la méthode d'essai LC 26-006 pour la détermination de la teneur en bitume par ignition, révèle que le GBR de Varennes affiche une teneur en bitume de 7%.

Tableau 3.8 Résultats de l'essai d'ignition sur le GBR

Echantillon	GBR Varennes
Masse Initiale 1	1305,8
Masse Initiale 2	1300,8
Masse Finale 1	1213,8
Masse Finale 2	1208,1
% Bitume 1	7,0
% Bitume 2	7,1
% Bitume moyen	7,1

Scories

Harsco Minéraux récupère et traite les scories issues des fonderies et aciéries, en vue de recycler le métal ou de transformer ces scories en granulats pour la construction routière, commerciale et industrielle. La granulométrie des scories utilisées, dont les particules ont des dimensions comprises entre 0 et 5 mm, est décrite dans le Tableau 3.9 et la Figure 3.11. Les scories peuvent être facilement identifiées en laboratoire grâce à l'utilisation d'un aimant.

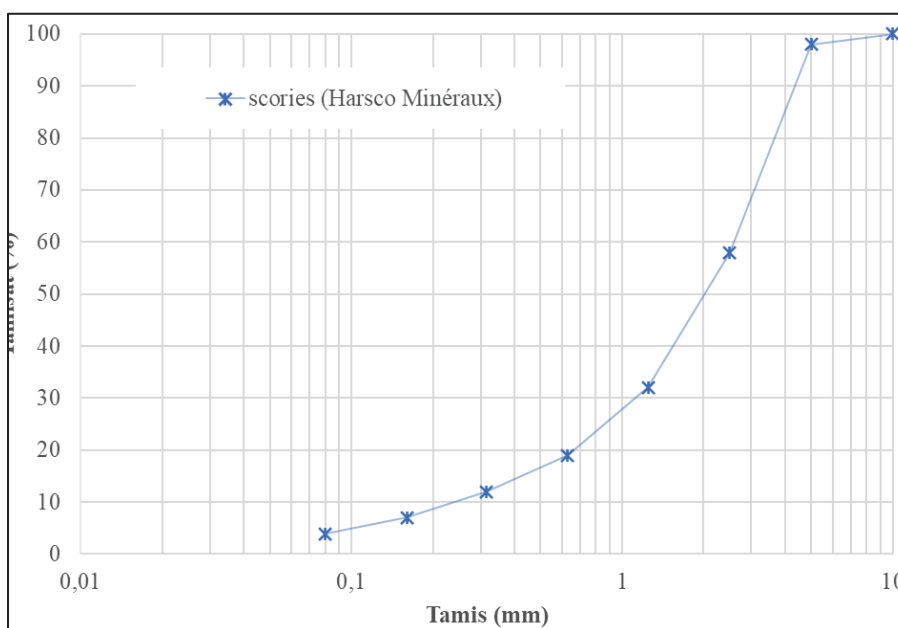


Figure 3.11 Courbe granulométrique des scories

Tableau 3.9 Description granulométrique des différentes matières résiduelles

Matériaux		GBR	BAPC	BAPC	Scories
Tamis (mm)	Provenance	Les Pavages Varennes	Demix Agrégats / Varennes	Gaspésie	Harsco Minéraux
28	Tamisat (%)	100	100	100	100
20		100	100	100	100
14		100	100	100	100
10		98	100	100	100
5		72	96	100	98
2,5		52	88	100	58
1,25		37	70	64	32
0,63		28	47	30	19
0,315		20	37	16	12
0,16		12	28	7	7
0,08		7,1	19,9	3,2	3,9

3.4.5 Pierre concassée

Le matériau de base utilisé dans ce projet est de la pierre concassée BOMIX de calibre 0-3/4 pouce. Un essai proctor modifié a été effectué selon la norme la norme canadienne CAN/BNQ 2501-255. Les résultats de cette procédure de compaction sont illustrés dans la Figure 3.12, révélant des valeurs optimales de masse volumique du sol sec à 2,32 g/cm³ et un taux d'humidité de 6,3%. Ces données mettent en lumière les conditions optimales pour atteindre la compacité désirée du sol et des mélanges sol-granat dans le cadre de cette norme.

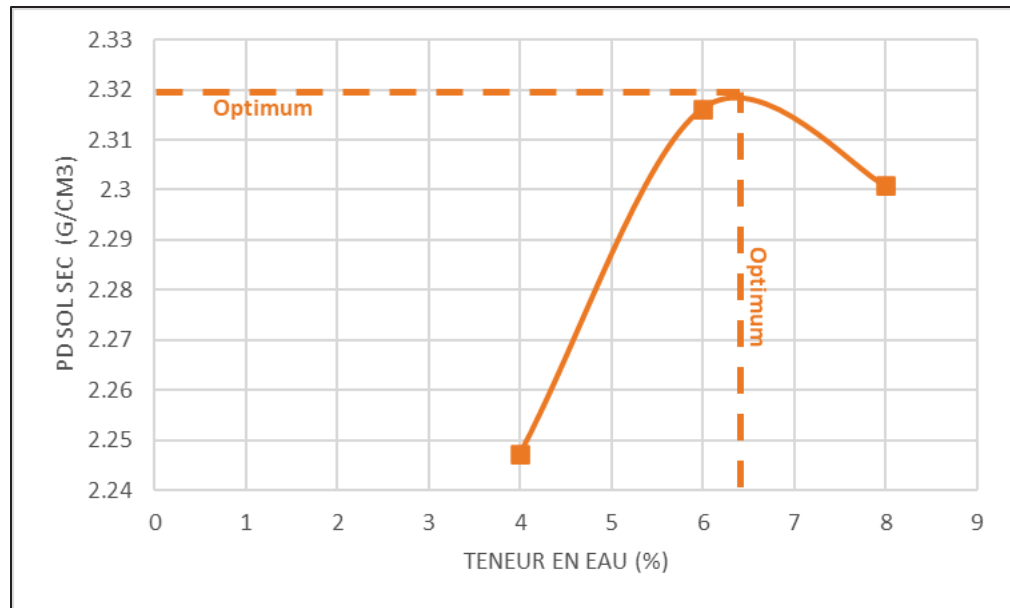


Figure 3.12 Essai Proctor modifié sur la pierre concassée BOMIX 0-3/4 po/in

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1 Formulation d'un enrobé de référence R5.8S0G sans BAPC

Cette section présente la formulation d'un enrobé de référence R5.8S0G sans BAPC. Elle détaille la composition granulométrique du mélange, mettant en lumière les différences par rapport aux spécifications initiales, notamment l'utilisation d'un type de bitume alternatif. Ensuite, elle examine les densités maximale et brute du mélange, soulignant leur conformité malgré une légère variation dans la compacité. Enfin, elle évalue la résistance à l'eau de l'enrobé, démontrant sa conformité aux exigences techniques.

4.1.1 Courbe granulométrique du mélange

Les caractéristiques de l'enrobé de référence constitueront la base pour l'analyse des résultats subséquents. La composition de cet enrobé est détaillée dans le Tableau 4.1. Il est important de noter que le type de bitume utilisé diffère de celui spécifié dans la fiche technique. Cette divergence est attribuable à l'indisponibilité du bitume spécifié en laboratoire au moment du lancement du projet.

Tableau 4.1 Composition de l'enrobé de référence

Enrobé de référence R5.8S0G				Spécifications de la fiche technique
Composition granulométrique	TV	St-Philippe de Laprairie	40%	-
	HUMMER	St-Philippe de Laprairie	60%	-
Type de bitume		PG 64E - 28		PG 58-34
Teneur en bitume (%)		5,8		5,2-5,8
Fuseau granulaire		0 mm - 5 mm		0 mm - 6 mm

Toutefois, le bitume PG 64E-28, couramment utilisé dans la zone 1, possède des propriétés supérieures. Il est donc attendu que ce substitut confère à l'enrobé des performances améliorées.

Le combiné granulométrique, illustré par la Figure 4.1, se conforme au fuseau indiqué dans la fiche technique, à l'exception de la fraction très fine qui dépasse légèrement au niveau du tamis de 80 μm . Cette légère non-conformité est due à la disponibilité limitée des granulats au moment de cette phase du projet, en raison des conditions hivernales qui ont entraîné la fermeture de toutes les carrières. Cette particularité granulométrique a été prise en compte pour choisir le taux de bitume maximal spécifié dans la fiche technique, fixé à 5,8%. En effet, une quantité accrue de particules fines implique la nécessité d'une plus grande quantité de bitume pour assurer une durabilité et des performances optimales du mélange.

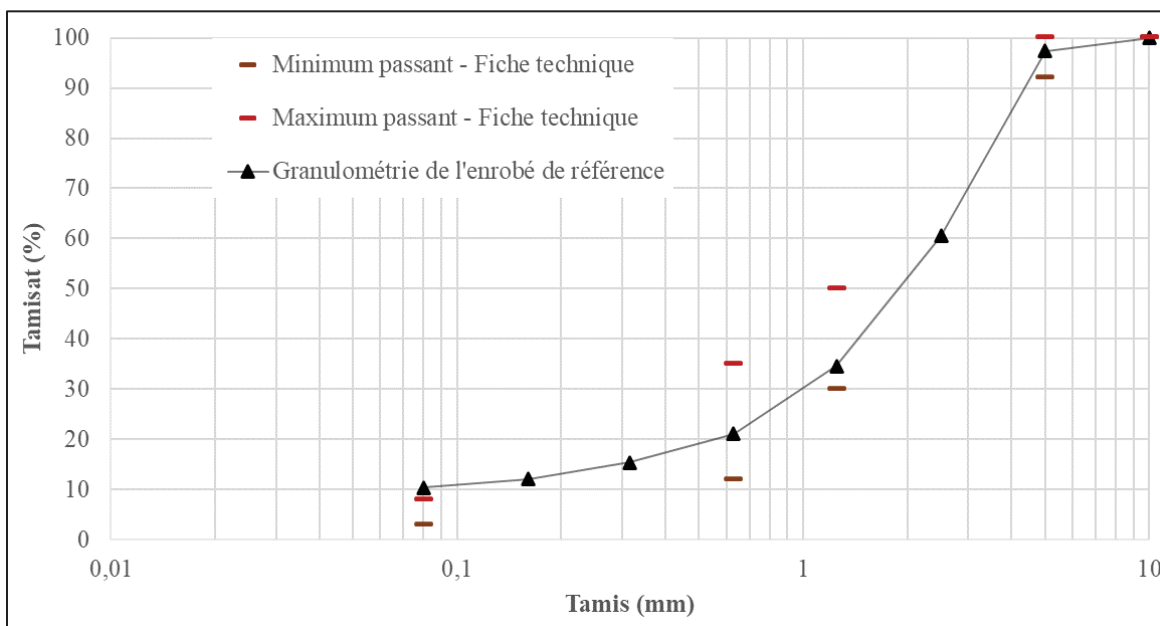


Figure 4.1 Courbe granulométrique de l'enrobé de référence

4.1.2 Densité maximale, densité brute et % de vides du mélange

Le Tableau 4.2 présente les caractéristiques volumétriques de l'enrobé de référence. Les valeurs présentées dans ce tableau sont dérivées de l'analyse de deux éprouvettes, chacune soumise à 60 coups de marteau Marshall sur chaque face. Ces tests ont permis de déterminer la densité maximale (D_{mm}) et la densité brute (D_{mb}) de l'enrobé. Les intervalles entre ces résultats sont respectivement de 0,005 et 0,01. Ces valeurs sont en parfait alignement avec les critères d'admissibilité définis par les méthodes d'essais LC 26-045 et LC 26-040. En effet, ces méthodes stipulent des intervalles de 0,011 (répétabilité) et 0,019 (reproductibilité) pour la D_{mm} , et de 0,035 (répétabilité) et 0,076 (reproductibilité) pour la D_{mb} .

Concernant les exigences spécifiées dans la fiche technique, l'examen des données contenues dans ce tableau montre que l'enrobé de référence satisfait à toutes les exigences stipulées dans la fiche technique, à l'exception de la compacité. En effet, cette dernière dépasse légèrement la limite autorisée, avec un excédent de 0,2 %. Bien que la compacité obtenue ait légèrement dépassé la limite de conformité, cette divergence reste minimale et ne devrait pas nécessiter une modification de la teneur en bitume pour atteindre une adéquation parfaite avec les spécifications. Il est important de souligner que cette légère variation, tout en étant en dehors des normes prescrites, est suffisamment restreinte pour permettre la progression vers les phases suivantes du projet.

Tableau 4.2 Caractéristiques volumétriques de l'enrobé de référence

Enrobé de référence R5.8S0G		Spécifications de la fiche technique	Conformité
D_{mm}	2,501	-	NA
D_{mb}	2,307	-	NA
Vide (%)	7,8	4% - 10%	OUI
Compacité (%)	92,2	86 % - 92 %	NON

4.1.3 Essai de tenue à l'eau

Comme détaillé dans la section méthodologie et description des essais, l'évaluation de la tenue à l'eau est effectuée sur un ensemble de six éprouvettes, dont la moitié est soumise à un processus de vieillissement tandis que l'autre reste non vieillie. Les résultats de ces tests sont consignés dans le Tableau 4.3, qui présente les caractéristiques spécifiques de chaque éprouvette, incluant la hauteur (en mm), la densité brute (D_{mb}), et le pourcentage de vides.

Lors de ces essais, deux paramètres principaux sont mesurés : la force maximale exercée sur l'éprouvette, appelée stabilité, qui sera utilisée pour le calcul de la résistance à l'eau, et le déplacement (en mm), qui indique l'amplitude de l'écrasement vertical de l'éprouvette. Ces mesures permettent d'évaluer la capacité de l'enrobé à résister aux effets délétères de l'eau, un facteur crucial pour la durabilité des enrobés de micro-surfçage.

Les valeurs de fluage sont jugées satisfaisantes, avec un résultat de 3,5 qui, malgré une valeur légèrement élevée, respecte les spécifications requises. La stabilité Marshall moyenne des éprouvettes sèches est de 15 206 N avec une tenue à l'eau de 87,7% qui est conforme aux exigences recherchées. Ainsi, l'enrobé de référence démontre des performances conformes aux spécifications techniques.

L'utilisation du BAPC soulève des inquiétudes particulières quant à leur efficacité sous des températures froides, avec l'imperméabilité comme facteur critique. Ainsi, cette section de l'étude s'est spécifiquement axée sur cette caractéristique, omettant volontairement les tests d'orniérage pour réduire l'emploi de granulats. De plus la stabilité Marshall a révélé une résistance exceptionnelle aux sollicitations mécaniques.

Tableau 4.3 Résultats de l'essai de tenue à l'eau pour l'enrobé de référence

Enrobé	Eprouvettes	% Vides	Stabilité moyenne (N)	Fluage moyen (mm)
R5.8S0G	#2 WET	8,3	13341	3,7
	#5 WET	8,3		
	#6 WET	8,2		
	#4 DRY	8,6	15206	3,5
	#3 DRY	8,4		
	#1 DRY	8,3		

Tableau 4.4 Vérification de conformité de l'enrobé de référence à la tenue à l'eau

Enrobé de référence R5.8S0G		Spécifications de la fiche technique	Conformité
Tenue à l'eau (%)	87,7	> 85%	OUI
Stabilité Marshall moyenne des éprouvettes sèches (N)	15 206	> 12 000	OUI
Fluage moyen des éprouvettes sèches (mm)	3,5	2 - 4	OUI

4.2 Étude de l'impact de la teneur en BAPC sur la compactibilité et propriétés volumétriques des enrobés

Cette section se penche sur l'intégration du BAPC dans les mélanges bitumineux, examinant son impact sur la granulométrie, les propriétés volumétriques, et le processus de compactage à l'aide de la PCG. En ajustant méticuleusement la composition granulaire pour incorporer le BAPC tout en respectant les spécifications, cette étude analyse comment la variation du bitume et l'ajout de BAPC influent sur les vides, fournissant ainsi des connaissances approfondies sur les pourcentages optimaux de bitume pour chaque type de mélange. En évaluant les variations

de la compaction et l'énergie requise, cette section offre une perspective approfondie sur l'optimisation des formulations pour assurer des performances routières supérieures.

4.2.1 Courbes granulométriques des différents mélanges étudiés

Dans le cadre de l'intégration du BAPC de Gaspésie, les combinaisons de granulats ont été légèrement modifiées pour s'aligner sur les spécifications granulométriques détaillées dans la fiche technique. Cette étape est cruciale car elle constitue la base de tout mélange bitumineux et, selon la granulométrie obtenue, elle aura divers impacts sur le taux de bitume requis ainsi que sur les performances globales du mélange.

Il convient de mettre en évidence que seule la fraction inférieure à 2,5 mm du BAPC est intégrée dans les mélanges, en remplacement partiel des granulats, à hauteur de 10 % et 25 %, du combiné granulométrique TV-Hummer, ce dernier étant utilisé dans les mêmes proportions que dans le mélange de référence. Cette spécificité entraîne une légère modification de la granulométrie pour les mélanges contenant du BAPC, les rendant plus grossiers pour les particules supérieures à 2,5 mm et légèrement plus fins pour celles situées en dessous de cette taille comme illustrée dans la Figure 4.2. Cette adaptation granulométrique est une conséquence directe de l'intégration sélective de la fraction fine du BAPC dans la composition des mélanges.

Cette approche granulométrique vise non seulement à optimiser l'utilisation du bitume dans le mélange mais aussi à respecter les critères granulométriques stricts, notamment la plage de 0-6 mm spécifiée dans la fiche technique, tout en éliminant les impuretés telles que le bois, le plastique, et le métal, souvent présentes dans le stock initial de BAPC reçu au laboratoire. Ces ajustements granulométriques et la sélection minutieuse des matériaux contribuent à améliorer la qualité et les performances du mélange bitumineux final.

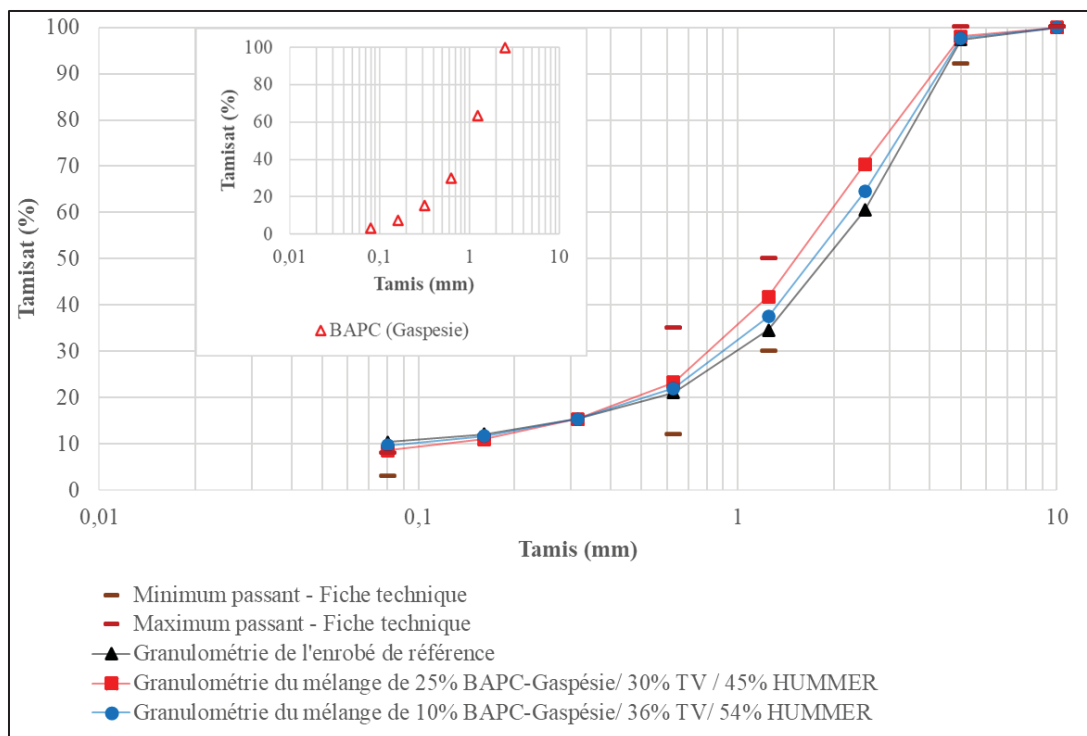


Figure 4.2 Courbes granulométriques des mélanges à 10% et 25% BAPC-Gaspésie

4.2.2 Influence de l'ajout de BAPC sur les teneurs en vides d'éprouvettes compactées avec la marteau Marshall ayant différentes teneurs en bitume d'apport

Les propriétés volumétriques jouent un rôle crucial dans chaque phase de la formulation de ce projet, car elles fournissent des indications précises pour déterminer le pourcentage de bitume à utiliser dans chaque mélange. La Figure 4.3 illustre les teneurs en vides mesurées pour différents pourcentages de bitume ajouté, pour les mélanges contenant 10 % et 20 % de BAPC. Les résultats de compacité sont disponibles dans le Tableau-A VI-1. Les valeurs reportées représentent la moyenne de deux éprouvettes, compactées à l'aide de 60 coups Marshall, et satisfaisant toutes deux aux critères d'admissibilité. Cette méthodologie garantit la fiabilité et la consistance des résultats. Il est effectivement crucial de noter que les pourcentages de vides sont calculés en fonction de la densité maximale (D_{mm}) et de la densité brute (D_{mb}). Ces dernières respectent les critères d'admissibilité, avec des intervalles respectifs de 0,005 et 0,01. Cela garantit la précision et la fiabilité des calculs effectués à partir de ces valeurs.

Il est observable que, pour les deux mélanges, l'augmentation de la concentration de bitume entraîne une réduction de la teneur en vides. Plus précisément, pour une augmentation de bitume de 3,5 % à 5,8 %, la teneur en vides chute de manière significative, passant de 16 % à 6,2 % (une diminution de 61 %) pour un ajout de 10 % de BAPC, et de 7 % à 1 % (une baisse de 85 %) pour 25 % de BAPC-Gaspésie. De plus, pour un pourcentage de bitume de 5,8 % (Celle de l'enrobé de référence), l'ajout croissant de BAPC entraîne une diminution des vides. Ces observations sont cohérentes avec les attentes : une augmentation du bitume ajouté remplit les espaces interstitiels entre les matériaux compactés, réduisant ainsi la teneur en vides. L'ajout de BAPC a un effet similaire, car il contribue à la saturation du mélange par le bitume qu'il contient, réduisant également la teneur en vides. Ces résultats soulignent l'importance de déterminer un pourcentage optimal de bitume ajouté pour atteindre les teneurs en vides conformes aux spécifications techniques.

La sélection du pourcentage final de bitume a été guidée par l'objectif de minimiser le bitume ajouté tout en maintenant des propriétés volumétriques similaires à celles du mélange de référence, et conformes aux spécifications techniques, garantissant ainsi un bon enrobage des granulats. Pour les mélanges avec 10 % de BAPC-Gaspésie, un pourcentage de 5 % de bitume ajouté a été jugée optimale pour assurer une bonne adhérence, un pourcentage inférieur étant insuffisant. Concernant les mélanges avec 25 % de BAPC-Gaspésie, les pourcentages de bitume de 3,5 %, 4 %, 4,5 %, et 5 % respectent les critères techniques, avec des teneurs en vides comprises entre 4 % et 12 %. Un pourcentage de 4 % de bitume ajouté a été retenu pour les expérimentations futures, étant donné qu'un mauvais enrobage des granulats a été observé pour des pourcentages inférieurs.

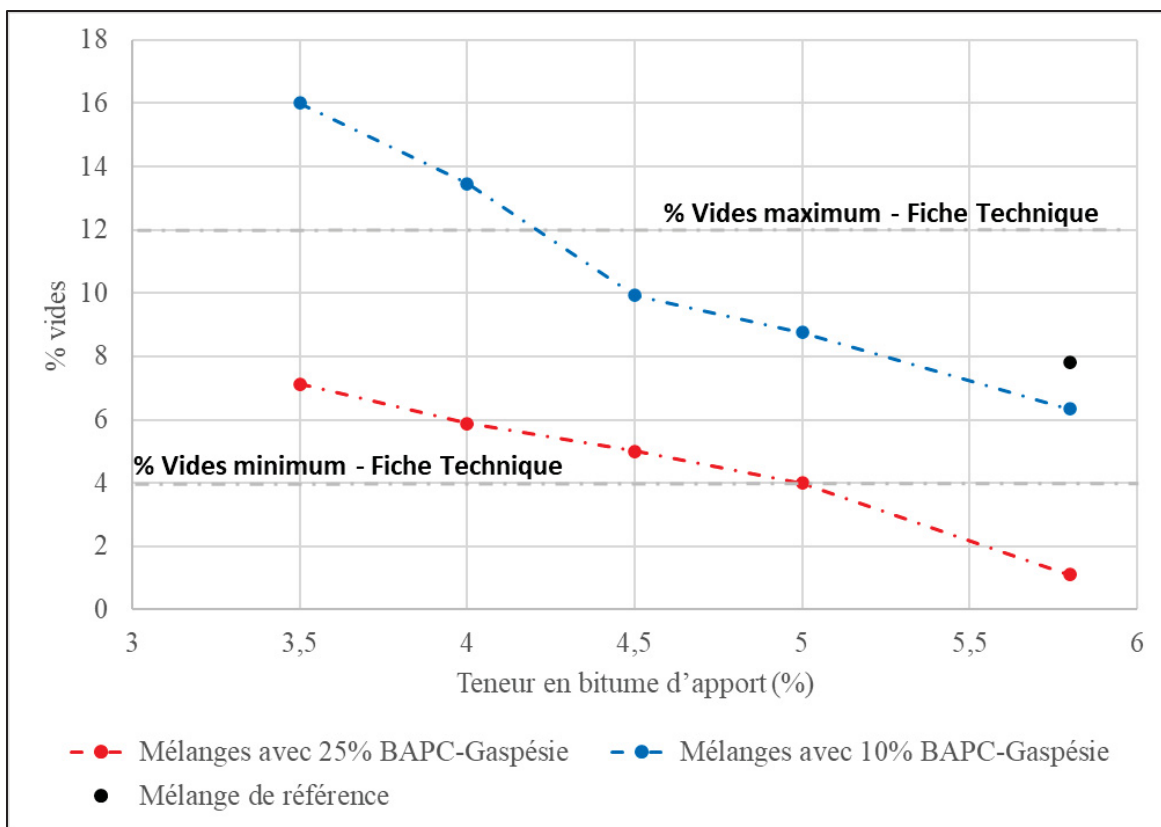


Figure 4.3 Évolution de la teneur en vides en fonction de la teneur en bitume d'apport pour les mélanges avec 10% et 25% BAPC-Gaspésie

Selon les directives du MTMD concernant le taux de bitume mobilisable, une analyse quantitative a été effectuée pour définir le pourcentage théorique de bitume additionnel nécessaire. Cette analyse, illustrée dans la Figure 4.4, a été suivie d'une comparaison avec les résultats expérimentaux. Les détails des calculs sont présentés dans l'ANNEXE V pour clarifier le processus. Il apparaît qu'un taux de mobilisation de 40 % conduit à des résultats très proches, marqués par un écart minime entre le bitume additionnel théorique et expérimental, contrairement à un taux de 25 % qui montre une différence plus significative. Cette concordance entre les résultats théoriques et expérimentaux sert à valider les hypothèses de la phase expérimentale et à justifier le choix de bitume additionnel pour les enrobés contenant 10 % et 25 % de BAPC.

Cette corrélation suggère également que le taux de mobilisation du BAPC, tel que défini par le MTMD, pourrait être sous-évalué. Cette hypothèse est soutenue par d'autres recherches mentionnées dans la revue de littérature, indiquant une possible réévaluation du taux de mobilisation pour optimiser l'utilisation du BAPC dans les formulations d'enrobés. Ces résultats mettent en lumière l'importance d'une évaluation précise du taux de bitume mobilisable pour assurer la qualité et la performance des enrobés, tout en prenant en compte les caractéristiques spécifiques du BAPC. Ce constat pourrait conduire à des ajustements dans les pratiques actuelles de formulation des enrobés, en vue d'atteindre des performances optimales tout en respectant les exigences environnementales et de durabilité.

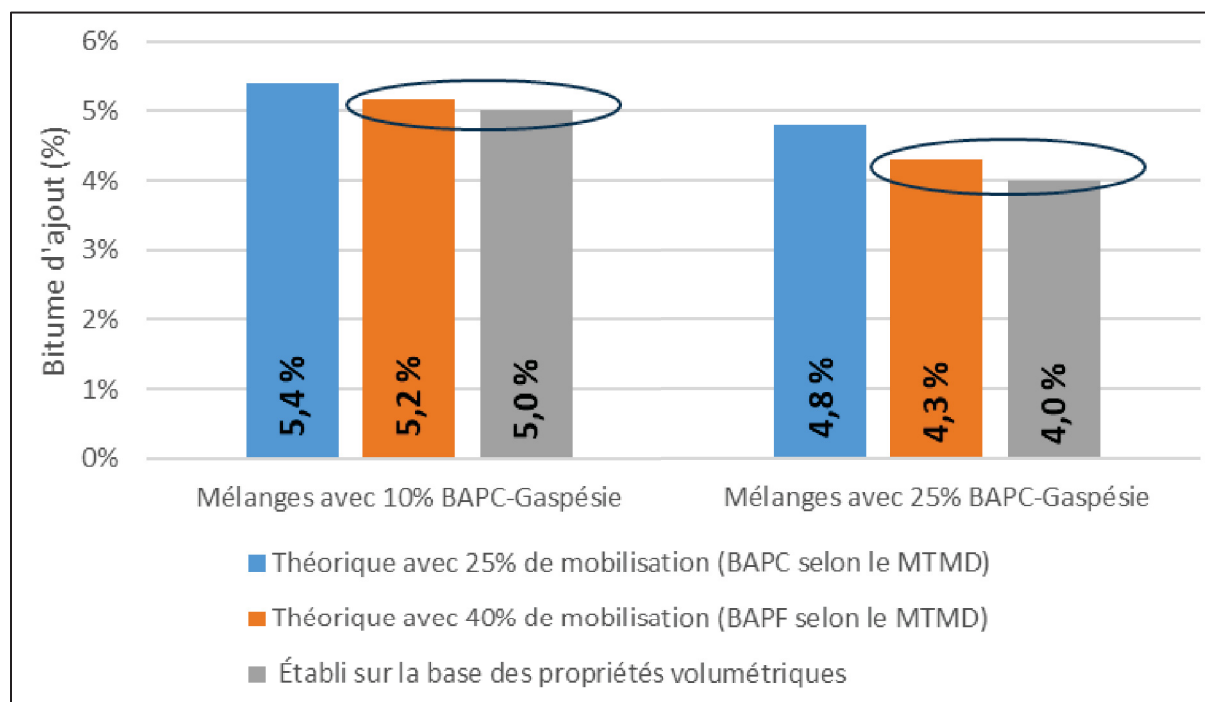


Figure 4.4 Comparaison des pourcentages de bitume d'ajout théoriques selon les facteurs de mobilisation fixés par le MTMD avec le pourcentage obtenu selon des critères volumétriques pour les mélanges avec 10% et 25% BAPC-Gaspésie

Il est essentiel de souligner que les formulations incorporant 10 % et 25 % de BAPC-Gaspésie, avec respectivement 5 % et 4 % de bitume ajouté (identifiées sous les codes B5.0S10G et B4.0S25G), satisfont pleinement aux critères établis dans la fiche technique, notamment en matière de teneurs en vides, qui doivent se situer entre 4 % et 12 %. Ces résultats sont en accord

avec ceux obtenus pour la formulation de référence R5.8S0G. Cette conformité avec les spécifications techniques, une fois établie, permet d'avancer dans le processus d'évaluation en soumettant les mélanges à des tests de compaction à l'aide de la PCG. Ces mêmes échantillons seront ensuite utilisés pour les tests de résistance à l'eau.

4.2.3 Influence de l'ajout de BAPC sur la compaction à l'aide de la PCG

La Figure 4.5 illustre l'évolution du pourcentage de vides à différentes girations à la PCG pour les mélanges R5.8S0G, B5.8S25G, B5.0S10G, et B4.0S25G. Les éprouvettes utilisées dans cette étude ont été obtenues à partir de la PCG. Six éprouvettes ont été compactées, et les résultats concernant le pourcentage de vides, présentés dans le Tableau 4.5, représentent les moyennes de ces dernières. Il ressort que le nombre de girations nécessaires varie pour chacun des enrobés, respectivement 89, 49, 51, et 84, avec des pourcentages de vides de 11,3 %, 4,8 %, 10,2 % et 8,1 %. Il est crucial de noter que les hauteurs cibles variaient pour chaque éprouvette, car elles étaient basées sur les hauteurs des éprouvettes Marshall à 40 coups. Par conséquent, la comparaison du nombre de girations en fin de compactage n'est pas pertinente. Cependant, il est possible de comparer les tendances des courbes et l'énergie ou le nombre de girations nécessaires pour atteindre un niveau de vides cibles, qui est commun à tous les mélanges. Cette approche permet une évaluation plus précise et pertinente des performances de compactage.

La teneur en bitume est déterminante dans le processus de compaction des matériaux bitumineux, jouant un rôle crucial pour atteindre une compaction adéquate. Cette dernière est indispensable pour obtenir la densité souhaitée du matériau, garantissant ainsi sa durabilité et sa résistance face au trafic. Une teneur en bitume insuffisante peut rendre le mélange trop sec, compliquant ainsi la compaction. Ceci est illustré par les enrobés R5.8S0G et B5.8S25G, qui, partageant la même composition granulaire mais ayant des teneurs en bitume différentes, montrent des comportements de compaction distincts. L'enrobé B5.8S25G, en particulier, montre une compaction plus rapide comparée à celle de l'enrobé R5.8S0G, due à une teneur excessive en bitume, résultant en un pourcentage de vides particulièrement bas.

Le Coefficient d'Énergie de Compactage (CEI) est un indicateur représentant l'effort requis par un rouleau compacteur pour atteindre jusqu'à 92 % de la Densité Maximale Théorique (G_{mm}) sur le terrain (Yang et al., 2021). Le CEI est généralement calculé en fonction de l'aire sous la courbe (illustrée sur la Figure-A VII-1) représentant la densité obtenue après un certain nombre de gyrations jusqu'à atteindre 92 % de G_{mm} , la densité maximale. L'intérêt de l'indice de compactage ne réside pas dans une exploration exhaustive de la théorie du compactage, mais il est reconnu comme un outil pragmatique et efficace pour évaluer le compactage des enrobés bitumineux.

Dans le cadre de ce projet, nous appliquerons une adaptation spécifique de cette approche afin d'estimer l'énergie spécifiquement consommée pour la compaction de chaque échantillon. Cette méthode permettra une analyse plus fine de la compactibilité des différents mélanges testés. Il est important de souligner que les mélanges requérant des quantités d'énergie plus faibles pour leur compaction sont à privilégier, car cela indique une facilité de compactage accrue sur le terrain. Cette adaptation a pour but de fournir une compréhension approfondie de l'influence des différentes formulations sur le processus de compaction et, par conséquent, sur la qualité et la durabilité des enrobés bitumineux.

L'évaluation de l'énergie de compaction nécessaire pour chaque mélange permettra d'optimiser les processus de mise en œuvre et d'assurer des performances routières supérieures. Nous avons sélectionné le pourcentage de vides de l'enrobé de référence (11,3 % de vides) comme point de comparaison car c'est un niveau de vides atteint par tous les mélanges au cours du compactage à la PCG et de plus celui de notre mélange de référence après compaction complète. Ainsi, l'énergie de compaction (A, B, C, et D) sera calculée pour chaque enrobé afin de déterminer l'énergie nécessaire pour atteindre ce point de référence. De plus, l'énergie restante requise pour achever la compaction de chaque enrobé sera également calculée.

La Figure 4.5 illustre l'évolution du pourcentage de vides à différentes girations à la PCG pour les mélanges R5.8S0G, B5.8S25G, B5.0S10G, et B4.0S25G. Nous observons que ces différents mélanges requièrent un nombre variable de girations ainsi que des niveaux d'énergie

distincts pour atteindre la hauteur spécifiée, provenant des éprouvettes Marshall. Plus précisément, les nombres de girations nécessaires sont de 89, 49, 84, et 51, avec des énergies requises de 1354, 379, 996, et 718, respectivement. Cette variation est attribuable aux différences dans la composition des mélanges, qui entraînent des comportements de compaction distincts. Il est à noter que l'augmentation de la teneur en BAPC améliore la compaction des enrobés car de l'enrobé de référence sans BAPC à l'enrobé ayant 25% de BAPC Gaspésie et 5,8% de bitume on observe une réduction de l'effort de compaction. Cette amélioration est observée malgré l'ajustement de la quantité de bitume d'apport. En conclusion, l'ajout de BAPC contribue à réduire l'effort nécessaire à la compaction, réduisant ainsi l'énergie nécessaire à la compaction.

Il a également été nécessaire d'examiner comment l'enrobé se comporterait si seul l'ajout de BAPC à hauteur de 25% était réalisé sur l'enrobé de référence (R5.8S0G), sans ajuster le taux de bitume additionnel. Comme prévu, cet enrobé modifié (R5.8S25G) a montré une énergie de compaction nettement inférieure, avec un $D=116$ et un pourcentage de vides de 11,3%. De plus, des traces de ressuage ont été observées après la compaction de ces éprouvettes. Cela constitue un argument supplémentaire en faveur de l'idée que l'ajout de BAPC, sans réduction du taux de bitume, influence considérablement le comportement de l'enrobé. Il est à noter qu'une partie du bitume contenu dans le BAPC contribue au nouveau mélange.

Suite à l'analyse des propriétés volumétriques présentée dans la section précédente, les formules B5.0S10G et B4.0S25G ont été sélectionnées. Elles montrent une évolution quasi identique en termes de compaction. Une énergie de compaction de $B=579$ (pour un % de Vides de 11.3) est requise pour ces deux enrobés, selon l'enrobé de référence.

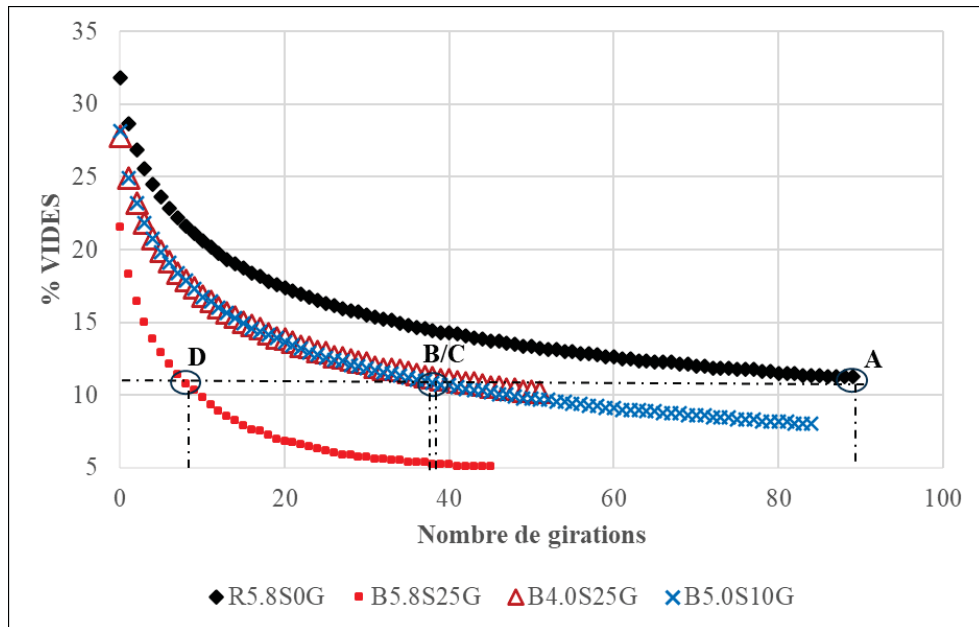


Figure 4.5 Présentation de l'évolution des % de vides à différentes girations à la PCG des mélanges R5.8S0G, B5.8S25G, B5.0S10G et B4.0S25G

Comme observé dans le Tableau 4.5, l'énergie de compaction semble évoluer proportionnellement avec le pourcentage de vides, indépendamment de la composition des enrobés. La présence d'une quantité optimale de bitume, un facteur clé influençant le pourcentage de vides, est bénéfique pour la compaction. De cette étude, nous pouvons tirer comme conclusion que l'ajout de BAPC sans ajustement de la teneur en bitume diminue considérablement l'énergie de compaction. Cela impacte cependant les performances de l'enrobé, comme le montre l'effet de ressuage immédiatement visible. Par ailleurs, l'intégration du BAPC avec une réduction de la teneur en bitume additionnel diminue aussi l'énergie nécessaire à la compaction, sans affecter négativement le mélange. Cet effet positif sera examiné plus en détail dans les sections suivantes.

Tableau 4.5 Energie de compaction des enrobés en fonction des teneurs en vides

Enrobé	Hauteur Marshall40 (mm)	Hauteur PCG spécifiée (mm)	%Vides final	Énergie (%Vides final)	Énergie (%Vides=11.3)
R5.8S0G	66,8	69,3	11,3	1354	A=1354
B5.8S25G	65,7	68,2	4,8	379	D=116
B4.0S25G	67,9	70,5	10,2	718	B=579
B5.0S10G	66,6	67,9	8,1	996	C=579

4.3 Influence de la teneur en BAPC sur la tenue à l'eau et l'orniérage

4.3.1 Tenue à l'eau

La fiche technique présentée dans l'ANNEXE I établit des critères stricts concernant la Stabilité Marshall ($>12\ 000$ N), la Tenue à l'eau ($>85\ %$), et le Fluage (2-4 mm). La Figure 4.6 montre la stabilité moyenne des éprouvettes, à la fois sans trempage et avec trempage, c'est-à-dire respectivement pour les éprouvettes ayant subi un vieillissement prolongé et celles qui ne l'ont pas subi. Il est observé que la stabilité moyenne s'accroît avec l'ajout de BAPC, affichant des valeurs de 15 206 N pour R5.8S0G (0 % de BAPC), de 17 364 N pour B4.0S25G (25 % de BAPC), et de 20 828 N pour B5.0S10G (10 % de BAPC). Par ailleurs, ces mélanges montrent des pourcentages de vides décroissants, à savoir 8,4 %, 6,9 %, et 5,2 %, respectivement. Ce qui permet de conclure que l'ajout de BAPC conduisant à la diminution du pourcentage de vides améliore effectivement la stabilité Marshall. De plus, la réduction des pourcentages de vides améliore également la stabilité Marshall, car cela implique une diminution de la quantité de pores, réduisant ainsi la facilité d'infiltration de l'eau dans l'enrobé et diminuant l'impact du vieillissement.

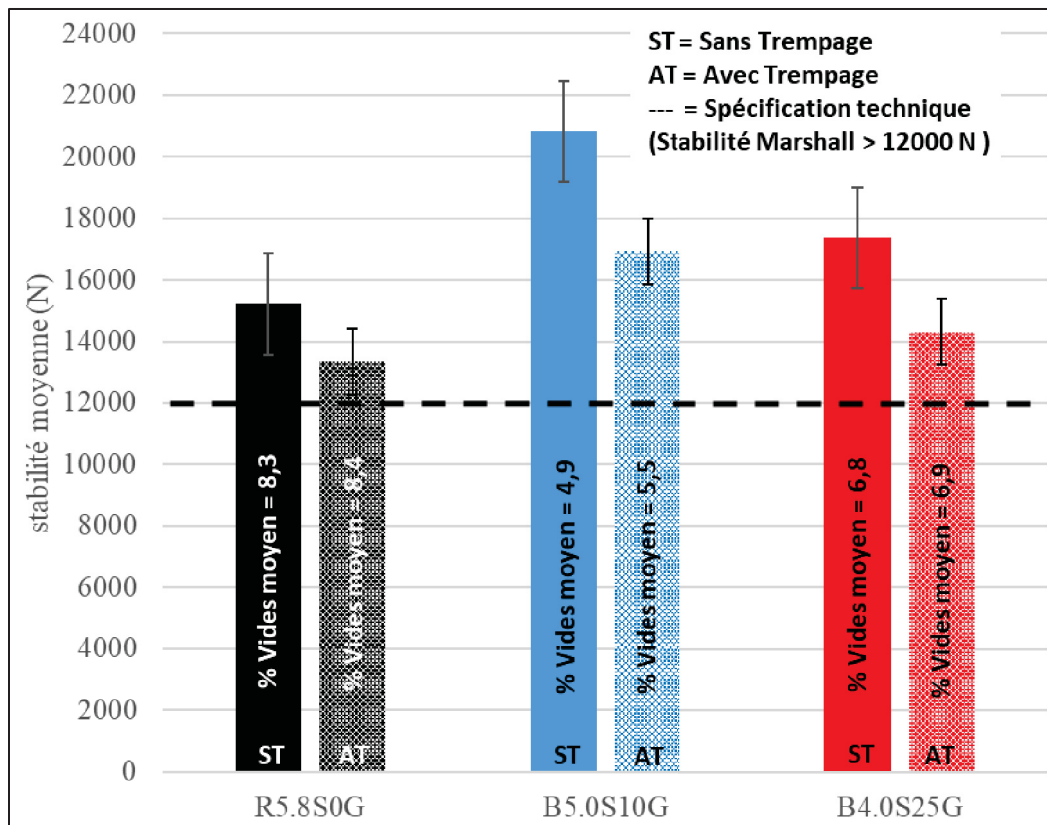


Figure 4.6 Stabilité Marshall (N) des enrobés R5.8S0G, B4.0S25G et B5.0S10G

Tous les enrobés, R5.8S0G, B4.0S25G, et B5.0S10G, satisfont aux exigences de la fiche technique, affichant des stabilités supérieures à 12 000 N, que ce soit avec ou sans trempage. Parmi eux, l'enrobé B5.0S10G démontre des performances supérieures. Les résultats obtenus pour le fluage, présentés dans le Tableau 4.6, respectent également les critères de la fiche technique, avec des valeurs de 2,5 et 3,6 mm pour des teneurs en BAPC de 25 % et 10 %, respectivement.

Tableau 4.6 Vérification de conformité des enrobés B4.0S25G et B5.0S10G à la stabilité Marshall et fluage

Propriétés	Spécifications de la fiche technique	R5.8S0G	B5.0S10G	B4.0S25G
Stabilité Marshall moyenne des éprouvettes sèches (N)	> 12 000	15 206	20 828	17 364
Fluage moyen des éprouvettes sèches (mm)	2 – 4	3,5	3,6	2,5
Conformité		OUI	OUI	OUI

La Figure 4.7 montre que seul l'enrobé de référence R5.8S0G affiche une tenue à l'eau supérieure à 85 %, tandis que les performances des deux autres enrobés avec BAPC sont très proches de cette limite. Ce constat soulève des interrogations, surtout que, comme mentionné précédemment, l'enrobé B5.0S10G présente une stabilité supérieure. Puisque l'enrobé de référence a les pourcentages de vides les plus élevés, la diminution de performance en termes de tenue à l'eau pour les mélanges contenant du BAPC ne peut pas être directement attribuée à ces pourcentages de vides.

Cependant, il est important de noter que, bien que conforme, l'enrobé de référence se situe à peine au-dessus de la limite basse acceptable. Les mélanges avec BAPC montrent des performances légèrement inférieures, ce qui pourrait suggérer un impact négatif du BAPC sur la tenue à l'eau. Il convient de rappeler que le choix des mélanges n'a pas été optimisé en fonction des performances mais était basé sur des considérations volumétriques. Par conséquent, des tests supplémentaires sont recommandés pour valider ou infirmer cette baisse de performance, en particulier à basse température, lors de la phase suivante de ce projet.

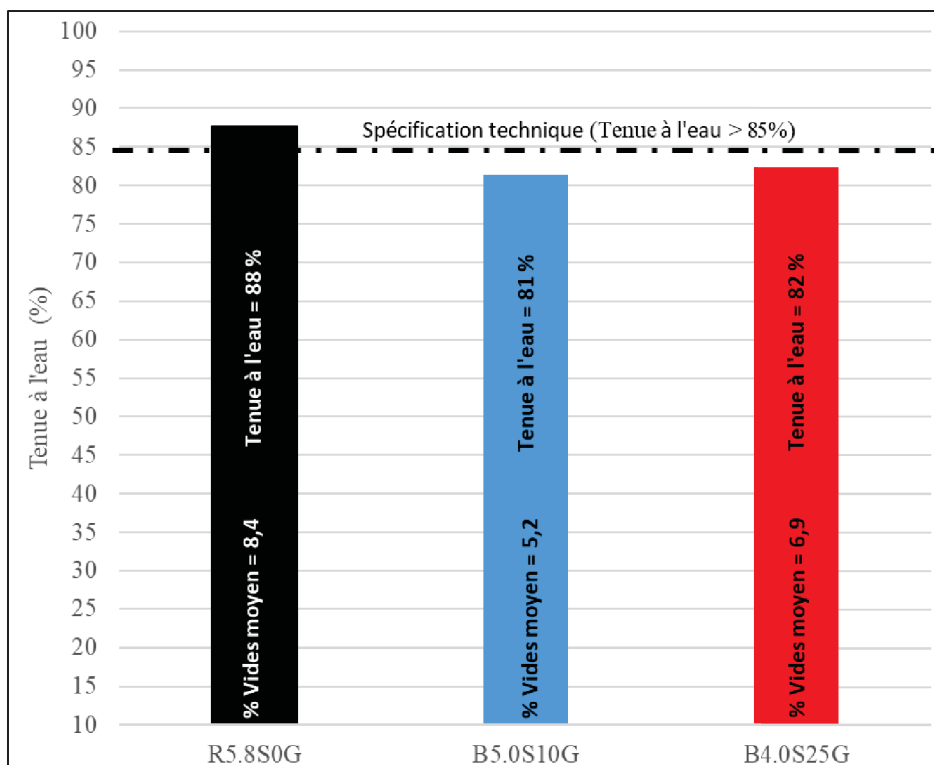


Figure 4.7 Tenue à l'eau des enrobés R5.8S0G, B5.0S10G et B4.0S25G

4.3.2 Orniérage

Comme le montre la Figure 4.8, les deux formulations respectent parfaitement les critères de la fiche technique au niveau de la résistance à l'orniérage, à savoir moins de 7,5 % de déformation après 3 000 cycles de chargement et moins de 10 % après 10 000 cycles. Il est notable que, même après 30 000 cycles, les enrobés démontrent une résistance remarquable. Ces résultats confirment la conformité aux exigences techniques, et ouvrent également la voie à des applications potentielles dans des zones à fort trafic, telles que la ville de Montréal.

L'enrobé B5.0S10G affiche des performances légèrement supérieures à celles de B4.0S25G, ce qui est cohérent avec les observations faites concernant la stabilité Marshall dans la section précédente. Cette constatation renforce l'idée qu'un enrobé incorporant 10 % de BAPC serait plus avantageux que celui contenant 25 % de BAPC. Cette conclusion est en accord avec les

perspectives de plusieurs entrepreneurs favorisant l'ajout de 10 % de BAPC, comme cela sera exploré dans les sections suivantes du document.

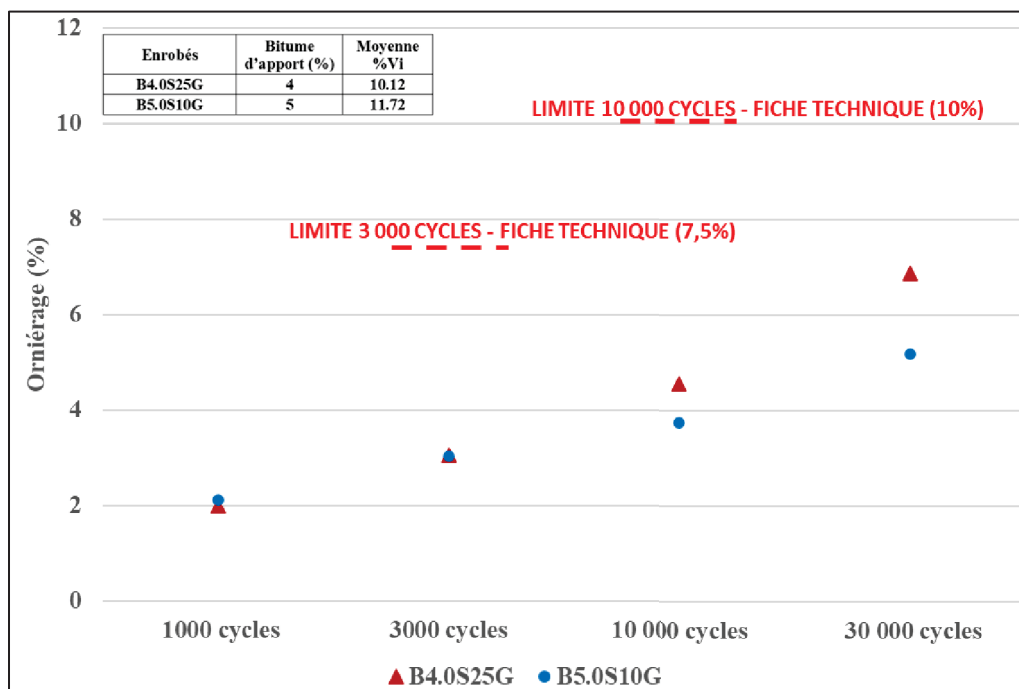


Figure 4.8 Évolution du pourcentage d'ornières pour les mélanges B4.0S25G

4.3.3 Essai d'orniérage modifié

La Figure 4.9 illustre l'évolution du pourcentage d'ornière entre une plaque classique de 50 mm et une plaque modifiée avec 30 mm d'enrobé compacté sur une couche de pierres concassées de 70 mm de hauteur. Les valeurs présentées dans l'essai d'orniérage classique sont une moyenne des résultats obtenus pour deux différentes plaques, tandis que celle de l'orniérage modifié a été obtenue sur une seule plaque, due à la complexité de la démarche de compaction. Les performances de ces deux types de plaques respectent les spécifications techniques établies. La différence de performance entre les deux plaques est minime, même après 30 000 cycles. La crainte était un possible décollement entre la base granulaire et l'enrobé, mais les résultats obtenus confirment une bonne adhésion entre les deux couches.

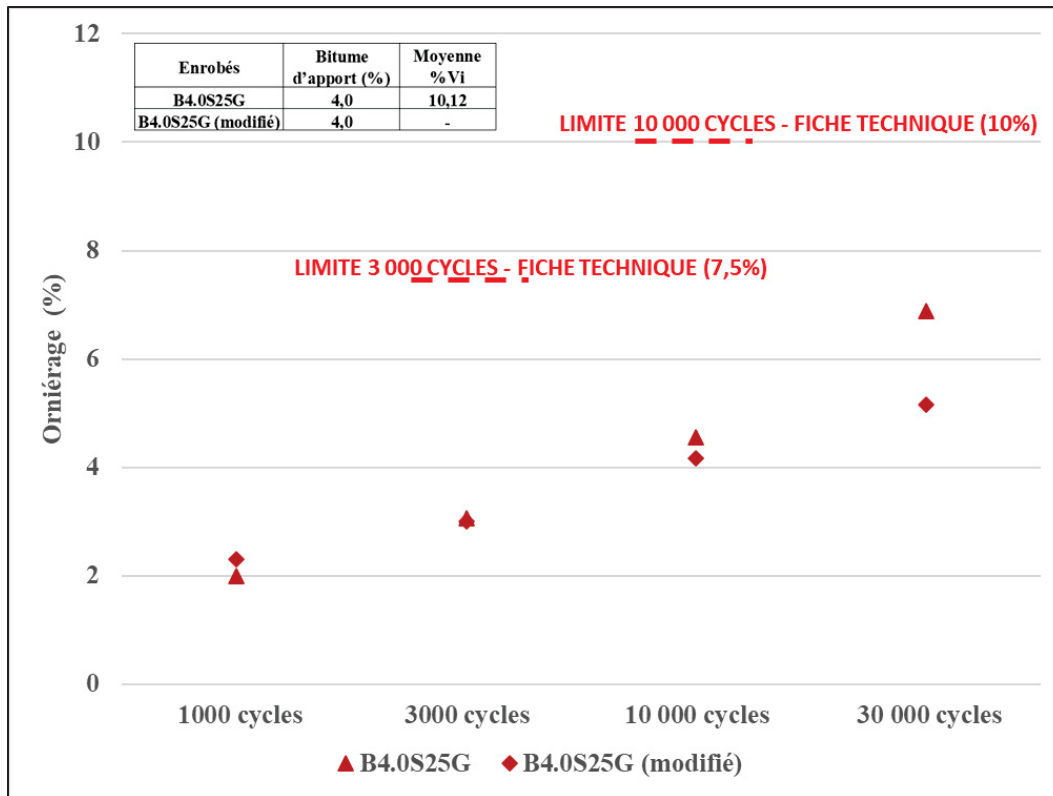


Figure 4.9 Comparaison de l'évolution du pourcentage d'ornières pour les essais d'orniéage classique et modifié du mélange B4.0S25G

La Figure 4.10 ci-dessous présente l'éprouvette B4.0S25G avant et après le test d'orniéage modifié. L'absence d'arrachement observée permet de supposer que le mélange peut être utilisé à une échelle réelle en chantier, offrant ainsi une perspective approximative de son possible comportement et validant la fiabilité de l'enrobé B4.0S25G à être utilisé comme enrobé de micro-surfacement.



Figure 4.10 Présentation de l'éprouvette B4.0S25G avant et après le test d'orniérage modifié

4.4 Influence des propriétés du BAPC sur les propriétés volumétriques des enrobés : exemple pour une teneur de 10% en BAPC

La teneur en bitume est un facteur essentiel dans la composition des enrobés bitumineux. Le changement de BAPC, qui peut contenir une teneur en bitume différente, peut avoir un impact significatif sur les propriétés de l'enrobé. De plus, le squelette granulaire de l'enrobé sera différent si on utilise un BAPC de dimensions différentes. Cela peut affecter la densité, la teneur en vides, et d'autres propriétés mécaniques de l'enrobé. Par conséquent, il est important d'étudier ces facteurs lors de la conception des mélanges d'enrobés bitumineux.

Le BAPC de Varennes est utilisé tel quel, avec une granulométrie comprise entre 0 et 5 mm, sans aucun tamisage ni séchage préalable.

Nous observons que la granulométrie du mélange final, telle qu'elle est illustrée sur la Figure 4.11, est similaire à celle du mélange contenant 10 % de BAPC de Gaspésie, malgré les différences dans la granulométrie des deux sources de bardeau. Il est à noter que, pour tous les mélanges, seul l'intervalle supérieur à 80 microns montre un léger écart.

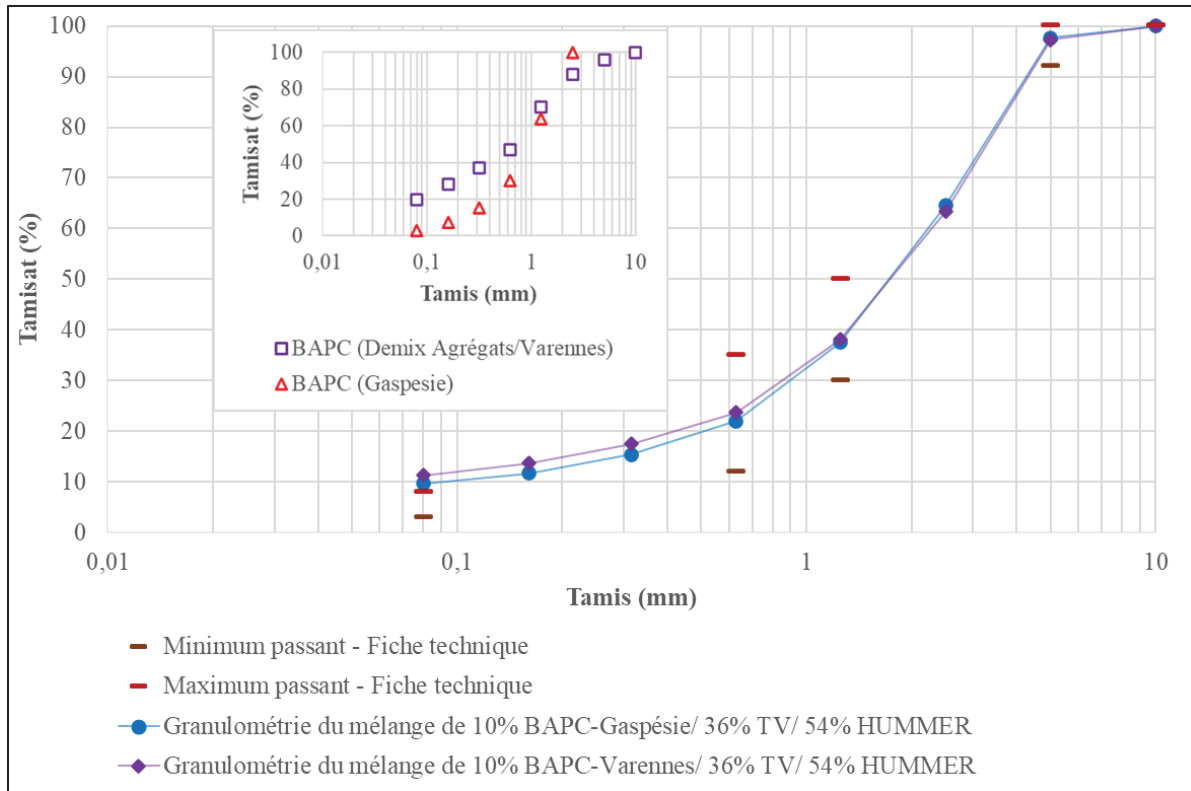


Figure 4.11 Courbes granulométriques des mélanges à 10% BAPC-Gaspésie et 10% BAPC Varennes de compositions granulaires identiques (TV/Hummer)

Outre l'aspect granulométrique, la Figure 4.12 illustre les propriétés volumétriques, à savoir le D_{mm} et le pourcentage de vides, des enrobés fabriqués selon la méthode Marshall avec 60 coups, incluant le mélange de référence ainsi que les mélanges contenant 10 % de BAPC de Varennes et de Gaspésie, qui ont des compositions granulaires identiques. Les résultats relatifs à la compacité sont détaillés dans le Tableau A VI-1. Les valeurs indiquées sont des moyennes issues de deux éprouvettes, chacune compactée à l'aide de 60 coups Marshall et satisfaisant aux critères d'admissibilité en termes de répétabilité et reproductibilité. Cette méthodologie assure la fiabilité et la cohérence des résultats obtenus.

Nous observons que la D_{mm} diminue avec l'ajout de BAPC, les valeurs décroissantes se présentant dans l'ordre suivant : l'enrobé de référence, 10 % BAPC de Gaspésie, puis 10 % BAPC de Varennes. Cette diminution est attribuable à la faible densité du BAPC (1,993), qui remplace une partie des granulats, réduisant ainsi la D_{mm} globale des mélanges. Notamment, la D_{mm} de B5.0S10G (Gaspésie) est supérieure à celui de B5.0S10B (Varennes), indiquant que le BAPC de Gaspésie a une densité plus élevée que celui de Varennes, ce qui est logique compte tenu du fait que ce dernier contient plus de bitume que celui de Gaspésie (28% au lieu de 16%).

Le pourcentage de vides est de 5,2 % pour le mélange contenant le BAPC de Varennes, contre 8,7 % pour celui de Gaspésie. Cette différence peut être expliquée par la variation de la D_{mm} mentionnée précédemment et par les caractéristiques spécifiques des deux types de bardeaux, notamment leur teneur en bitume, estimée à 28 % pour Varennes et à 16 % pour Gaspésie lors du test d'ignition. Le taux de bitume d'apport étant plus élevé pour le BAPC de Varennes, cela conduit à une réduction des vides en raison de l'excès de bitume présent dans les pores. En conséquence, il semble probable que l'utilisation du BAPC de Varennes nécessiterait un taux de bitume d'ajout inférieur à 5,0 %. Par ailleurs, les résultats de compacité, affichant une valeur de 95,4 % pour le BAPC de Varennes, dépassent la limite de 92 % fixée par la fiche technique. Ces résultats ne satisfont pas aux exigences techniques et soulignent la nécessité d'optimiser les propriétés volumétriques afin de déterminer un pourcentage de bitume d'ajout approprié.

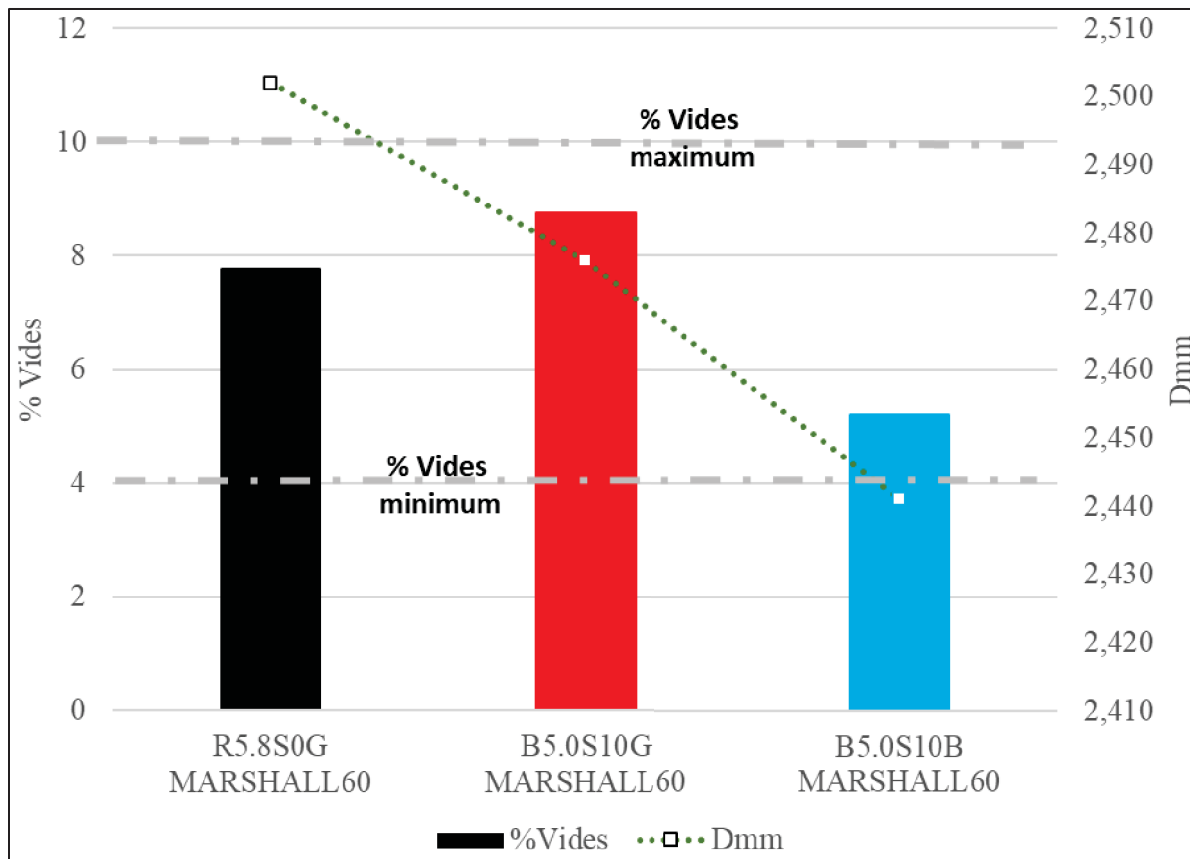


Figure 4.12 Comparaison des Propriétés volumétriques obtenues des éprouvettes Marshall 60 coups avec l'enrobé de référence, 10% BAPC Varennes et Gaspésie de compositions granulaires identiques

4.5 Étude d'un nouveau mélange avec 10% BAPC-Varennes / 10% GBR

Le nouveau combiné granulométrique, intégrant des matériaux variés tels que le BAPC de Varennes, les scories, les criblures et le GBR, est minutieusement analysé dans cette phase. À travers les sous-sections qui suivent, nous examinerons en détail l'impact de ce mélange sur divers aspects, allant de la teneur en bitume d'apport, en passant par la tenue à l'eau et l'orniérage. Cette étude vise à éclairer les performances et la viabilité de cette nouvelle formule,

4.5.1 Présentation du nouveau combiné granulométrique

Le combiné granulométrique du nouveau mélange, incorporant des constituants variés tels que le BAPC de Varennes, les scories, les criblures, et le GBR, se conforme intégralement aux exigences granulométriques spécifiées par la fiche technique. Cela inclut l'absence du léger excès observé au niveau des 80 microns, contrairement à la formule de référence et au mélange contenant 10 % de BAPC de Gaspésie. Toutefois, les différences entre ces mélanges sont minimales, et cet écart peut être considéré comme négligeable. Par conséquent, il est plausible que les variations en termes de caractéristiques volumétriques et de performances découlent de la nature spécifique des composants, plutôt que de la composition granulométrique en elle-même.

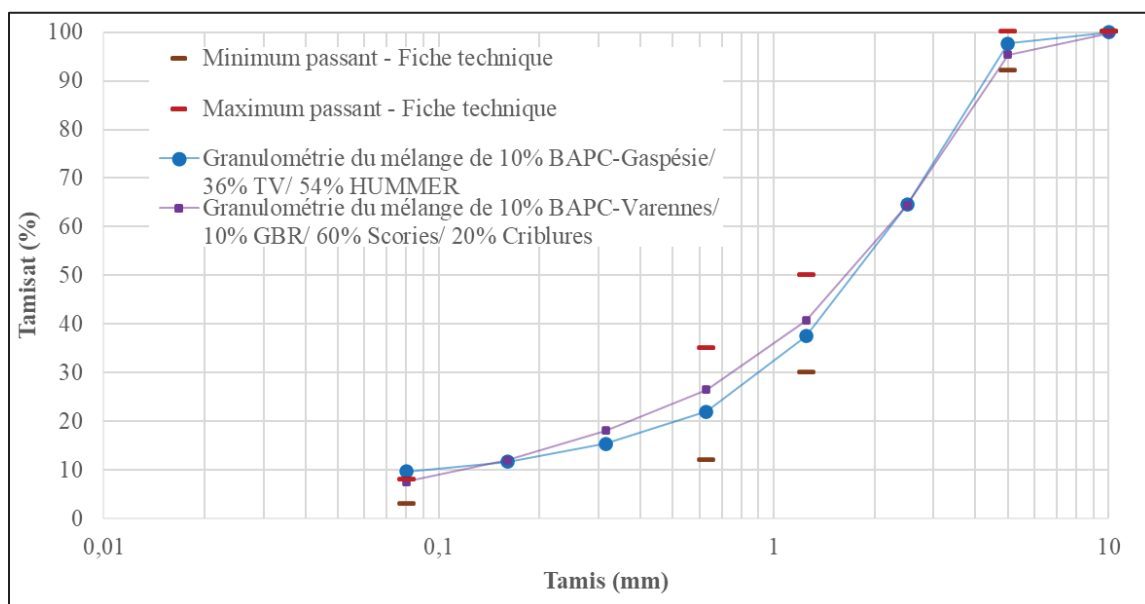


Figure 4.13 Courbes granulométriques des mélanges à 10% BAPC-Gaspésie et 10% BAPC-Varennes de compositions granulaires différentes

4.5.2 Détermination de la teneur en bitume d'apport à partir des propriétés volumétriques

À l'instar des enrobés précédemment confectionnés, le taux de bitume d'apport a été principalement déterminé en analysant les propriétés volumétriques des mélanges à différents

pourcentages de bitume. Les informations relatives aux pourcentages de vides, présentées dans la Figure 4.14, et à la compacité, figurant dans le Tableau A VI-1, sont les moyennes issues de l'analyse de deux échantillons. Ces derniers ont été compactés en utilisant 60 coups selon la méthode Marshall et répondent tous deux aux critères d'acceptabilités requis, garantissant ainsi la précision et la cohérence des données collectées.

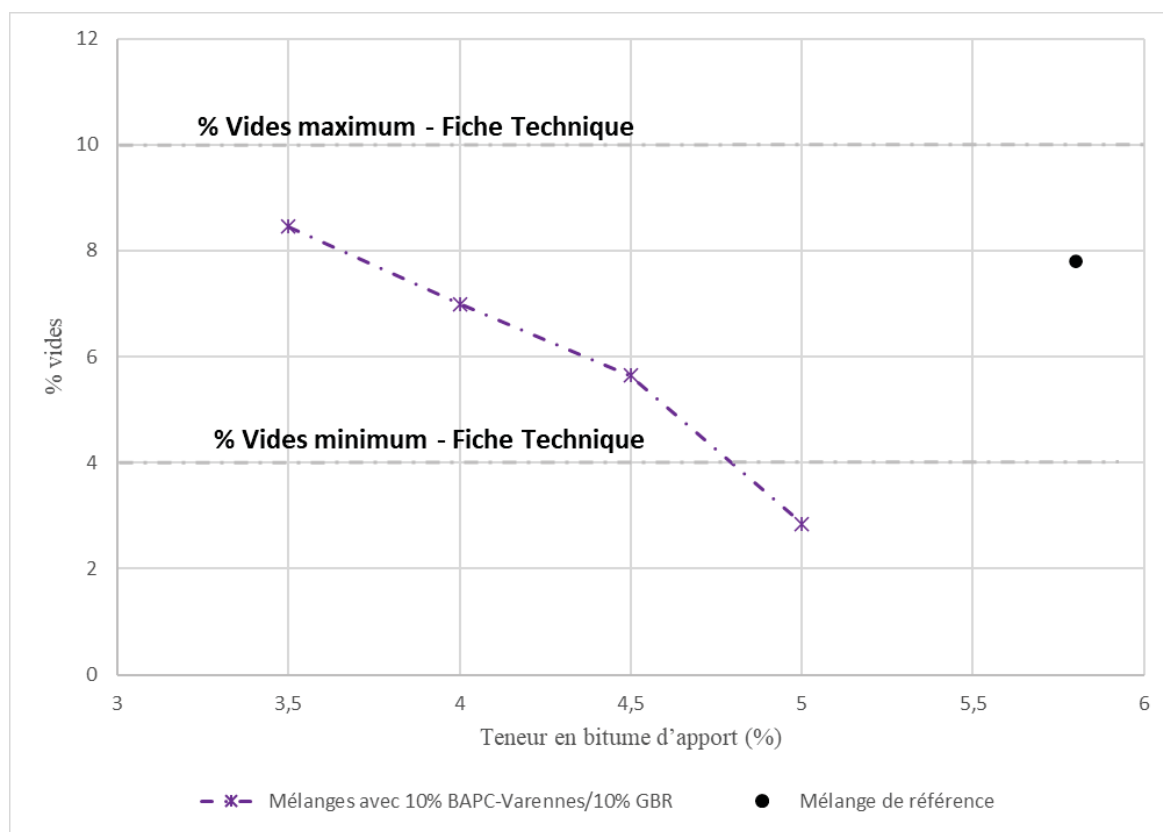


Figure 4.14 Évolution de la teneur en vides en fonction de la teneur en bitume d'apport obtenues des éprouvettes Marshall 60 coups avec 10% BAPC-Varennnes/10%GBR

Comme il est indiqué dans la Figure 4.14, le pourcentage de vides diminue avec l'augmentation de la teneur en bitume d'apport. Un apport de 5,8 % de bitume, similaire à celui de l'enrobé de référence, n'a pas été retenu pour cette formulation, car il aurait conduit à des résultats insatisfaisants, au vu des analyses effectuées dans la section 4.4 précédente. Il en a été déduit qu'une réduction du taux de bitume d'apport inférieure à 5 % était essentielle. Les mélanges

contenant 4,5 %, 4 % et 3,5 % de bitume respectent les critères en termes de pourcentage de vides. Cependant, un apport de 4 % de bitume avec un pourcentage de vides de 7 % a été considéré comme optimal pour garantir un bon enrobage, les concentrations inférieures étant jugées insuffisantes. Ceci malgré le fait que la compacité atteigne 93 % dépassant légèrement la limite technique fixée à 92 %. En effet, la présence du GBR, associée à la teneur élevée en bitume du BAPC Varennes, explique pourquoi il est nécessaire d'ajouter seulement 4% de bitume d'apport et non pas 5% comme pour le mélange sans GBR et avec le BAPC Gaspésie.

Le taux de bitume d'ajout tel que présenté sur la Figure 4.15, à la fois théorique et expérimental, pour le mélange contenant 10 % de BAPC de Varennes a été étudié, prenant en compte des taux de mobilisation de 25 % et 40 % selon les facteurs de mobilisation du MTMD, pour cet enrobé. Le calcul théorique, basé sur une mobilisation de 25 % pour le BAPC, suggère un taux de bitume d'ajout de 4,4 %. Par ailleurs, le calcul théorique pour une mobilisation de 40 %, applicable au BAPF, indique un taux de bitume d'ajout de 4 %, ce qui correspond au taux expérimentalement observé. Cette concordance entre les résultats théoriques et expérimentaux confirme la validité des hypothèses formulées lors de la phase expérimentale et justifie le choix d'un taux additionnel de bitume de 4 %, comme précédemment mentionné, en tenant compte des propriétés volumétriques du mélange. Cette corrélation renforce également l'hypothèse émise auparavant pour les enrobés contenant du BAPC de Gaspésie, ainsi que les observations faites dans la littérature, suggérant que le taux de mobilisation du BAPC, tel que défini par le MTMD, pourrait être sous-estimé.

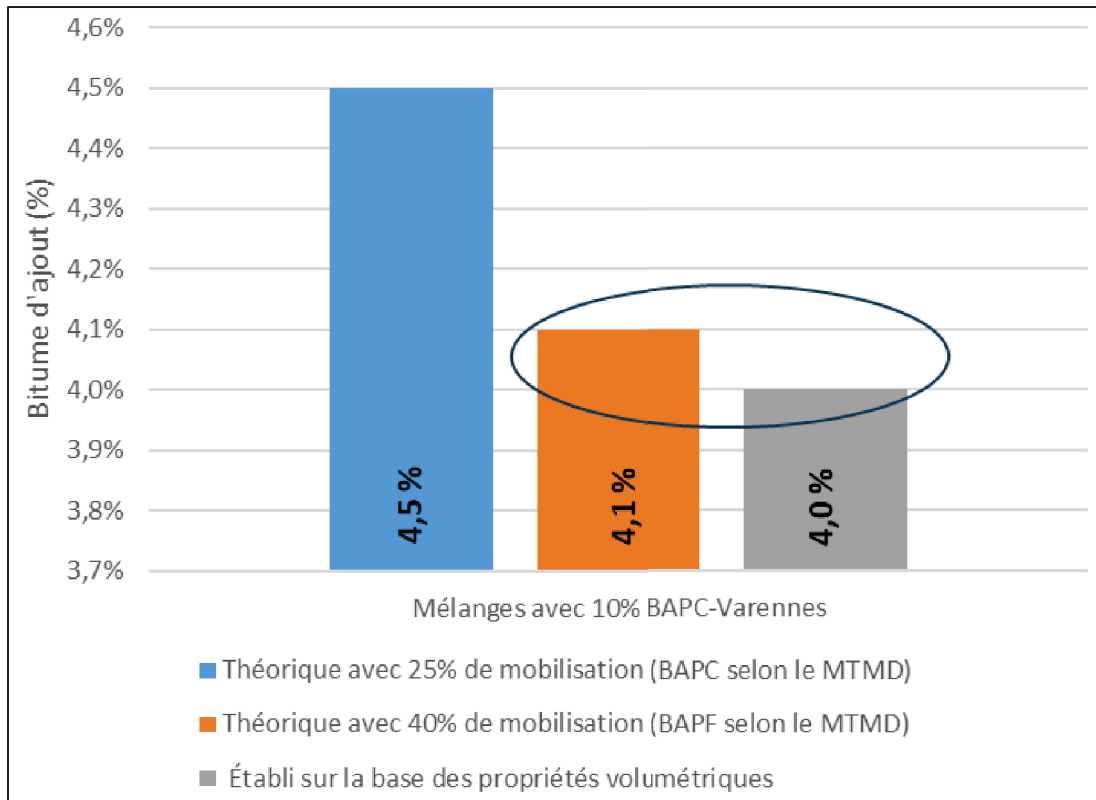


Figure 4.15 Bitume d'ajout théorique et expérimental pour les mélanges (10%BAPC-Varennnes) avec 25% et 40% de mobilisation selon le MTMD

4.5.3 Impact sur la compaction

Les éprouvettes utilisées dans cette étude ont été préparées à l'aide de la PCG. Au total, six éprouvettes ont été compactées et les résultats relatifs au pourcentage de vides, figurant dans le Tableau 4.7, représentent les moyennes obtenues. Concernant l'aptitude au compactage, la tendance observée pour le mélange B5.0S10G est similaire à celle du mélange B4.0B10B, comme le montre la Figure 4.16. Cette observation est notable, car malgré les différences en termes de matériaux (présence de GBR et plus de bitume présent dans le BAPC Varennnes) et de type de bitume utilisés, il existe de nombreuses similarités entre les formules, à l'exception du fait que cette dernière contient plus de 80 % de sa composition granulaire sous forme de matériaux recyclés. Pour atteindre le pourcentage de vides spécifié de 8,1 %, semblable à celui de B5.0S10G, le mélange B4.0B10B requiert 84 girations avec une énergie de compaction de $E=996$, selon le Tableau 4.7. L'énergie additionnelle nécessaire pour achever la compaction de

la formule B4.0B10B, afin d'atteindre un pourcentage de vides spécifique, est de 141. Une réduction du pourcentage de vides d'environ 0,4 % a également été observée pour ce nouveau mélange.

Cette légère différence pourrait également résulter de la méthode employée pour préparer le mélange, étant donné que les matériaux recyclés n'ont pas été séchés avant d'être mélangés, contrairement aux autres enrobés testés. La teneur en eau du BAPC de Varennes était de 8 % à la réception, alors que celle du BAPC de Gaspésie était presque nulle. La présence de GBR pourrait aussi jouer un rôle significatif, bien que peu d'études de caractérisation aient été réalisées et que son impact ne sera pas détaillé dans cette campagne. Néanmoins, en termes de compaction, il est possible de valider ce mélange, car il présente des caractéristiques similaires aux autres mélanges testés.

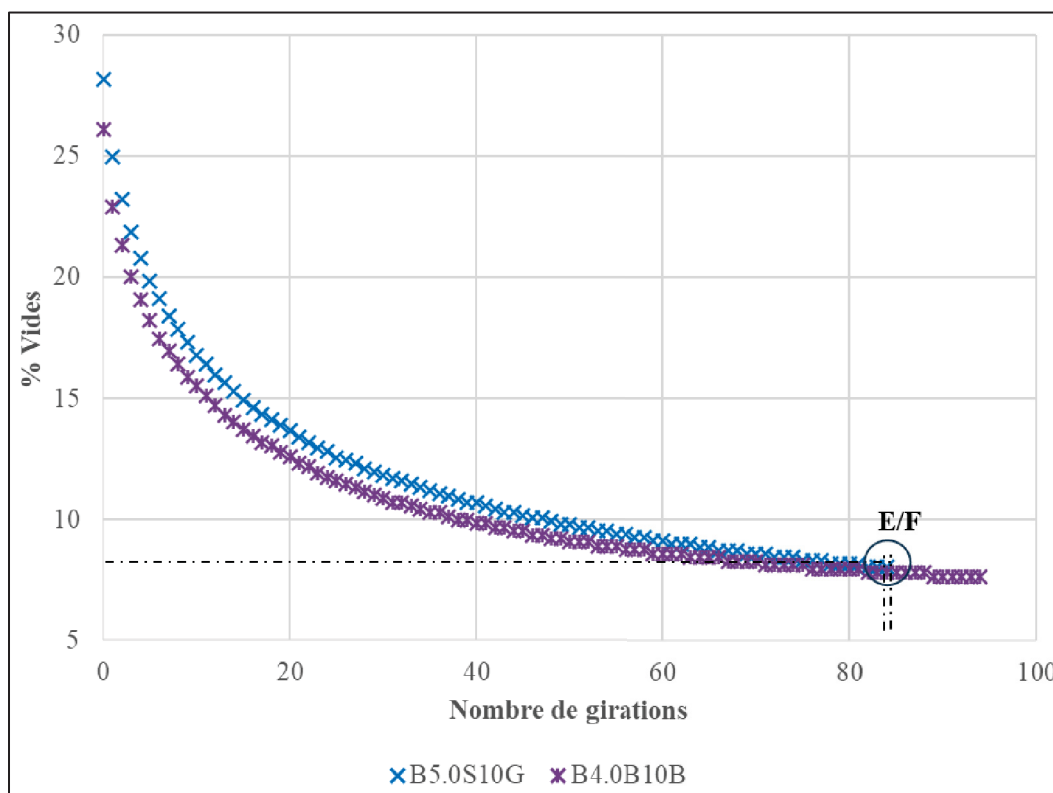


Figure 4.16 Présentation de l'évolution des % de vides à différentes girations à la PCG des mélanges B5.0S10G et B4.0B10B

Tableau 4.7 Energie de compaction des enrobés B5.0S10G et B4.0B10B
en fonction des teneurs en vides

Enrobé	Hauteur Marshall40 (mm)	Hauteur PCG spécifié (mm)	%Vides final	Énergie (%Vides final)	Énergie (%Vides=8,1)
B5.0S10G	66,6	67,9	8,1	996	E=996
B4.0B10B	56,8	58,2	7,7	1005	F=864

4.5.4 Influence sur la tenue à l'eau et l'orniérage

4.5.4.1 Tenue à l'eau

En ce qui concerne la stabilité, les deux types d'enrobés affichent une performance conforme aux exigences techniques, avec une stabilité dépassant les 12 000 Newtons. Notamment, l'enrobé étiqueté B5.0S10G montre une stabilité supérieure par rapport à l'enrobé B4.0B10B, comme illustré sur la Figure 4.17. Cette observation souligne qu'une incorporation excessive de matériaux recyclés et de nouveaux matériaux peut potentiellement diminuer les performances en termes de résistance à la contrainte mécanique exercée lors du test de stabilité Marshall.

Les résultats relatifs au fluage, présentés dans le Tableau 4.8, se situent dans les limites spécifiées par la fiche technique, soit entre 2 et 4 mm. Pour l'enrobé B4.0B10B, la valeur obtenue est de 2,8 mm. Cette mesure indique que, malgré la réduction de performance en termes de stabilité pour cet enrobé, il demeure dans les critères acceptables de déformation sous une charge soutenue, conformément aux exigences techniques.

Ces résultats mettent en lumière l'importance de trouver un équilibre optimal dans l'utilisation de matériaux recyclés au sein des formulations d'enrobés bitumineux. Bien que l'ajout de tels matériaux puisse présenter des avantages environnementaux et économiques, il est crucial de veiller à ne pas compromettre les propriétés mécaniques essentielles.

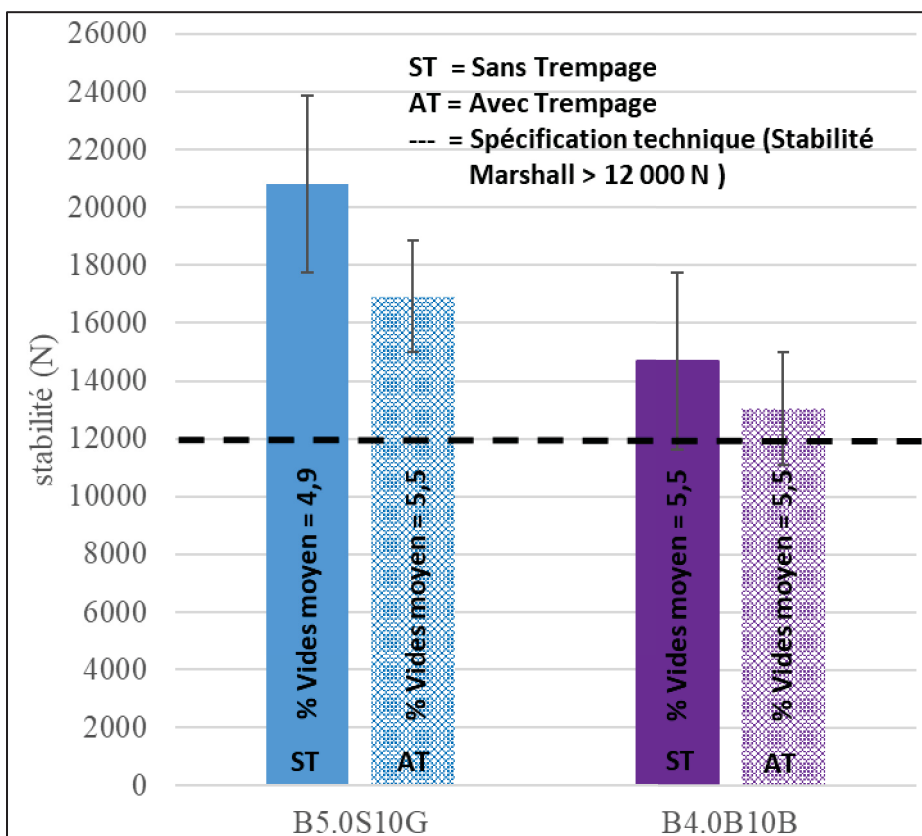


Figure 4.17 Stabilité Marshall (N) des enrobés B5.0S10G et B4.0B10B

Tableau 4.8 Vérification de conformité de l'enrobé B4.0B10B à la stabilité Marshall et fluage

Propriétés	B4.0B10B	Spécifications de la fiche technique	Conformité
Stabilité Marshall moyenne des éprouvettes sèches (N)	14 682	> 12 000	OUI
Fluage moyen des éprouvettes sèches (mm)	2,8	2 - 4	OUI

Concernant la tenue à l'eau, l'enrobé B4.0B10B montre des performances supérieures à celles de l'enrobé B5.0S10G, en respectant une spécification de maintien de l'intégrité supérieure à 85%, comme illustré dans la Figure 4.18. Il est particulièrement intéressant de noter que les performances de l'enrobé B4.0B10B sont comparables à celles de l'enrobé de référence, ce qui constitue un avantage significatif.

Les observations relatives à la résistance à l'eau pour les enrobés mentionnés dans la section 4.3 indiquent un comportement similaire, renforçant la validité de cette nouvelle formule. Il est important de souligner que les pourcentages de vides des deux enrobés sont assez similaires, ce qui suggère que cette caractéristique n'influe pas de manière significative sur leur résistance à l'eau dans ces cas précis.

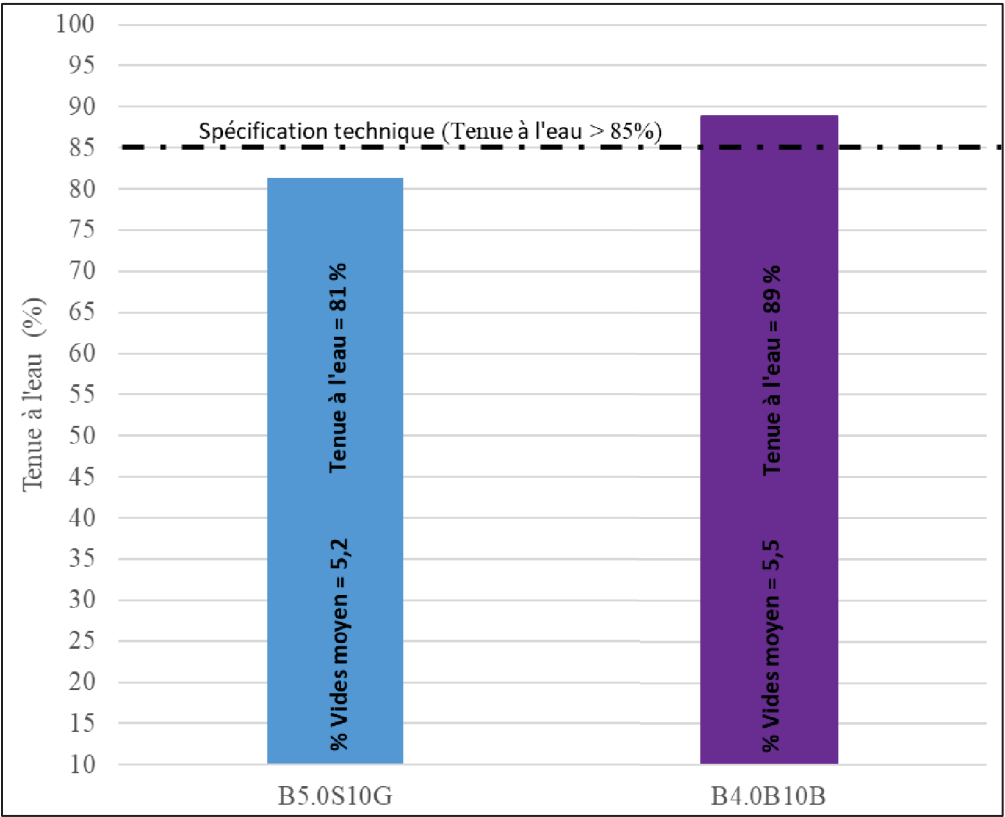


Figure 4.18 Tenue à l’eau des enrobés B5.0S10G et B4.0B10B

En outre, la proximité des performances en termes de résistance à l'eau de l'enrobé B4.0B10B avec celles de l'enrobé de référence est perçue comme un résultat positif. Cela suggère que, malgré l'utilisation de matériaux recyclés et l'adaptation des formulations, il est possible d'atteindre une qualité comparable à celle des mélanges traditionnels en termes de résilience face à l'humidité et à l'eau. Cette constatation est encourageante pour l'intégration de pratiques plus durables dans la production d'enrobés bitumineux, en soulignant la possibilité de conserver ou même d'améliorer certaines propriétés clés malgré l'incorporation de matériaux recyclés.

4.5.4.2 Orniérage

Les résultats d'orniérage présentés sur la Figure 4.19 sont positifs et respectent les restrictions de la fiche technique. On constate donc une plus grande résistance de l'enrobé B5.0S10G par rapport à l'enrobé B4.0B10B. Un écart minime peut être observé entre les deux formules. En effet, les vides sont 3% supérieurs pour l'enrobé avec BAPC Varennes, donc l'écart observé peut être entièrement et seulement dû à ça. En somme, l'enrobé B4.0B10B peut être validé et ce résultat confirme la performance et la répétabilité de notre formule malgré les différences en termes de composants granulaires, le type de bitume d'ajout et de bitume remobilisé provenant du BAPC-Varennes et du GBR.

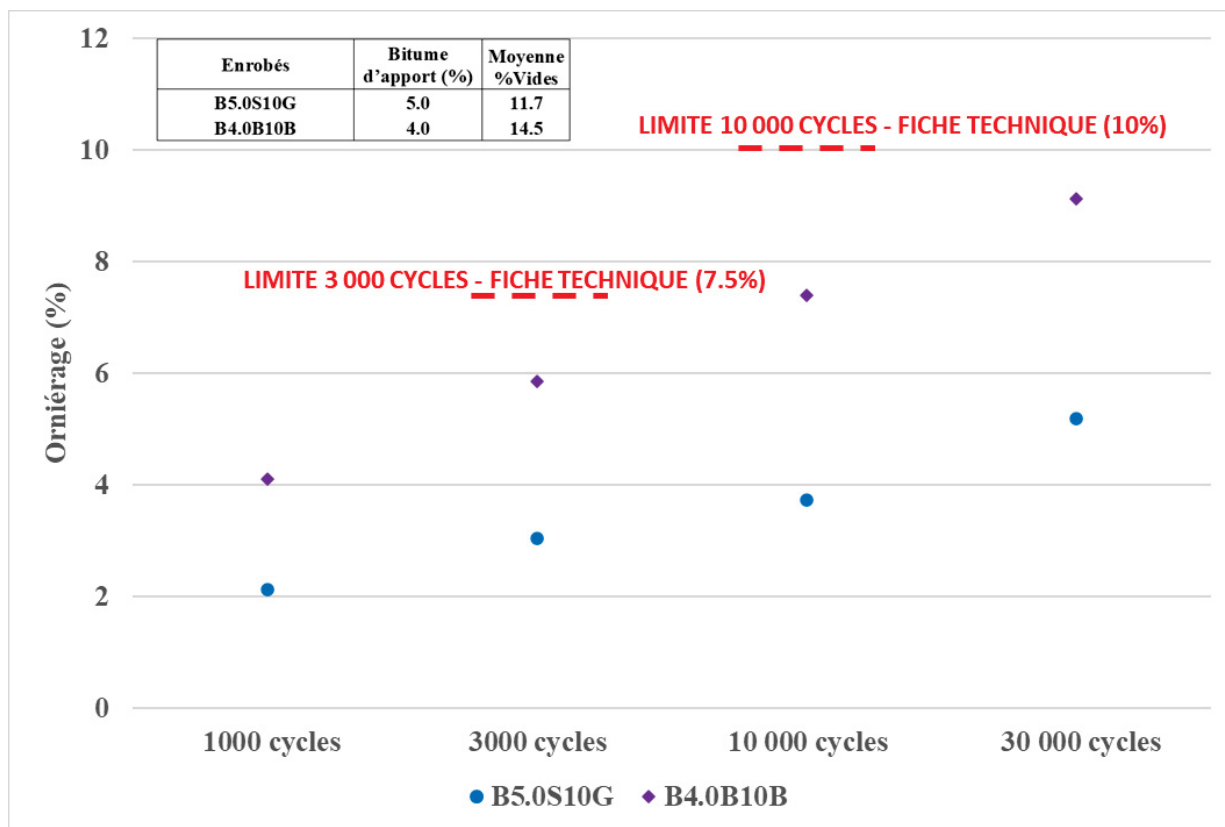


Figure 4.19 Évolution du pourcentage d'ornières pour les mélanges B5.0S10G et B4.0B10B

CONCLUSION

La présente étude a exploré l'incorporation de bardeaux d'asphalte post-consommation (BAPC) dans les enrobés bitumineux à chaud pour les chaussées non revêtues, dans le but de réduire l'utilisation de matériaux vierges et de valoriser les déchets de construction, tout en respectant les spécifications de la fiche technique Micro Hi-Tech par Bauval. En partenariat étroit avec des acteurs clés de l'industrie et de la recherche au Québec, le projet a évalué l'impact de l'ajout de BAPC sur les propriétés volumétriques, la compactibilité, la résistance à l'eau et la résistance à l'orniérage des enrobés. Dans l'optique de répondre aux différents objectifs, le projet s'est déroulé en cinq phases en laboratoire, suivies d'une étape à l'échelle industrielle et de mise en œuvre sur une route non revêtue.

La formulation de l'enrobé de référence sans BAPC lors de la phase I de ce projet a servi de base pour comparer les variations induites par l'ajout de BAPC. En effet, l'enrobé de référence sans BAPC présente des résultats satisfaisants en termes de propriétés volumétriques et de performances à la tenue à l'eau. Dans la phase II, les études montrent que les enrobés contenant 10% et 25% de BAPC présentent des propriétés volumétriques et des performances de compactibilité comparables à celles de l'enrobé de référence, tout en respectant les spécifications techniques. De plus, l'ajout de BAPC contribue à réduire l'effort nécessaire à la compaction, réduisant ainsi l'énergie nécessaire à la compaction. Dans la phase III, il est révélé qu'il est possible d'intégrer jusqu'à 25% de BAPC dans les enrobés bitumineux sans compromettre significativement leurs performances (tenue à l'eau et l'orniérage). Cependant, les mélanges avec le BAPC de Gaspésie montrent des performances légèrement inférieures en tenue à l'eau, avec 4% et 3% de moins pour l'enrobé B5.0S10G et B4.0S25G respectivement. Un test d'orniérage modifié pour la formule B4.0S25G a été effectué car on craignait un possible décollement entre la base granulaire et l'enrobé ; néanmoins, les résultats obtenus confirment une bonne adhésion entre les deux couches. Quant à la phase IV, elle nous a permis d'étudier l'impact des propriétés du BAPC sur les caractéristiques volumétriques entre l'enrobé de référence, 10% BAPC de Varennes et Gaspésie de compositions granulaires identiques. Les données obtenues suggèrent d'optimiser les propriétés volumétriques de

l'enrobé incorporant 10% de BAPC de Varennes afin de déterminer un pourcentage de bitume d'ajout approprié, car ce dernier présente des différences considérables au niveau des vides (3,5% de différence) en comparaison avec celui incorporant 10% de BAPC de Gaspésie ; de plus, une inconformité sur la compactibilité avec une valeur de 95,4% dépasse la limite de 92% fixée par la fiche technique. Enfin, cette phase a révélé que l'origine et les propriétés du BAPC peuvent grandement influencer les caractéristiques volumétriques de l'enrobé.

Dans l'optique de réaliser une campagne à l'échelle réelle, une cinquième phase s'avérait nécessaire afin de mettre en pratique les données récoltées lors des différentes phases précédentes. Un enrobé incorporant 10% de BAPC Varennes a été formulé tout en remplaçant intégralement les granulats et en incorporant de manière extensive des matériaux recyclés, dont l'utilisation du BAPC Varennes, le GBR et des scories. L'utilisation des données obtenues à la phase IV a été très utile pour cette étape, ainsi un taux de bitume optimal de 4% a été choisi. Il a été possible de valider ce mélange car il présente des caractéristiques similaires aux autres mélanges testés tout en respectant toutes les limites de la fiche technique. Cette expérimentation avec différents composants recyclés a montré qu'une formulation soigneusement ajustée peut atteindre des performances équivalentes à celles d'enrobés conventionnels, ce qui ouvre la voie à une plus grande utilisation de matériaux recyclés dans la construction routière.

Au cours des phases II et V, une analyse quantitative a été effectuée pour définir le pourcentage théorique de bitume additionnel nécessaire, en considérant les directives du MTMD concernant le taux de bitume mobilisable. Celui-ci est de 40 % pour le BAPF et 25 % pour le BAPC. Les résultats obtenus seront comparés à ceux obtenus expérimentalement en laboratoire après l'optimisation du pourcentage de bitume ajouté, en se basant sur les propriétés volumétriques. Les résultats suggèrent que le taux de mobilisation du BAPC, tel que défini par le MTMD, pourrait être sous-évalué, car on s'est rendu compte que bien plus de bitume aurait été mobilisé. De plus, les résultats soulignent la nécessité d'une évaluation précise du taux de bitume en prenant en compte les caractéristiques spécifiques du BAPC pour assurer la qualité et la performance des enrobés.

En conclusion, cette recherche contribue à l'avancement des connaissances sur l'utilisation durable des ressources et le recyclage dans l'industrie de la construction. Elle démontre que l'incorporation de BAPC dans les enrobés bitumineux est une stratégie viable d'un point de vue technique, bien que certains problèmes puissent survenir (craintes à basses températures). Pour maximiser les bénéfices environnementaux et économiques, il est essentiel de poursuivre l'optimisation des formulations d'enrobés, faire des tests à basses températures et de réaliser des analyses de cycles de vie.

RECOMMANDATIONS

Sur la base des résultats obtenus dans l'étude sur l'incorporation de bardeaux d'asphalte post-consommation (BAPC) et d'autres matériaux recyclés dans les enrobés bitumineux, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour orienter les recherches futures et l'application pratique de ces matériaux dans le secteur routier :

Optimisation de la formulation des enrobés : Poursuivre l'optimisation des formulations d'enrobés incorporant du BAPC pour ce projet, afin d'améliorer la performance et la durabilité tout en maximisant l'utilisation de matériaux recyclés. Cela pourrait inclure l'exploration de différentes proportions de BAPC, de GBR, de scories, et l'ajustement des types et des taux de bitume d'apport.

Caractérisation approfondie des matériaux recyclés : Renforcer la caractérisation des matériaux recyclés, en particulier le BAPC, pour mieux comprendre leurs propriétés et leur impact sur les performances des enrobés. Cela comprend l'évaluation de la qualité du bitume remobilisable et la présence de contaminants qui peuvent affecter les propriétés de l'enrobé.

Évaluation de la durabilité à long terme : Mener des études de durabilité à long terme sur les chaussées construites avec des enrobés contenant du BAPC pour évaluer leur performance au fil du temps sous diverses conditions climatiques et de chargement du trafic.

Études d'impact environnemental : Réaliser des analyses du cycle de vie pour ce projet afin d'évaluer l'impact environnemental de l'utilisation de BAPC dans les enrobés bitumineux, comparativement aux enrobés traditionnels.

Études du comportement à basse température : Des travaux ont été démarrés dans ce contexte pour la suite du projet afin d'obtenir des données sur le comportement à basse températures des enrobés incorporant du BAPC.

Ces recommandations visent à encourager une approche intégrée et durable dans la conception, la formulation, et l'application des enrobés bitumineux incorporant du BAPC, en mettant l'accent sur l'optimisation des ressources et la réduction de l'impact environnemental.

ANNEXE I

FICHE TECHNIQUE DE RÉFÉRENCE


BAUVAL		MICRO HI-TECH	
FICHE TECHNIQUE DU PRODUIT Édition novembre 2016			
DESCRIPTION Micro Hi-Tech est un enrobé ultra mince adapté aux besoins des chaussées urbaines en zone résidentielle, de certaines aires industrielles et des voies cyclables. Sa micro rugosité augmente l'adhérence et procure une surface de roulement confortable. Son utilisation peut aussi convenir aux aires industrielles où la circulation des chariots élévateurs crée une tension supplémentaire sur le revêtement bitumineux.		DONNÉES TECHNIQUES Emballage ———— Vrac Disponibilité ———— 1er mai au 15 novembre Température extérieure: > 10° C	
DOMAINES D'APPLICATION <ul style="list-style-type: none">▪ Resurfacement en couche ultra mince (15-40 mm)▪ Stationnement intérieur▪ Enrobé sur dalle de béton (protection contre l'eau et les sels de déglaceage)		<ul style="list-style-type: none">▪ Correction des pentes▪ Réfection de piste cyclable & chemin piétonnier	
AVANTAGES <ul style="list-style-type: none">▪ Sécurité de roulement (micro rugosité)▪ Améliore le contact pneumatique / chaussée▪ Excellente résistance à l'usure		<ul style="list-style-type: none">▪ Excellente performance en fatigue▪ Résiste aux déformations permanentes	
CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES			
SPÉCIFICATIONS GRANULOMÉTRIQUES		PROPRIÉTÉS DU MÉLANGE	
Tamis (mm)	% Passant	Type de bitume ————	PG 58-34
10	100	Teneur en bitume (%) ————	5.2 - 5.8
5	92 - 100	Vide (%) Marshall ————	4 - 10
1.25	30 - 50	Compacité (% Dmm) ————	85 - 92 %
0.630	12 - 35	Fuseau granulaire ————	0 - 6 mm
0.080	3 - 8	Classe de granulat ————	A-1
PERFORMANCES MÉCANIQUES			
ESSAI D'ORNIÈREUR		Tenue à l'eau (%) ———— > 85 %	
Cycles (N)	% d'ornièrre	Stabilité Marshall (N) ————	> 12 000
3 000	< 7.5 %	Fuage (mm) ————	2 - 4
10 000	< 10 %		
PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS/RESTRICTIONS <ul style="list-style-type: none">▪ Matériaux chauds, portez les équipements de protection individuelle adéquats.▪ Les informations techniques vous sont fournies à titre informatif. Référez-vous à la formule de mélange.			
		Pavages Varennes T 450 652-9818 3350, Butte-aux-Renards, Varennes (Québec) J3X 1P7 Bauval CMM T 514 342-4567 8080, Boul. Cavendish, Ville St-Laurent (Québec) H4T 1T1 legroupe@bauval.com www.bauval.com	

Figure-A I-1 Fiche technique du produit de référence MICRO HI-TECH

ANNEXE II

DESCRIPTION ET SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES MATÉRIAUX FOURNIS PAR BAUVAL

BAUVAL

PAVAGES VARENNES

COMPLIATION D'ESSAIS

BARDEAU D'ASPHALTE

Type de matériaux	Bardeau d'asphalte				Calibre:		0-4 mm		Date:	Moyenne Réserve 2014	
Provenance :	Pavages Varennes Varennes				Classe granulatoire:		0-4 mm		Usages prévus:	Enrobés bitumineux	
					Classement :						

Granulométrie			% passant en mm					% passant en um				% bitume	Teneur en eau	Commentaires
Provenance	No d'éch.	Date éch.	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80			
Charrette	Ba 14-001	2013-12-16	100	100	100	99	82	52	41	31	22.0	19.9	2.0	1 SDF pur
Dôme	Ba 14-002	2014-02-03	100	100	100	99	82	56	44	34	23.1	20.8	21.1	2 Holcim pur
Abri 4	Ba 14-003	2014-02-13	100	100	98	78	57	36	29	22	17.2	13.7	14.1	3 Holcim mélangé
Warwick	Ba 14-004	2014-03-20	100	100	96	88	70	47	37	28	19.9	28.2	19.5	4 Pur
Moyenne			100	100	99	91	73	48	38	29	20.6	20.6	14.2	

Figure-A II-1 Données granulométriques et description du BAPC-Varennnes

17, rue de l'Industrie, Saint-Rémi, J0L 2L0

Type de mélange:	Asphalte recyclé
Type de bitume:	
Formule:	067/186-23GBR (0-10) (2022-11-01)
Code produit :	
Facteur de correction:	(ex.) 0,00 (ign.) 0,00

[illegible]

Moyenne du lot	
Extract. non-lavée LC 26-350	
Écart mesuré	


Méthodes utilisées : LC 26-007. 045. 100. 110 | LC 26-007. 100. 110 Légende (lettre dans le numéro de lab.) : A - St-Rémi

Préparé par : Jean-François Daze

Vérifié par : Jean-François Daze
Jean-François Daze

Date : 2023-05-15

Figure-A II-2 Données granulométriques et description du GBR de Varennes



Demix
Agrégats

UNE SOCIÉTÉ CRH

Carrière Varennes
3350 Chemin Buttes-aux-Renards
Varennes, Québec J3X 1P7
450-652-9861

Certification du Produit

Période	2023	Produit	9117	Type	Granulat fin
Usine	3104			Spécification	INTERNE
	Carrière Varennes		0-5 MM CRIBLURE, NC		

Essais	Granulométrie - LC 21-040										FM
30											
Moyenne											100
Ecart Type											0
Limite Sup											1
Limite Inf											8

Propriétés physiques					
Nom	Procédure	Résultat	Spécification	Laboratoire	Date
Densité Apparente (Fin)	LC 21-065	2,623		Englobe Corp	2023/02/21
Densité Brute (SSS, Fin)	LC 21-065	2,517		Englobe Corp	2023/02/21
Densité Brute (Sec, Fin)	LC 21-065	2,452		Englobe Corp	2023/02/21
Absorption %	LC 21-065	2,7		Englobe Corp	2023/02/21
Particules Fracturées (Totale) %	LC 21-100	100		Demix Agrégats	2023/02/15
Micro-Deval (B) %	LC 21-101	16,0		Demix Agrégats	2023/02/15
Friabilité %	LC 21-080	25,2		Demix Agrégats	2023/02/15


2023/03/02

StonemontQC

Name Nicolas Monette

Title Superviseur qualité

Figure-A II-3 Données granulométriques et description des Criblures



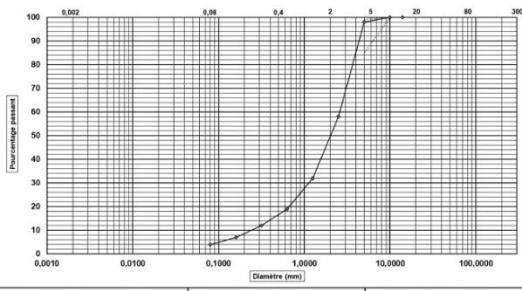
17, rue de l'Industrie
Saint-Rémi, Québec, J0L 2L0
450 454-5644

**Essais sur matériaux
granulaires**

Projet : Réalisation d'essais en laboratoire - Année 2023		Client : Les Pavages Varennes	
Projet # : LA23019200		Client # : VARENN100	
V/D : -		Date : 2023-04-24	

Échantillonnage			
Type de matériau :	Pierre de scorie	N° de lab. :	284 609
Prélevé par :	le client	Prélevé le :	2023-04-24
Fournisseur/Carrière :	Harsco Minéraux	Calibre :	0-5 mm
Localisation du prélèvement :	Pile de réserve à l'usine	Épaisseur de la couche :	
Usage :		Référence client :	

Courbe granulométrique



Granulométrie LC 21-040 / CSA A23.2-2A

Tamis	% passant	Exigences	Statut
112 mm	100		
56 mm	100		
40 mm	100		
31.5 mm	100		
28 mm	100		
20 mm	100		
14 mm	100		
10 mm	100	100	C
5 mm	98	85 - 99	C
2.5 mm	58		
1.25 mm	32		
0.630 mm	19		
0.315 mm	12		
0.160 mm	7		
0.080 mm	3,9		

D10 (mm)	0,240	D30 (mm)	1,125	D60 (mm)	2,588	Cu	10,77	Cc	2,04
-----------------	-------	-----------------	-------	-----------------	-------	-----------	-------	-----------	------

Autres essais		Unité	Résultat	Exigences	Statut
Caractéristiques intrinsèques (fins)					
Micro-Deval (fins) / LC 21-101		%	9		
Coefficient de friabilité (fins) / LC 21-080		%	18		
Coefficient d'écoulement des granulats fins / LC 21-075			96		
Granulométrie - Par sédimentométrie / BNQ 2501-025			1		

Remarques

Préparé par : Patrice Hinse, Tech. sr.

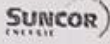
Vérifié par : Jean-François Daze

Date : 2023-05-12

Figure-A II-4 Données granulométriques et description des Scorie

ANNEXE III

DESCRIPTIONS TECHNIQUES DES DIFFÉRENTS TYPES DE BITUMES UTILISÉS



SUNCOR
ÉNERGIE

Raffinerie de Montréal
11701, rue Sherbrooke Est
Montréal, Qc H1B 1C3

UK88-23-050

Liant bitumineux

Classe de performance : PG 58S-28

Fabricant : Produits Suncor Énergie SENC

Lieu d'entreposage : Raffinerie de Montréal

Réservoir : R_1301

Date de fabrication : 2023-07-14

Date de certification : 2023-07-15

Numéro de lot : 23118-1

Numéro de référence du lot : 23071549

Numéro de référence du contrôle : 23072243

Températures recommandées min max

Températures d'entreposage (°C) : 140 175

Températures de malaxage (°C) : 138.0 152.0

Certificat d'analyse

Analyses	Méthodes	Unités	Exigences			Résultats
			min		max	
Masse volumique à 25°C	ASTM D70	g/cm ³		Indiquer		1.0260
Viscosité rotationnelle à 135°C	AASHTO T316	Pa*s			3	0.268
Viscosité rotationnelle à 165°C	AASHTO T316	Pa*s		Indiquer		0.081
Stabilité au stockage	LC 25-003	°C			2	0.3
Point de ramollissement moyen	LC 25-003	°C		Indiquer		42.0
Point éclair	ASTM D92	°C	230			304
Teneur en cendres	ASTM D8078	%			0.50	0.09
Variation de masse RTFOT	AASHTO T240	%			1.00	-0.498
G*/sinδ bitume d'origine à 58°C	AASHTO T315	kPa	1.00			1.14
Te		°C	58			59.0
Tb		°C			-28	-29.3
Module de rigidité (So)		MPa			137	118
Pente (mo)			0.400			0.491
G*/sinδ bitume vieilli au RTFO à 58°C	AASHTO T315	kPa	2.20			2.78
Recouvrance d'élasticité - 3.2 kPa à 58°C	AASHTO T350	%		Indiquer		0
Non recouvrable - 3.2 kPa à 58°C (Note1)	AASHTO T350	kPa ⁻¹			4.50	3.65
Différentiel non recouvrable à 58°C	AASHTO T350	%			75	7.7
Module de rigidité (S), bitume vieilli	AASHTO T313	MPa			300	255
Pente (m), bitume vieilli	AASHTO T313		0.300			0.339

Essais de contrôle

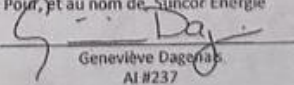
Date du contrôle :	2023-07-20					
G*/sinδ bitume d'origine à 58°C	AASHTO T315	kPa	1.00			1.15
Module de rigidité (Sc)		MPa			137	115
Pente (mc)			0.400			0.495
Recouvrance d'élasticité - 3.2 kPa à 58°C	AASHTO T350	%		Indiquer		0
Non recouvrable - 3.2 kPa à 58°C (Note2)	AASHTO T350	kPa ⁻¹			4.50	3.11
Différentiel non recouvrable à 58°C	AASHTO T350	%			75	8.6

Certificat conforme à la norme québécoise 4101.

Note 1: Niveau de sollicitation du lot: S

Note 2: Niveau de sollicitation du contrôle: S

Pour et au nom de Suncor Énergie




Geneviève Dagenais
AI #237

PCM-AQ-DL 914 Rév. 2.0
Date de parution : 2018-01-31
Date de révision : 2021-11-07

Émis le : 2023-07-20

Figure-A III-1 Spécifications techniques du bitume PG 58S-28

 BITUME PG - ATTESTATION DE CONFORMITÉ (AASHTO M 332)												
INFORMATIONS GÉNÉRALES		RECOMMANDATIONS - TEMPÉRATURE D'UTILISATION										
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Bitumar Inc. 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4 Fabricant et lieu de fabrication Bitumar Inc. 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4 Classe de bitume PG 64E-28 Nom commercial PG 64E-28 N° de lot 2064E28-58 Date de fabrication 17/11/2020		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Minimale</th> <th>Maximale</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Entreposage</td> <td>139</td> <td>175</td> </tr> <tr> <td>Malaxage</td> <td>156</td> <td>170</td> </tr> </tbody> </table>		Minimale	Maximale	Entreposage	139	175	Malaxage	156	170	
	Minimale	Maximale										
Entreposage	139	175										
Malaxage	156	170										
ESSAIS DE CARACTÉRISATION		ESSAIS DE CONTRÔLE										
Date des essais de caractérisation	16/11/2020	Date des essais de contrôle	18/11/2020									
Point d'éclair, °C, ASTM D92	304	G*/Sinδ, (origine) à 64 °C (kPa)	2.91									
Masse volumique (g/cm³), à 25°C, AASHTO T228	1.019	Rigidité à -18°C, Sc (60) (MPa)	80.3									
Masse volumique (g/cm³), à 15°C, AASHTO T228	1.025	Pente de mc (60)	0.489									
Viscosité Brookfield (Pa·s), à 135°C, AASHTO T 316	1.232	JNR3.2 à 64 °C, (kPa-1)	0.24									
Viscosité Brookfield (Pa·s), à 165°C, AASHTO T 316	0.332	JNRDIFF (%)	49									
Stabilité au stockage (°C), LC 25-003	0.3	R3.2 (%)	71.1									
TBA moyenne (°C)	59.8	NOTES										
Teneur en cendres (%)	0.16	Ce produit doit être entreposé dans un réservoir vide ou contenant le même grade fourni par Bitumar Inc. Si ce n'est pas le cas, il est de votre responsabilité de prendre les mesures nécessaires pour confirmer la caractérisation du produit. Peu importe les recommandations du fournisseur, l'entrepreneur doit respecter les documents contractuels.										
G*/Sinδ, bitume d'origine à 64°C (kPa)	2.91											
Température élevée de caractérisation Te(°C)	75.3											
Module de rigidité à -18°C, So (60) (MPa)	80.3											
Pente à -18°C, mo (60)	0.489											
Enrobé résiduel (%) (LC25-009)	N.A.											
Bitume vieilli au RTFO												
Variation de masse au RTFOT (%)	-0.671											
JNR3.2 à 64°C, (kPa-1)	0.24											
JNRDIFF (%)	49											
R3.2 (%)	71.1											
Bitume vieilli au RTFO et PAV												
Module de rigidité à -18°C, s (60), MPa	183.5											
Pente à -18°C, m(60)	0.312											
Température basse de caractérisation Tb(°C)	-29.8											
ΔTc après RTFOT et PAV 40 h (°C)	N.A.											
REMARQUES												
Signé par: Paula Marc		Date 18/11/2020										

F-P5-07.2 R2

Figure-A III-2 Spécifications techniques du bitume PG 64E-28

ANNEXE IV

COURBES GRANULOMÉTRIQUES DES DIFFÉRENTS COMPOSANTS GRANULAIRES ET BAPC

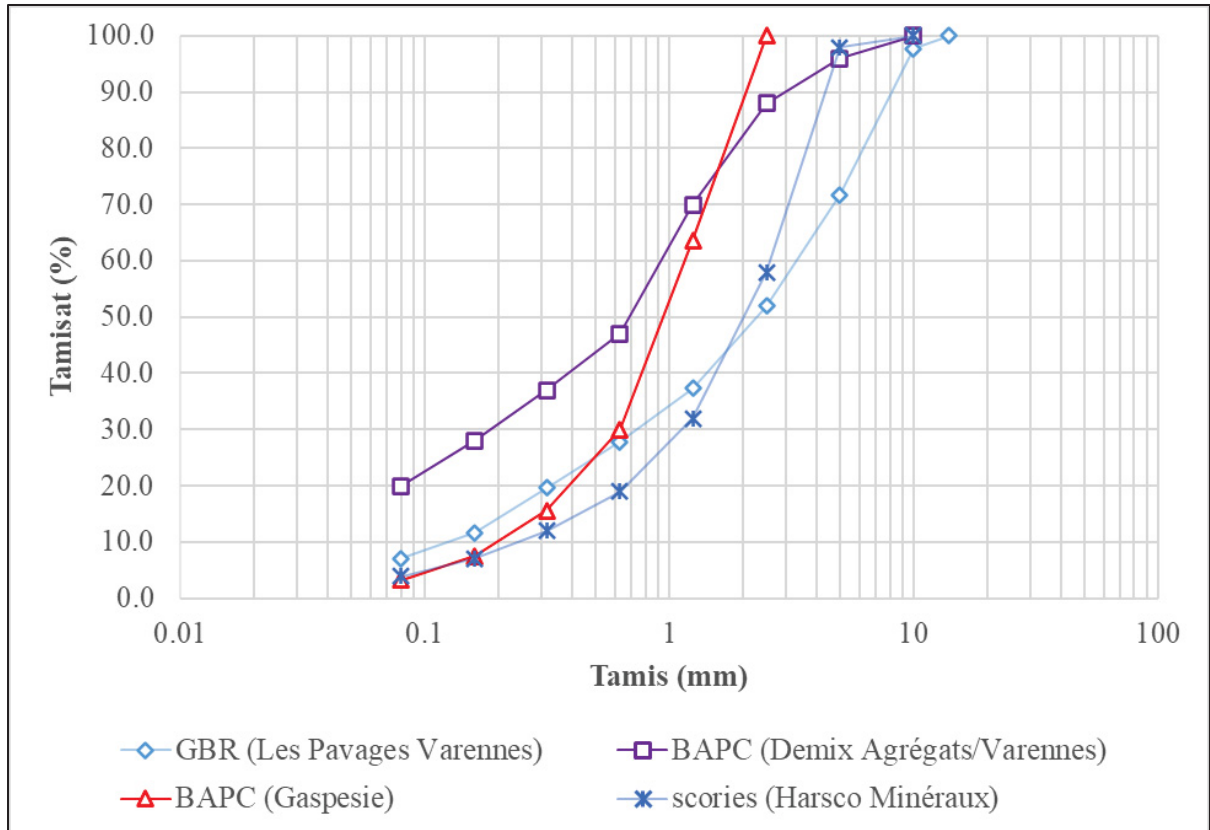


Figure-A IV-1 Courbes granulométriques des composants recyclés

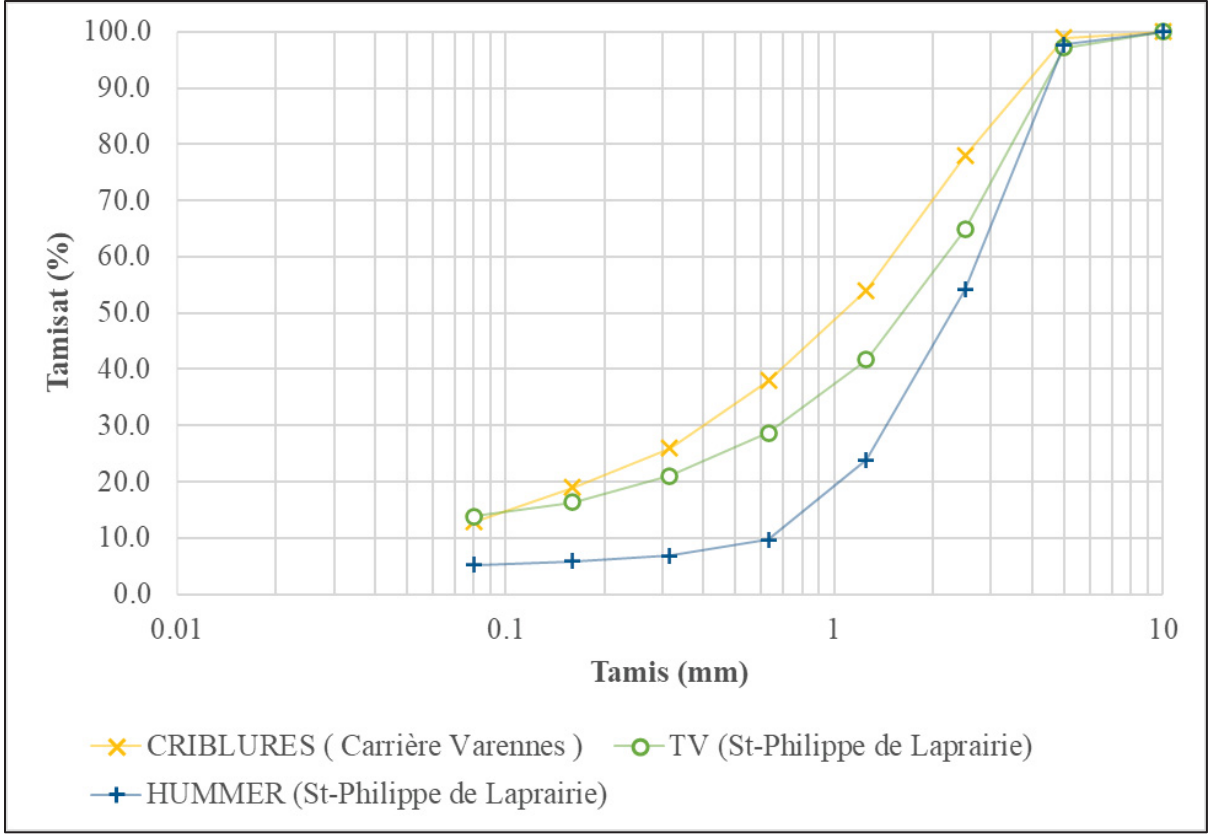


Figure-A IV-2 Courbes granulométriques des composants granulaires neufs

ANNEXE V

ÉTAPES DE CALCULS POUR ESTIMATION DU BITUME D'AJOUT THÉORIQUE

Tableau-A V-1 Bitume d'ajout théorique pour les enrobés sélectionnés avec 40% de taux de mobilisation

BAPC					
Enrobés	R5.8S0G	B4.0S25G	B5.0S10G	B5.0S10B	B4.0B10B
Type de BAPC	Gaspésie	Gaspésie	Gaspésie	Varennnes	Varennnes
Pourcentage massique (partie granulaire)	0	25%	10%	10%	10%
Pourcentage massique ajouté (mélange glabal)	0	24%	9,5%	9,5%	9,6%
Teneur en bitume du BAPC(%)	-	16%	16%	28%	28%
Taux de mobilisation (%)	-	40%	40%	40%	40%
Teneur réduite (%)	-	1,5%	0,6%	1,1%	1,1%
Bitume d'ajout (%)	5,8%	4,3%	5,2%	4,7%	4,7%
Teneur réduite + Bitume d'ajout	5,8%	5,8%	5,8%	5,8%	5,8%
GBR					
Pourcentage massique ajouté (mélange glabal)	-	-	-	-	9,6%
Teneur en bitume du GBR(%)	-	-	-	-	7,0%
Taux de mobilisation (%)	-	-	-	-	100%
Teneur réduite pour GBR (%)	-	-	-	-	0,7%
Teneur réduite Totale (%)	-	-	-	-	1,7%
Nouveau Bitume d'ajout (%)	-	-	-	-	4,1%
Teneur réduite totale + Nouveau bitume d'ajout	5,8%	5,8%	5,8%	5,8%	5,8%

Tableau-A V-2 Bitume d'ajout théorique pour les enrobés sélectionnés avec 25% de taux de mobilisation

BAPC					
Enrobés	R5.8S0G	B4.0S25G	B5.0S10G	B5.0S10B	B4.0B10B
Type de BAPC	Gaspésie	Gaspésie	Gaspésie	Varennnes	Varennnes
Pourcentage massique (partie granulaire)	0	25%	10%	10%	10%
Pourcentage massique ajouté (mélange glabal)	0	24%	9,5%	9,5%	9,6%
Teneur en bitume du BAPC(%)	-	16%	16%	28%	28%
Taux de mobilisation (%)	-	25%	25%	25%	25%
Teneur reduite (%)	-	1,0%	0,4%	0,7%	0,7%
Bitume d'ajout (%)	5,8%	4,8%	5,4%	5,1%	5,1%
Teneur reduite + Bitume d'ajout	5,8%	5,8%	5,8%	5,8%	5,8%
GBR					
Pourcentage massique ajouté (mélange glabal)	-	-	-	-	9,6%
Teneur en bitume du GBR(%)	-	-	-	-	7%
Taux de mobilisation (%)	-	-	-	-	100%
Teneur reduite pour GBR (%)	-	-	-	-	0,7%
Teneur reduite Totale (%)	-	-	-	-	1,3%
Nouveau Bitume d'ajout (%)	-	-	-	-	4,5%
Teneur reduite totale + Nouveau bitume d'ajout	5,8%	5,8%	5,8%	5,8%	5,8%

Tableau-A V-3 Critères d'utilisation des bardeaux d'asphalte
tiré de la norme 4202 Tome VII – Matériaux

Critère	Enrobés de surface	Enrobés de base
% autorisé dans l'enrobé	$\leq 3,0 \%$	$\leq 5,0 \%$
Dimension du bardeau (D de la classe granulaire)	$\leq 10 \text{ mm}$	$\leq 10 \text{ mm}$
Conditions de circulation	DJMA $\leq 10\,000$ Non autorisés sur les autoroutes Le BPC n'est pas autorisé en couche de surface pour les reconstructions ni les constructions neuves.	Aucune restriction
Note : – aux fins de la formulation, le bitume contenu dans le bardeau postfabrication est mobilisable à 40 %, tandis que celui contenu dans le bardeau postconsommation est mobilisable à 25 %.		

ANNEXE VI

DESCRIPTION DES ENROBÉS CONFECTIONNÉS

Tableau-A VI-1 Descriptions volumétriques et compacité des enrobés confectionnés

Echantillon	% Bitume d'ajout	Type de bitume	Dmm	Db	Compacite (%)
R5.8S0G	5.8	PG 64E - 28	2.502	2.308	92.2
B5.8S25G	5.8		2.377	2.351	98.9
B4.0S25G	4.0		2.451	2.307	93.9
B3.5S25G	3.5		2.463	2.286	93.5
B5.8S10G	5.8		2.446	2.291	93.7
B5.0S10G	5.0		2.476	2.259	91.2
B4.5S10G	4.5		2.503	2.254	90.1
B4.0S10G	4.0		2.524	2.184	86.5
B5.0S10B	5.0		2.441	2.328	95.4
B5.0B10B	5.0	PG 58S - 28	2.779	2.699	97.1
B4.5B10B	4.5		2.841	2.681	94.4
B3.5B10B	3.5		2.923	2.676	91.5
B4.0B10B	4.0		2.870	2.870	93.0

Tableau-A VI-2 Description des essais réalisés pour différents enrobés

Enrobés	Essais	Dmm	Aptitude au compactage	Marshall 40 coups	Marshall 60 coups	Tenue à l'eau	Orniérage	Orniérage modifié
R5.8S0G	Nombre d'essais	2	6	2	2	1	-	-
	Masse (g)	2400	6900	2430	2430	6900	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	PCG (φ100x130mm) Hspec = 69.3mm	Marshall (φ101x146mm)	Marshall (φ101x146mm)	PCG (φ100x130mm)	-	-
B5.8S25G	Nombre d'essais	2	6	2	2	-	-	-
	Masse (g)	2400	6900	2430	2430	-	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	PCG (φ100x130mm) Hspec =	Marshall (φ101x146mm)	Marshall (φ101x146mm)	-	-	-
B4.0S25G	Nombre d'essais	2	6	2	2	1	2	1
	Masse (g)	2400	6900	2430	2430	6900	20956	6287
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	PCG (φ100x130mm) Hspec = 70.4mm	Marshall (φ101x146mm)	Marshall (φ101x146mm)	PCG (φ100x130mm)	2 Plaques (500x180x50mm)	Pierre compactée (500x180x70mm) B4.0S25G (500x180x30mm)
B3.5S25G	Nombre d'essais	2	-	-	2	-	-	-
	Masse (g)	2400	-	-	2430	-	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	-	-	Marshall (φ101x146mm)	-	-	-
B4.0S10G	Nombre d'essais	2	-	-	2	-	-	-
	Masse (g)	2400	-	-	2430	-	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	-	-	Marshall (φ101x146mm)	-	-	-
B4.5S10G	Nombre d'essais	2	-	-	2	-	-	-
	Masse (g)	2400	-	-	2430	-	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	-	-	Marshall (φ101x146mm)	-	-	-
B5.0S10G	Nombre d'essais	2	6	2	2	1	1	-
	Masse (g)	2400	6900	2430	2430	6900	10585	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	PCG (φ100x130mm) Hspec = 67.9mm	Marshall (φ101x146mm)	Marshall (φ101x146mm)	PCG (φ100x130mm)	1 Plaque (500x180x50mm)	-
B5.8S10G	Nombre d'essais	2	-	-	2	-	-	-
	Masse (g)	2400	-	-	2430	-	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	-	-	Marshall (φ101x146mm)	-	-	-
B5.0S10B	Nombre d'essais	2	-	-	2	-	-	-
	Masse (g)	2400	-	-	2430	-	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	-	-	Marshall (φ101x146mm)	-	-	-
B5.0B10B	Nombre d'essais	2	-	-	2	-	-	-
	Masse (g)	2400	-	-	2430	-	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	-	-	Marshall (φ101x146mm)	-	-	-
B4.5B10B	Nombre d'essais	2	-	-	2	-	-	-
	Masse (g)	2400	-	-	2430	-	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	-	-	Marshall (φ101x146mm)	-	-	-
B4.0B10B	Nombre d'essais	-	6	2	2	1	2	-
	Masse (g)	-	6900	2430	2430	6900	21168	-
	Corps d'épreuve	-	PCG (φ100x130mm) Hspec = 58.17mm	Marshall (φ101x146mm)	Marshall (φ101x146mm)	PCG (φ100x130mm)	2 Plaque (500x180x50mm)	-
B3.5B10B	Nombre d'essais	2	-	-	2	-	-	-
	Masse (g)	2400	-	-	2430	-	-	-
	Corps d'épreuve	Échantillon désagglomérer	-	-	Marshall (φ101x146mm)	-	-	-
Exigences techniques		-	-	-	Vide (%) Marshall = 4-10 Compacité (%) = 86 - 92	Tenue à l'eau (%) > 85 Stabilité (N) > 12 000 Fuage (mm) = 2 - 4	3 000 < 7.5 % 10 000 < 10 %	-

ANNEXE VII

ÉNERGIE DE COMPACTION

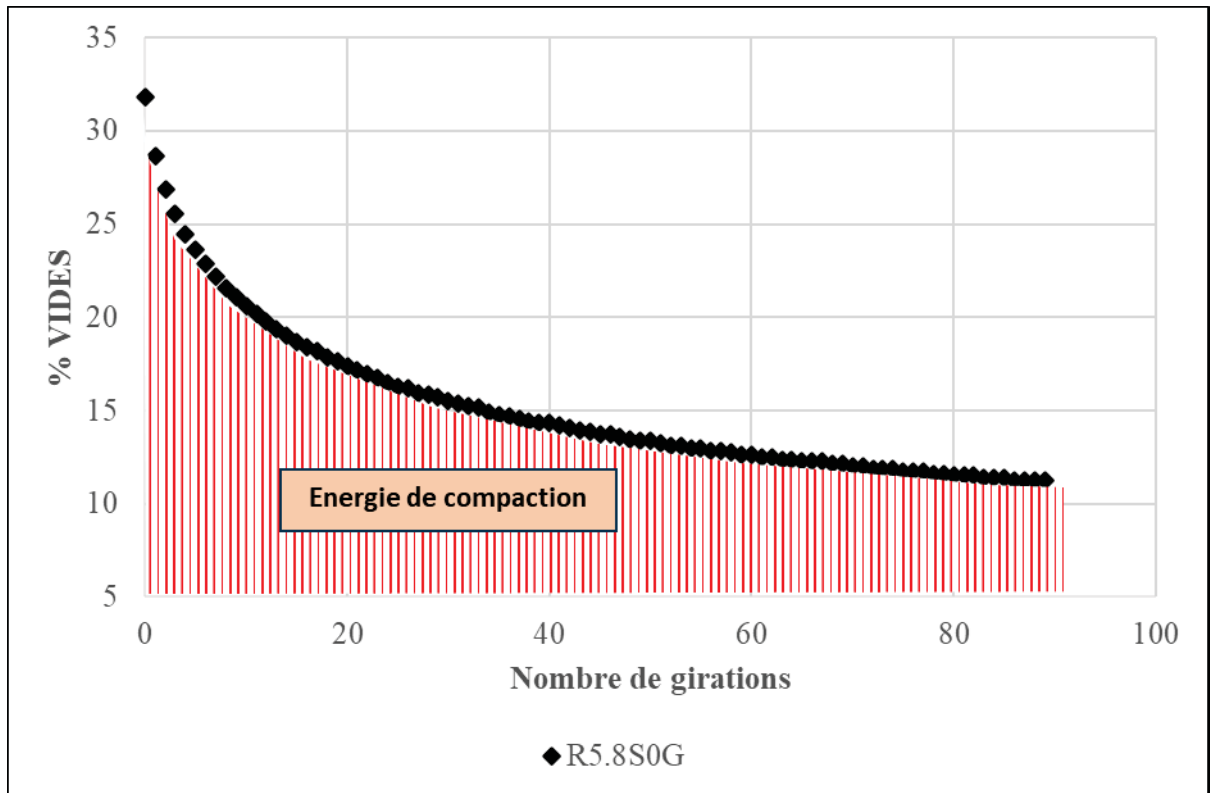


Figure-A VII-1 Exemple de représentation de l'air en dessous de la courbe de compaction pour calcul d'énergie de compaction

ANNEXE VIII

TENUE À L'EAU

Tableau-A VIII-1 Description plus détaillée des résultats de tenue à l'eau

Enrobes	Eprouvettes	Charge Max (N)	Hauteur (mm)	Facteur de correction	stabilité (N)	AT & ST	TENUE A L'EAU (%)	Perte de stabilité (%)	Fluage (mm)	Fluage moyen (mm)	Dmb	% Vides
MS5.8R-0-S	#2 WET	15557	69.63	0.8534	13277		87.7	12.3	3.7	3.7	2.293	8.3
	#5 WET	16004	69.76	0.8507	13615	13341			3.6		2.294	8.3
	#6 WET	15656	70.34	0.8387	13131				3.8		2.297	8.2
	#4 DRY	17242	69.97	0.8463	14592				3.6		2.286	8.6
	#3 DRY	17513	69.66	0.8528	14935	15206			3.5		2.292	8.4
MS4.0B-25-SG	#1 DRY	18783	69.48	0.8566	16090		82.4	17.6	3.5	2.7	2.293	8.3
	#6 WET	17076	69.85	0.8488	14495	14304			2.7		2.284	6.8
	#3 WET	0	70.06	0.8445	0				2.6		2.282	6.9
	#5 WET	16815	70.31	0.8393	14113				2.7		2.286	6.7
	#1 DRY	20341	70.02	0.8453	17194	17364			2.4		2.272	7.3
MS5.0B-10-SG	#2 DRY	20623	70.34	0.8387	17296		81.3	18.7	2.5	3.8	2.284	6.8
	#4 DRY	20844	70.06	0.8445	17602				2.5		2.287	6.7
	#1 WET	19999	67.82	0.8930	17859	16925			3.8		2.357	4.8
	#2 WET	19524	67.85	0.8923	17422				3.7		2.347	5.2
	#4 WET	17347	67.81	0.8932	15495				3.8		2.359	4.7
MS4.0B-10-BB	#3 DRY	23656	67.83	0.8928	21119	20818	88.9	11.1	3.7	3.0	2.34	5.5
	#5 DRY	21457	67.87	0.8919	19137				3.7		2.345	5.3
	#6 DRY	24882	67.86	0.8921	22197				3.5		2.338	5.6
	#1 WET	12966	58.14	1.1638	15090	13052			2.9		2.709	5.6
	#2 WET	12784	58.22	1.1611	14843				3.1		2.712	5.5
	#3 WET	13407	58.02	1.1680	15659				3.1	2.8	2.713	5.5
	#4 DRY	14253	58.03	1.1676	16642	14682			2.9		2.715	5.4
	#5 DRY	14082	58.08	1.1659	16418				2.8		2.711	5.5
	#6 DRY	15712	58.06	1.1666	18329				2.8		2.71	5.6

ANNEXE IX

CHOIX DES COMPOSANTS – ENROBÉS (norme 4202)

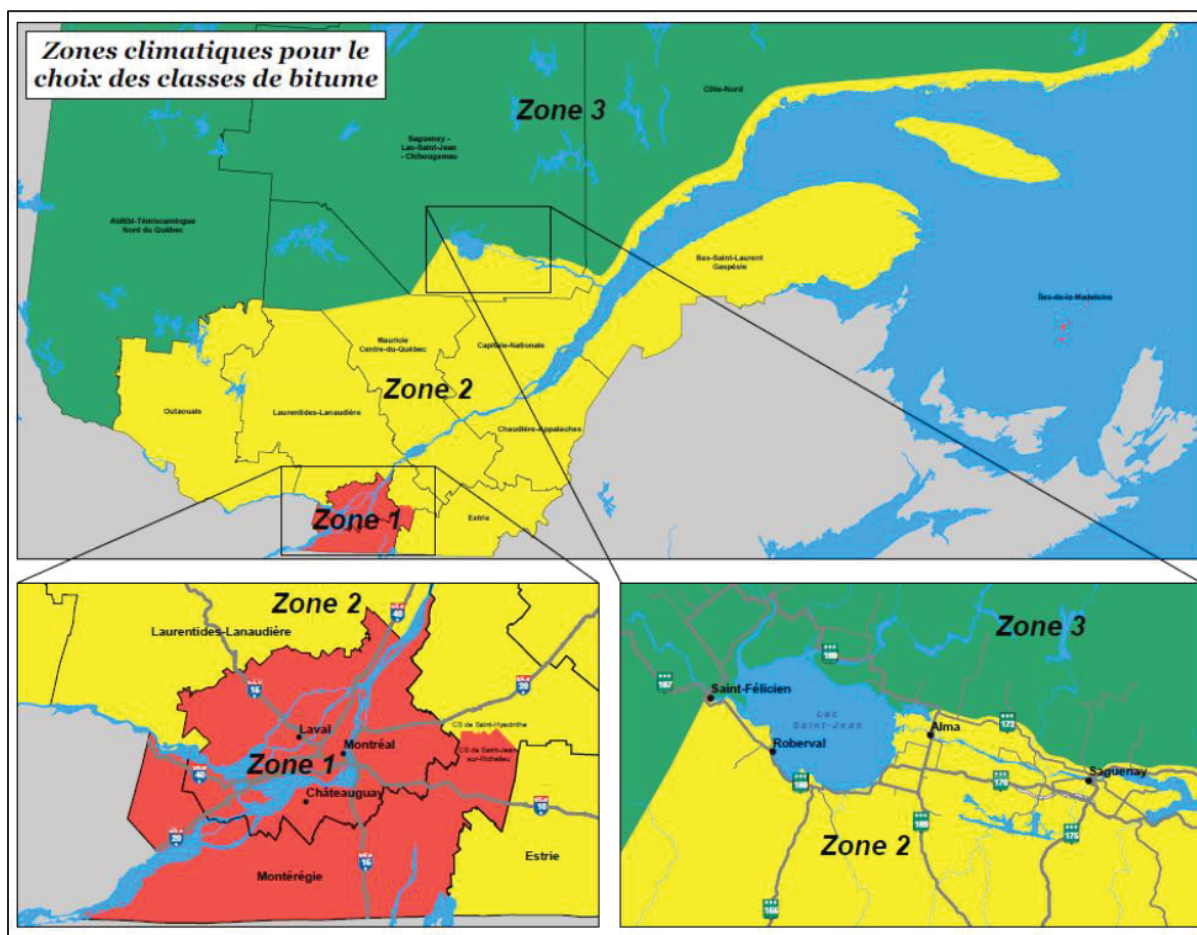


Figure-A IX-1 Zones climatiques pour le choix de classe de bitume
tiré de vol. 24, no 2, juin 2019 Bulletin d'information technique DGLC

Tableau-A IX-1 Recommandations pour construction neuve, reconstruction et resurfaçage
tiré de vol. 24, no 2, juin 2019 Bulletin d'information technique DGLC

Type de route	Débit de circulation		Couche de surface						Couche de base					
			Bitume			Catégorie gros granulats	Catégorie granulats fins	Essai exigé	Bitume			Catégorie gros granulats	Catégorie granulats fins	Essai exigé
	DJMA	ECAS annuel	Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG				Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG			
Autoroute	> 20 000	> 1 000 000	64E-28	58E-34	s.o.	1a	1	Orniéreur, CPP	64E-28	58E-34	s.o.	2c	1	Orniéreur
	< 20 000 > 5 000	< 1 000 000 > 500 000	64E-28	58E-34	s.o.	1a	1	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	s.o.	3c	1	Orniéreur
	< 5 000	< 500 000	64E-28	58E-34	s.o.	2b	1	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	s.o.	3c	2	Orniéreur
Nationale	> 20 000	> 500 000	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ^a	1a	1	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	52V-40	3c	1	Orniéreur
	< 20 000 > 5 000	< 500 000 > 300 000	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ^a	2b	2	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
	< 5 000	< 300 000	64H-28	58H-34	52V-40 58H-34 ^a	3c	2		64H-28	58H-34	52V-40	3c	2	
Régionale et collectrice	> 20 000	> 300 000	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ^a	2b	1	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
	< 20 000 > 5 000	< 300 000 > 150 000	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ^a	3b	2	Orniéreur	64H-28	58H-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
	< 5 000	< 150 000	64H-28 ^b	58H-34 58S-28 ^b	52V-40 58H-34 ^a	3c	2		58S-28	58H-34	52V-40	3c	2	

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Addaci, B. (2008). *Comportement mécanique des enrobés bitumineux renforcés par la fibre de verre*. Université de Batna 2.
- Adlinge, S. S., & Gupta, A. K. (2013). Pavement deterioration and its causes. *International journal of innovative research and development*, 2(4), 437-450.
- Agal, T. (2005). *Développement d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées pour la Ville de Montréal*. École de technologie supérieure.
- AltanYilmaz, Ş. (2016). WATER EFFECT ON DETERIORATIONS OF ASPHALT PAVEMENTS. *Journal*, 2(1), 1-6.
- Asphalt Shingles Recycling : Waste Management, Utilization of Reclaimed Materials, Testing, Study of Grading, Performance Tests, Health Issues. (2023). *Royal Roofing*. <https://www.royalroofinginc.ca/reclaiming-asphalt-shingles-for-hma-road-pavement/>
- AYAD, E., & BADJEBBAR, A. (2020). *ETUDE DE COMPORTEMENT D'UN MICRO-BETON BITUMINEUX RENFORCÉ PAR DES DECHETS PLASTIQUES*. Université KASDI-MERBAH Ouargla.
- Barco, C. (2007). *Influence de la température de compactage des plaques d'enrobés sur la résistance à l'orniérage*. École de technologie supérieure.
- Bathias, C., & Baïlon, J.-P. (1980). *La fatigue des matériaux et des structures*.
- Belley-Vézina, V., & Truong, L. V.-A. (2016). Révolution dans le traitement des matériaux de CRD: La mobilisation d'une région qui porte fruit. *Vecteur Environnement*, 49(4), 22.
- Ben Salem, F. (2017). *Évaluation de l'effet d'ajout du régénérant sur le bitume vieilli et sur les enrobés recyclés à froid*. École de technologie supérieure.
- Benti, F., Mulugeta, S., & Jibril, J. (2018). *Causes of Asphalt Pavement Distresses and their Remedies; A Case Study of Mekenajo-Nejo Asphalt Road; Ethiopia*. [Thesis]. <https://repository.ju.edu.et/handle/123456789/1364>
- Berger, E. H. (1951). Choice of Asphalt for Asphalt Roofing. *World Petroleum Congress*, WPC-4637.
- Bordjiba, A., & Guenfoud, H. (2018). Effet du climat sur la résistance des enrobés recyclés. *Academic Journal of Civil Engineering*, 36(1), 554-557.
- Boser, R. A., & El-Gafy, M. (2011). Accelerating Waste Minimization in Residential Construction : A Source Separation Case Study. *International Journal of Construction Education and Research*, 7(1), 58-70. <https://doi.org/10.1080/15578771.2011.547063>

- Bourg, M.-C. (2014). Un colloque "Nids de poule"! *Vecteur Environnement*, 47(4), 31.
- BOUTEBAK, D. (2023). *ÉTUDE DE RENFORCEMENT DE LA ROUTE NATIONALE N° 111 DU PK123 AU PK138 (ENTRE SIDI-ABDERRAHMANE ET EL-BAYADH)*. Université Ibn Khaldoun.
- Chen, S., Gong, F., Ge, D., You, Z., & Sousa, J. B. (2019). Use of reacted and activated rubber in ultra-thin hot mixture asphalt overlay for wet-freeze climates. *Journal of Cleaner Production*, 232, 369-378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.364>
- Chen, Y., Xu, S., Tebaldi, G., & Romeo, E. (2022). Role of mineral filler in asphalt mixture. *Road materials and pavement design*, 23(2), 247-286.
- Crispino, M. (2019). *Pavement and Asset Management : Proceedings of the World Conference on Pavement and Asset Management (WCPAM 2017), June 12-16, 2017, Baveno, Italy*. CRC Press.
- Daoudi, A., Dony, A., Perraton, D., & Carter, A. (2022). Rheological multi-scale evaluation of RAP and RAS binders mobilisation in hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2064903>
- Di Benedetto, H., & Corté, J.-F. (2004). *Matériaux routiers bitumineux : Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Hermès science publications.
- Dumont, A.-G. (2005). Composants minéraux. *Matériaux routiers bitumineux 1: description et propriétés des constituants*, 21-36.
- Edjeou, W., Cerezo, V., Zahouani, H., & Do, M.-T. (2022). Modélisation multiéchelle de l'adhérence des revêtements routiers. *15ème colloque national en calcul des structures*.
- Elseifi Mostafa A., Salari Saman, Mohammad Louay N., Hassan Marwa, Daly William H., & Dessouky Samer. (2012). New Approach to Recycling Asphalt Shingles in Hot-Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(11), 1403-1411. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000520](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000520)
- Farris, T. D. (2016). *Evaluating the Contribution of Asphalt Binder from Recycled Asphalt Shingles in Asphalt Concrete*. <https://etd.auburn.edu/handle/10415/5120>
- FERRARO MAIA, A., VIVIEN, N., & UDRON, J. (1986). Influence de la teneur et du grade du bitume sur le comportement structurel d'un béton bitumineux. *REV GEN ROUTES AERODR*, 628.
- Guo, F., Pei, J., Zhang, J., Xue, B., Sun, G., & Li, R. (2020). Study on the adhesion property between asphalt binder and aggregate : A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 256, 119474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119474>

- Guo, M., Zhang, R., Du, X., & Liu, P. (2023). A state-of-the-art review on the functionality of ultra-thin overlays towards a future low carbon road maintenance. *Engineering*.
- Habbouche, J., Boz, I., Underwood, B. S., Castorena, C., Gulzar, S., Fried, A., & Preciado, J. (2022). Review From Multiple Perspectives for the State of the Practice on the Use of Recycled Asphalt Materials and Recycling Agents in Asphalt Concrete Surface Mixtures. *Transportation Research Record*, 2676(4), 407-420. <https://doi.org/10.1177/03611981211061130>
- Hansen, K. (2009). Shingles : There's Black Gold in Those Roofs. *Hot Mix Asphalt Technology*, 14(1), 17-21.
- Hellel, M., Chatelain, J.-L., Cheikh-Lounis, G., Machane, D., Guillier, B., & Haddoum, H. (2013). Utilisation de la méthode h/v bruit de fond pour l'estimation rapide de la géométrie d'une zone instable : Cas du glissement d'une route à Lakhdaria (Algérie). *Bulletin du Service Géologique National*, 22(1), 1-11.
- Huber, G. (2013a). History of Asphalt Mix Design in North America, Part 1 : From Hubbard to Marshall. *Asphalt*, 28(1).
- Huber, G. (2013b). History of asphalt mix design in North America, Part II: Superpave. *Asphalt*, 28(2).
- Jahren, C. T., & Behling, K. R. (2004). Thin Maintenance Surface Treatments : Comparative Study. *Transportation Research Record*, 1866(1), 20-27. <https://doi.org/10.3141/1866-03>
- Jain, S., & Singh, B. (2021). Cold mix asphalt : An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124378>
- James, A. (2006). Overview of asphalt emulsion. *Transportation Research Circular E-C102: Asphalt Emulsion Technology*, 1-15.
- Jiang, Q., Chen, M., Zhao, Y., Wu, S., Fan, Y., Gan, Z., & Zhang, Y. (2022). Comprehensive assessment of the durability deterioration of asphalt pavement in salt environment : A literature review. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01706. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01706>
- Kotronis, P. (2020). *Évaluation des risques et adaptation climatique d'ouvrages en génie civil et bâtiments : Projet RI-ADAPTCLIM*. ISTE Group.
- Lachance Tremblay, É. (2014). *Incorporation de particules de verre post-consommation dans un enrobé bitumineux de type ESG14*. École de technologie supérieure.
- Lacoffe, A. (2014). *Étude des causes de dégradation du marquage au sol sur les routes du Québec*. École Polytechnique de Montréal.

- Lalonde Renaud, O. (2015). *Influence de la rigidité du revêtement sur les prédictions de soulèvement au gel*. École de technologie supérieure.
- LANGLOIS, R. (1987). LA REFLEXION DES FISSURES DANS LES REVETEMENTS BITUMINEUX AU QUEBEC. *ROUTES ET TRANSPORTS*, 17(2).
- Lavoie, J. (2009). *Modélisation numérique de la gazéification de la biomasse dans un réacteur à lit fluidisé*. École Polytechnique de Montréal.
- Lédée, V., Delalande, G., & Dupont, P. (2005). Adhérence et granulats. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 255, 91-116.
- Légaré Bilodeau, C. (2011). *Identification de scénarios de valorisation des matières résiduelles critiques aux Îles-de-la-Madeleine—Rapport de stage en gestion des matières résiduelles* (Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Éd.; Collections de BAnQ).
<https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2076991>
- Li, F., Feng, J., Li, Y., & Zhou, S. (2021). *Preventive maintenance technology for asphalt pavement*. Springer.
- Li, X., Ye, J., Badjona, Y., Chen, Y., Luo, S., Song, X., Zhang, H., Yao, H., Yang, L., You, L., Wang, C., & You, Z. (2020). Preparation and performance of colored Ultra-Thin overlay for preventive maintenance. *Construction and Building Materials*, 249, 118619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118619>
- Liu, Y., Su, P., Li, M., You, Z., & Zhao, M. (2020). Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 573-599. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.003>
- Liu, Z., Luo, S., Quan, X., Wei, X., Yang, X., & Li, Q. (2019). Laboratory evaluation of performance of porous ultra-thin overlay. *Construction and Building Materials*, 204, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.147>
- Ma, Y., Zheng, K., Ding, Y., Polaczyk, P., Jiang, X., & Huang, B. (2022). Binder availability and blending efficiency of reclaimed asphalt : A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 357, 129334.
- Malo, J.-M. (2013). *Incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux*. École de technologie supérieure.
- Meunier, M., Perraton, D., & Carter, A. (2011). Détermination des pages de température affectant l'orniérage des couches d'enrobés bitumineux. *The Fifty-sixth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association* Canadian Technical Asphalt Association.

- Mohamed Ibrahim, H. (2020). *Etude de l'influence du concassage du gravier roulé sur les performances des mélanges hydraulique et hydrocarboné*. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Morin, A. (2022). *La gestion de projet d'une chaussée en enrobé dans le but d'augmenter sa pérennité*. Université du Québec à Trois-Rivières.
- Nam, B., Maherinia, H., & Behzadan, A. H. (2014). Mechanical characterization of asphalt tear-off roofing shingles in Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 50, 308-316.
- Naturels, B. P. (2020). Influence des caractéristiques physiques du sol sur la durabilité du corps de chaussée : Cas des axes routiers de Bonabéri, Douala, Cameroun. *Afrique Science*, 16(5), 147-160.
- Nicholson, J. (2007). Asphalt Shingles Help Nature Trails. *Solid Waste & Recycling*, 12(1), 17-18.
- Noël, F., Perraton, D., & Carter, A. (2006). *INCORPORATION DE PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION DANS LES ENROBÉS BITUMINEUX*.
- Paradis, M. (2015). *Les enrobés du MTQ et leurs usages en milieu municipal*.
- Philippot, G. (2010). *Conséquences énergétiques et environnementales de l'utilisation des enrobés tièdes lors de la construction des routes*. École de technologie supérieure.
- PIARC, U. R. T. (2023). *MESURES VISANT A AMELIORER LA RESILIENCE DES CHAUSSEES*.
- Pirmohammad, S., & Ayatollahi, M. R. (2020). *Fracture Behavior of Asphalt Materials* (Vol. 14). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39974-0>
- Pouranian, M. R., & Shishehbor, M. (2019). Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures : A Review. *Environments*, 6(6). <https://doi.org/10.3390/environments6060073>
- Rèche, M. (2004). Effet des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées. *THESE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE, SPECIALITE: GENIE CIVIL*.
- Rohanatasha, R. (2019). *Pavement surface condition attributed to traffic operations on federal roadways in Kuantan*.
- Saoud, W., & Meddahi, M. (2022). *Etude analytique de la gestion des déchets à Abu Dhabi durant la période 2012-2019*. 04, 25-35.

- Sengoz, B., & Topal, A. (2005). Use of asphalt roofing shingle waste in HMA. *Construction and Building Materials*, 19(5), 337-346.
- SIDIBE AISSATA, H. H. (2020). *AMELIORATION DU BETON BITUMINEUX PAR DES POLYMERES ISSUS DU RECYCLAGE*.
- Sousa, J. B., Pais, J. C., Prates, M., Barros, R., Langlois, P., & Leclerc, A.-M. (1998). Effect of Aggregate Gradation on Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixes. *Transportation Research Record*, 1630(1), 62-68. <https://doi.org/10.3141/1630-08>
- St-Jacques, M., & Bertrand, M. (2003). Formulation d'un enrobé bitumineux coloré pour le Québec. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, BLPC*, 4484.
- St-Laurent, D. (2010). Direction Générale du Laboratoire des Chaussées. *Logiciel de dimensionnement des chaussées souples*, 2.
- Susanna, A., Crispino, M., Giustozzi, F., & Toraldo, E. (2017). Deterioration trends of asphalt pavement friction and roughness from medium-term surveys on major Italian roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(5), 421-433. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.002>
- Swiertz, D., Mahmoud, E., & Bahia, H. U. (2011). Estimating the Effect of Recycled Asphalt Pavements and Asphalt Shingles on Fresh Binder, Low-Temperature Properties without Extraction and Recovery. *Transportation Research Record*, 2208(1), 48-55. <https://doi.org/10.3141/2208-07>
- Thanaya, I. N. A., Zoorob, S. E., & Forth, J. P. (2009). A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 162(1), 47-55.
- Vavrik, W. R., Pine, W. J., & Carpenter, S. H. (2002). Aggregate Blending for Asphalt Mix Design: Bailey Method. *Transportation Research Record*, 1789(1), 146-153. <https://doi.org/10.3141/1789-16>
- Wang, S., Zhang, H., Du, C., Wang, Z., Tian, Y., & Yao, X. (2024). Mechanical Performance of Patched Pavements with Different Patching Shapes Based on 2D and 3D Finite Element Simulations. *Infrastructures*, 9(3), 61.
- Watson, D. E., Johnson, A., & Sharma, H. R. (1998). Georgia's experience with recycled roofing shingles in asphaltic concrete. *Transportation Research Record*, 1638(1), 129-133.
- Willis, J. R. (2013). Reclaimed asphalt shingles characterization : Best practices. *National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn Univ., Auburn, AL*.

- Yan, Y., Hernando, D., & Roque, R. (2019). A solvent free method to characterize the effect of recycled asphalt shingles on virgin asphalt binder. *Journal of Cleaner Production*, 208, 795-805. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.153>
- Yang, J., Sun, C., Tao, W., Gao, J., Huang, B., & Zhang, J. (2021). Laboratory Investigation of Compaction Characteristics of Plant Recycled Hot-Mix Asphalt Mixture. *Sustainability*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063005>
- Zhao, K., & Wang, Y. (2022). Improvements on the use of GPC to measure large-size microstructures in aged asphalt binders. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(7), 2309-2319.
- Zhao, S., Huang, B., Shu, X., & Woods, M. E. (2015). Quantitative characterization of binder blending : How much recycled binder is mobilized during mixing? *Transportation Research Record*, 2506(1), 72-80.
- Zhou, F., Estakhri, C., & Scullion, T. (2014). *Literature review : Performance of RAP/RAS mixes and new direction.* (dot:27295). FHWA/TX-13/0-6738-1. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/27295>
- Zhou, F., Li, H., Hu, S., Button, J. W., & Epps, J. A. (2012). *Characterization and best use of recycled asphalt shingles in hot-mix asphalt.* Texas. Dept. of Transportation. Research and Technology Implementation Office.
- Zickell, A. J. (2003). Asbestos analysis of post consumer asphalt shingles. *Technical Rep*, 41.

