

INCORPORATION DE PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION DANS LES ENROBÉS BITUMINEUX

Frédéric NOËL

*Étudiant, Génie de la construction
ÉTS*

Daniel PERRATON et Alan CARTER

*Professeurs, Génie de la construction
ÉTS*



RECYC QUÉBEC

Décembre 2006

TABLE DES MATIÈRES

MISE EN CONTEXTE.....	8
INTRODUCTION	12
1. APPLICATIONS POTENTIELLES	12
2. APPLICATION CIBLÉE : MANDAT DU LUCREB	13
2.1. PERFORMANCES REQUISES POUR L'APPLICATION CIBLÉE : LES «INPUT» À ATTEINDRE	14
2.1.1 Caractéristiques physiques à atteindre	14
2.1.2 Caractéristiques mécaniques à atteindre	15
3. REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR L'INCORPORATION DE PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION DANS LES ENROBÉS BITUMINEUX	16
3.1 Composition de l'ensemble des matériaux des toitures récupérés	16
3.2 Spécification de fabrication des bardeaux d'asphalte	17
3.3 Composition du bardeau de postconsommation	17
3.3.1 Propriétés des bitumes extraits des bardeaux de postconsommation	19
3.3.2 Propriétés des granulats extraits des bardeaux de postconsommation	21
3.3.3 Les fibres de renfort contenues dans le bardeau.....	23
3.4 Transformation des bardeaux postconsommation	23
3.4.1 Enlèvement des matériaux nuisibles	23
3.4.2 Déchiquetage des bardeaux.....	24
3.5Mode d'incorporation des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux à chaud.....	24
3.6 Méthodes de formulation utilisées pour les enrobés contenant des particules de bardeaux de postconsommation et les enrobés de contrôle	25
3.7 ...Essais de caractérisation et de simulation effectués sur des enrobés incorporant différents pourcentages de particules de bardeaux de postconsommation.....	29
3.7.1 Mesure du module résilient ou réversible	29

3.7.2	Résistance à l'ornièrerie (<i>rut resistance</i>)	31
3.7.3	Prédiction par modélisation de la performance sur route	31
3.8	 Planches d'essais réalisées	32
4	 ESSAIS EXPLORATOIRES QUANT À L'INCORPORATION DE PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION DANS LES ENROBÉS BITUMINEUX AU QUÉBEC	33
4.1	 Analyse partielle quant aux composantes de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre du programme d'essais exploratoires	34
4.1.1	 Déchiquetage du bardeau en laboratoire	34
4.1.2	 Teneur des différentes composantes, granulométrie des constituants solides et rhéologie du bitume des particules de bardeaux d'asphalte utilisées dans le cadre du programme d'essais exploratoires.....	35
4.1.2.1	Teneur des différentes composantes constituant les particules de bardeaux de postconsommation utilisés dans le cadre du programme d'essais exploratoires	36
4.1.2.2	Granularité des constituantes solide des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre du programme d'essais exploratoires	36
4.1.2.3	Rhéologie du bitume extrait du bardeaux.....	37
4.1.3	Évaluation sommaire des aspects de formulation (<i>Mix design</i>) d'enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation	37
4.1.3.1	INCORPORATION DE PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTES DE POSTCONSOMMATION DANS L'ENROBÉ	37
4.1.3.2	Formulation (<i>Mix design</i>) selon la méthode Marshall.....	38
4.2.2	Évaluation sommaire des performances mécaniques de l'enrobé incorporants 5% de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : EB14-BX5.....	39
4.2.2.1	Essais de module complexe.....	40
4.2.2.2	Essais de module résilient (module réversible)	41
	Les résultats confirment les observations des différents chercheurs vis-à-vis de la cohésion des enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : l'enrobé est plus cohésif. On peut estimer que cette augmentation est de l'ordre de 50%.	42
4.2.2.3	Essai de retrait thermique empêché.....	42
5	 LIGNES DIRECTRICES EN VUE DE MENER AU DÉVELOPPEMENT D'ENROBÉS BITUMINEUX CONTENANT DES PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION AU QUÉBEC	44
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45
	ANNEXE I.....	48
	MATÉRIAUX CONSTITUANT LES CHAUSSÉES BITUMINEUSES.....	48
	Bitumes	48

Généralités.....	48
Fabrication.....	48
Composition chimique	48
Bitumes modifiés aux polymères	48

ESSAIS DE CARACTÉRISATION SUR BITUMES 49

Tests classiques empiriques.....	49
Essai de pénétrabilité.....	49
Température de ramollissement bille et anneau : TBA	50
Test de comportement à basses températures dit « essai Fraass ».....	50
Conditionnement RTFOT	50
Conditionnement PAV	51

Exemples d’essais rhéologiques	51
Essais sous charge constante	51
Essai de module complexe – sollicitation sinusoïdale.....	52

Mastics	53
Définition	53
L’influence du filler	53

Enrobés bitumineux.....	53
Définition	53
Fabrication.....	53

ESSAIS DE CARACTÉRISATION SUR ENROBÉS BITUMINEUX..... 54

Comportement mécanique des enrobés bitumineux.....	54
--	----

Module complexe.....	55
-----------------------------	-----------

Module résilient ou réversible.....	57
--	-----------

Principe d’équivalence temps-température (PETT)	58
--	-----------

Essai à l’ornérier.....	59
Structure d’une chaussée	59
Sollicitations subies par la chaussée.....	60

ANNEXE II 648

Résumé projet bardeaux postconsommation : 3RMCDQ – RECYC QUÉBEC - LUCREB

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1	Valeurs moyennes et écarts types de la température à la rupture des différents enrobés testés.	21
Figure 3.2	Emplacement des différentes particules sur une feuille de bardeau	22
Figure 3.3	Courbe granulométrique avant et après extraction [5].....	23
Figure 3.4	Courbe granulométrique avant et après extraction [9].....	23
Figure 3.5	Stabilité Marshall en fonction du pourcentage de particules de bardeaux dans l'enrobé pour deux types de bitume vierge (dosage en bitume vierge réduit en proportion du dosage en bardeau).[1]	26
Figure 3.6	Pourcentage des vides inter-granulaire en fonction du pourcentage de bardeaux pour deux types de bitume vierge (dosage en bitume vierge réduit en proportion du dosage en bardeau). [1]	26
Figure 3.7	Fluage Marshall en fonction du pourcentage de particules de bardeaux dans l'enrobé pour deux types de bitume vierge (dosage en bitume vierge réduit en proportion du dosage en bardeau) [1]	26
Figure 3.8	Pourcentage des vides en fonction du pourcentage de particules de bardeaux pour deux types de bitume vierge (dosage en bitume vierge réduit en proportion du dosage en bardeau) [1].	26
Figure 3.9	Résultats des essais de la formulation Marshall en fonction de la teneur en bardeau [4] (Dosage du bitume vierge constant, fixé à 4,76% - aucune réduction en proportion au dosage en particules de bardeaux).....	28
Figure 3.10	Stabilité et fluage Marshall mesurés sur des briquettes comprenant différentes quantités de bitume vierge pour 1% de bardeaux recyclés [4] (dosage du bitume vierge réduit en proportion au dosage en particules de bardeaux)	28
Figure 3.11	Stabilité et fluage Marshall pour différentes teneurs en bardeau [5].....	29
Figure 3.12	Résultats des essais de module résilient sur des enrobés confectionnés avec différents grades de bitume et contenant différents pourcentages de particules de bardeaux de postconsommation [2]	30
Figure 3.13	Résultats des essais de module résilient sur des enrobés confectionnés contenant différents pourcentages de particules de bardeaux de postconsommation [5].....	30
Figure 3.14	Résistance à l'orniérage mesuré par GRYBOWSKI [8]	31
Figure 3.15	Résistance à l'orniérage mesuré par Sengoz et al.[4].....	31
Figure 4.1	Plan d'étude et d'essais exploratoires pour évaluer la faisabilité d'incorporer des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans l'enrobé EB14.....	34
Figure 4.2	Granularité du granulat extrait des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre du programme d'essais exploratoires	35
Figure 4.3	Résultat de l'analyse granulométrique faite sur les granulats des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre des essais exploratoires	37

Figure 4.4	Variation de la stabilité mesurée sur briquettes Marshall en fonction de la teneur en particules de bardeaux incorporée dans l'enrobé EB14 (Bitume vierge corrigé au taux de 11,4% de la teneur en particules de bardeaux)	39
Figure 4.5	Variation du fluage mesuré sur briquette Marshall en fonction de la teneur en particules de bardeaux incorporées dans l'enrobé EB14 (Bitume vierge corrigé au taux de 11,4% de la teneur en particules de bardeaux).....	39
Figure 4.6	Variation de la teneur en vides mesurée sur briquettes Marshall en fonction de la teneur en particules de bardeaux incorporée dans l'enrobé EB14 (Bitume vierge corrigé au taux de 11,4% de la teneur en particules de bardeaux)	39
Figure 4.7	Variation de la compacité mesurée sur briquettes Marshall en fonction de la teneur en particules de bardeaux incorporées dans l'enrobé EB14 (Bitume vierge corrigé au taux de 11,4% de la teneur en particules de bardeaux)	39
Figure 4.8	Compacteur de plaques MLPC (LUCREB ÉTS).....	40
Figure 4.9	Schématisation du plan de carottage des plaques d'enrobés pour les essais de module complexe, retrait thermique empêché et module résilient.....	40
Figure 4.10	Montage de l'essai de module complexe	41
Figure 4.11	Résultats des essais de module complexe pour l'enrobé EB14 et l'enrobé EB14-BX5	41
Figure 4.12	Montage de l'essai de module réversible ou résilient.....	42
Figure 4.13	Résultats de l'essai de module réversible pour l'enrobé EB14 et l'enrobé EB14-BX5	42
Figure 4.14	Montage de l'essai de retrait thermique empêché (TSRST).....	43
Figure 4.15	Résultats de l'essai de retrait thermique empêché pour l'enrobé EB14 et l'enrobé EB14-BX5.....	43

Annexe 1

Figure 1.1	Comportement des bitumes en fonction de la température [11]	49
Figure 1.2	Schéma d'un essai de pénétrabilité [11]	50
Figure 1.3	Schéma d'un essai de ramollissement bille et anneau [12]	50
Figure 1.4	Schéma d'un essai de fragilité Fraass [12].....	50
Figure 1.5	Essai RTFOT [45]	51
Figure 1.6	Essai PAV [45]	51
Figure 1.7	Principe de l'essai de BBR [12]	52
Figure 1.8	Principe d'un réhomètre rotatif plan plan (DSR, Dynamic Shear Rheometer) [12]	52
Figure 1.9	Comportement des bétons bitumineux, $\square$ déformation, N nombre de chargements [11]	54
Figure 1.10	Déphasage entre la sollicitation (force) et la réponse (déformation) du matériau [13]	55
Figure 1.11	Isothermes d'un béton bitumineux [12].....	56
Figure 1.12	Isochrones du même matériau [12]	56

Figure 1.13	Module complexe dans le plan Cole-Cole pour le même matériau [12].....	56
Figure 1.14	Module complexe dans l'espace de Black pour le même matériau [13].....	57
Figure 1.15	Courbe typique contrainte-déformation lors d'un essai de module résilient triaxial[13]	58
Figure 1.16	Exemple d'isothermes et de courbe maîtresse à 10°C d'un enrobé fabriqué avec un bitume pur [11]	58
Figure 1.17	Vue d'une plaque d'enrobé soumise à l'essai d'orniérage.....	59
Figure 1.18	Coupe type d'une structure de chaussée souple	60
Figure 1.19	Sollicitations combinées agissant sur les chaussées routières	60
Figure 1.20	Schématisation des sollicitations induites par le trafic [11]	61
Figure 1.21	Schématisation des sollicitations induites par la température [22]	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Caractéristique cible (INPUT) pour l'enrobé à chaud EB14 formulé selon le principe de la méthode Marshall.....	16
Tableau 3.1	Composition des matériaux de toitures généralement récupérés [5]	17
Tableau 3.2	Spécifications liées à la fabrication des bardeaux d'asphalte [1]	18
Tableau 3.3	Proportion des composantes retrouvées dans les bardeaux postconsommation de différentes études [1][4][8]	19
Tableau 3.4	Essais effectués sur le bitume récupéré de bardeaux de postconsommation fournis par ReACT's HMA[8].....	20
Tableau 3.5	Caractéristiques d'un bitume de bardeaux de postconsommation [5]	20
Tableau 3.6	Composantes granulaires retrouvés dans les bardeaux postconsommation selon NEWCOMB, et coll. [1]	22
Tableau 3.7	Composantes granulaires retrouvées dans les bardeaux de postconsommation[8]	22
Tableau 3.8	Masse des matériaux utilisés pour la confection des différents enrobés [4]	26
Tableau 3.9	Caractéristiques des mélanges réalisés lors de l'étude faite par ALI, et coll. [5]	29
Tableau 3.10	Pourcentage de bardeau dans les différentes couches de la planche d'essai [10]	33
Tableau 4.1	Teneur des composantes des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre du programme d'essais exploratoires	36
Tableau II.1	Synthèse des critères cibles à rencontrer pour l'enrobé EB-14BX5 (INPUT- Spécifications d'un EB-14 : méthode de formulation Marshall) et synthèse des critères mesurés (OUTPUT)	67

Résumé

Au Québec, chaque année, entre 170 000 et 200 000 tonnes de bardeaux d'asphalte sont retirées des toitures à la fin de leur vie utile pour être remplacées. En ce moment, toutes ces tonnes de matériaux sont disposées dans des sites d'enfouissement de matériaux secs. Bien sûr pour disposer de ces débris les entrepreneurs doivent déboursier un certain montant. Plutôt que de simplement disposer de ces débris, il est envisageable d'en tirer bénéfice par une action de recyclage. Le recyclage des bardeaux d'asphalte de postconsommation présente un bénéfice environnemental non négligeable, dû à la diminution de bardeaux dans les sites d'enfouissement. D'autre part, un bénéfice économique est également significatif car il est possible de diminuer la consommation des matières premières par remplacement des composantes par des bardeaux recyclés.

Ce rapport présente en premier lieu, les différentes applications potentielles connues. Ensuite il traite plus en détail d'une application ciblée pour le recyclage de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, laquelle prend en compte une contrainte de mise en marché importante, à savoir la taille de déchiquetage. Dans le but d'incorporer le plus grand volume possible de bardeaux, l'application la plus pertinente est certainement l'incorporation dans les enrobés bitumineux. Plus spécifiquement, les enrobés utilisés pour les routes rurales et régionales, gérées par les villes ou municipalités, présentent un intérêt marqué puisque ces infrastructures routières représentent plus de 72 pour cent des routes au Québec. À ce titre, de par sa polyvalence, l'enrobé EB-14 correspond le mieux à ce type de construction. En effet, cet enrobé à chaud, peut servir aussi bien de couche de surface ou encore de couche de base.

Une revue de la littérature a permis de déterminer les différentes composantes des bardeaux de postconsommation ainsi que certaines de leurs caractéristiques et de connaître de quelle façon ces composantes interagissent une fois incorporées à l'enrobé. La revue de la littérature a également permis de mettre en relief le mode d'incorporation approprié et préconisé des particules de bardeaux de postconsommation. La composition des matériaux récupérés, lors de rénovation de toitures, montre que la présence de matériaux indésirables est relativement faible. A priori, l'enlèvement des matières non désirables ne présente donc pas un obstacle majeur, notamment en favorisant le tri à la source. Également, différentes méthodes de formulation sont reportées dans la littérature et les dosages optimaux de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation diffèrent grandement. Les dosages optimaux peuvent varier (de 1 à 25%) selon les matières premières utilisées. D'un point de vue mécanique, la littérature souligne que l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans un enrobé a pour effet d'accroître son module résilient (M_r). D'un point de vue structural, c'est donc dire, que pour des épaisseurs de couches constantes, l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation réduit la déflexion de la chaussée. Il a aussi été démontré, par des essais de laboratoire, que la résistance à l'orniérage est grandement améliorée par l'ajout de particules de bardeaux de postconsommation.

Dans la perspective d'évaluer la faisabilité d'incorporer des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation au sein d'enrobés bitumineux, un programme d'essais exploratoires a donc été élaboré pour l'enrobé bitumineux EB-14. Le programme d'essais exploratoires a porté notamment sur deux niveaux : 1) Une analyse partielle quant aux composantes des bardeaux, et 2) Une évaluation sommaire des performances permettant aux donneurs d'ouvrages de porter une appréciation de l'enrobé avec bardeaux, soit d'un point de vue structural (mesure du M_r) et d'un point de vue durabilité. Ce dernier étant essentiellement abordé d'un point de vue «*Mix design*» et ce, en référence aux exigences liées à la formulation de l'enrobé EB-14.

Tous les essais exploratoires ont été réalisés dans les laboratoires de LUCREB. Une formulation établie suivant le principe de la méthode Marshall a été fixée pour déterminer la quantité optimale de particules de bardeaux de postconsommation pouvant être incorporée dans l'enrobé EB-14. Des enrobés incorporant 0; 2,5; 5; 7,5 et 10% (% de la masse d'enrobé) de particules de bardeaux de postconsommation ont été réalisés. La détermination de la teneur optimale en particules de bardeaux de postconsommation a été établie sur la base des critères fixés par le ministère des Transports du Québec concernant l'enrobé EB-14. L'enrobé incorporant 5% de particules de bardeaux de postconsommation, désigné EB-14BX5, a été retenu pour la suite des essais exploratoires visant à évaluer l'ordre de grandeur de ses performances mécaniques.

Dans le but de comparer son comportement mécanique à partir de la mesure des modules réversibles des modules complexes et de retrait thermique empêché, des essais ont été réalisés sur l'enrobé EB-14 BX5 et sur un mélange témoin EB-14 sans bardeau. Les différents résultats sont très encourageants. Le tableau II.1 présente la synthèse des critères cibles à rencontrer (*INPUT*), en correspondance aux spécifications de l'enrobé EB-14, et la synthèse des critères mesurés (*OUTPUT*) de l'enrobé EB-14BX5. Les résultats des essais de module réversible (M_r) montrent que la résistance de l'enrobé EB-14BX5 est supérieure à celle de l'enrobé de référence. Notamment, le M_r de l'enrobé EB-14BX5 est deux fois celui de l'enrobé de référence à 10°C-10Hz. Par ailleurs, les résultats d'essais de modules complexes montrent également une bonne réponse en petites déformations de l'enrobé EB-14BX5 aux différentes fréquences de sollicitation et de températures.

Tableau II.1 : Synthèse des critères cibles à rencontrer pour l'enrobé EB-14BX5 (*INPUT*-spécifications d'un EB-14 : méthode de formulation Marshall) et synthèse des critères mesurés (*OUTPUT*)

	Critères ciblés EB-14 (<i>INPUT</i>)	Critères mesurés EB-14BX5 (<i>OUTPUT</i>)
Stabilité Marshall (N)(min)	9 000	16 500
Fluage Marshall (mm)	2,0-4,0	3,5
vides (%)	2,0-5,0	4
Compacité (%min)	92%	96
Résistance orniérage	10% max.	Essai non réalisé
M _r (MPa) (20°C;1Hz)	>1000	3900

Bien que les résultats obtenus des essais préliminaires soient très positifs, il n'en demeure pas moins qu'ils sont préliminaires et incomplets. Ces essais ont été effectués sur une seule source de bardeau et, de surcroît, concassé en laboratoire. Des séries d'essais complémentaires plus exhaustives sont requises pour préciser les performances en petites déformations (E^* et M_r), à la fatigue, à l'orniérage et aux basses températures. En effectuant ces essais sur des enrobés contenant divers pourcentages de bardeaux provenant de différentes sources, il sera possible d'évaluer l'impact précis de l'incorporation de particules de bardeaux de postcosommation sur les performances de l'enrobé. Il est impératif de cerner l'importance de la variabilité attendue de ces performances en variant les sources de bardeaux et par la suite suivant des conditions de mise ne œuvre en conditions de chantier : la mise en œuvre de planches d'essais jumelée à un suivi de performances rigoureux représente une voie à privilégier.

Mise en contexte

Au Québec, chaque année, entre 170 000 et 200 000 tonnes de bardeaux d'asphalte sont retirées des toitures à la fin de leur vie utile pour être remplacées [1]. Actuellement, toutes ces tonnes de matériaux sont disposées dans des sites d'enfouissement de matériaux secs. Actuellement, la grande majorité des bardeaux d'asphalte post-consommation se retrouvent dans les lieux d'élimination [1].

Les bardeaux d'asphalte, étant composés de bitume (30 à 35 %) relativement dur, de granulats de petite dimension (50 à 60 %) et de fibres organiques ou inorganiques (1 à 12 %) [2], représentent une source de matières premières pour la fabrication de certains produits de construction. Notamment, la fabrication d'enrobés bitumineux incorporant des particules de bardeaux d'asphalte recyclés est une voie intéressante et prometteuse pour le recyclage.

Il est possible de tirer bénéfice de recycler le bardeau postconsommation. Un bénéfice environnemental, dû à la diminution de bardeaux dans les sites d'enfouissement de matériaux secs, mais également un bénéfice économique. En effet, si on arrive à diminuer la consommation de matières premières servant à la fabrication de matériaux de construction par l'intégration de bardeaux de postconsommation recyclés, on économise à la fois au niveau des matières premières et dans les coûts associés à l'enfouissement.

Si cette problématique est présente au Québec, elle l'est également dans toutes les provinces et pays consommateurs de bardeaux d'asphalte. À ce jour, différentes applications semblent avoir été envisagées : incorporation dans les matériaux granulaires et les enrobés bitumineux; décomposition en nouvelles matières premières, etc. L'application qui semble la plus prometteuse et qui suscite le plus d'intérêt est l'incorporation de particules de bardeaux de postconsommation dans les enrobés bitumineux. Afin d'en connaître la teneur optimale et de caractériser leurs incidences sur les propriétés de l'enrobé bitumineux, différents groupes de recherche ont effectué des essais pour valider l'incorporation de telles particules dans les enrobés bitumineux. [2,3,4,5,6,8, 9].

Depuis les années 90, le ministère du Transport américain a investi beaucoup d'efforts afin de vérifier la possibilité d'utiliser les bardeaux de postfabrication et de postconsommation dans les enrobés bitumineux [2]. Ils ont premièrement été utilisés pour des pistes cyclables, pour ensuite être testés sur des tronçons de routes à trafics modéré et élevé [10].

Au Québec, des recherches et des essais ont été effectués pour vérifier la faisabilité d'utiliser les rebuts industriels de bardeaux d'asphalte de postfabrication dans les enrobés bitumineux. À ce titre, actuellement, le ministère des Transports du Québec (MTQ) accepte l'utilisation de tels bardeaux dans les enrobés bitumineux. De surcroît, le MTQ reconnaît un apport en bitume des particules de bardeaux de postconsommation¹ permettant une réduction du bitume vierge dans l'enrobé, assurant ainsi une rentabilité des actions de recyclage. Par contre, jusqu'à ce jour au Québec, rien n'a été fait pour évaluer la pertinence d'incorporer des particules de bardeaux de postconsommation dans les enrobés bitumineux. [1].

¹ La teneur en bitume mobilisable est évaluée à 0,5 %.

Ce rapport présente, en premier lieu, les applications potentielles connues de bardeaux de postconsommation, pour ensuite cibler l'application la plus pertinente. Dans un deuxième temps, les spécifications quant à l'application ciblée seront mises en évidence. Une revue de la littérature mettant en contexte l'application ciblée sera alors présentée. Par la suite, la synthèse d'une revue de la littérature des recherches faisant état de l'utilisation des bardeaux de postconsommation dans les enrobés bitumineux sera présentée. Finalement, un programme d'essais exploratoires a été conduit de manière à évaluer la faisabilité d'incorporer des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux au Québec.

Introduction

Le présent rapport se rapporte à l'incorporation de particules de bardeaux de postconsommation dans la confection d'enrobés bitumineux. Des recherches antérieures sur l'incorporation de particules de bardeaux neufs recyclés ont montré que cet ajout permet d'obtenir des enrobés de qualité et que, de surcroît, une fraction du bitume des bardeaux pouvait être comptabilisée dans le dosage des constituants de l'enrobé.

Actuellement, entre 150 000 à 200 000 tonnes de bardeaux d'asphalte postconsommation sont enfouis annuellement au Québec à un coût variant entre 25 et 30 \$ la tonne. Or, ce déchet en est un de qualité puisqu'il est composé d'une fraction importante de liant bitumineux (25 à 30%) en plus d'être constitué d'autres matériaux entrant dans la formulation de l'enrobé bitumineux. Il est clair que le recyclage de ces bardeaux dans la confection d'enrobés bitumineux est une option prometteuse.

RECYC-QUÉBEC et le groupe 3R MCDQ nous ont mandaté de mettre en relief les perspectives d'incorporer des particules de bardeaux de postconsommation dans la confection d'enrobés bitumineux à des usages autres que celui actuellement retenu pour les bardeaux de postfabrication dans la structure de chaussées souples soumises à de forts trafics. Le mandat a pour but de mettre en relief les voies à suivre et de cerner les performances spécifiques à atteindre (INPUT) dans le cadre du développement de la formulation d'enrobés conçus pour d'autres applications. Également, le rapport vise à formuler les grandes lignes d'un programme de recherche concret devant mener au développement d'enrobés bitumineux contenant des particules de bardeaux de postconsommation.

De manière à bien cerner les applications potentielles, les dosages cibles et les performances à atteindre, il a été proposé de faire une revue exhaustive de la documentation disponible à ce jour sur le sujet. Les objectifs ciblés dans le cadre de cette revue de la documentation sont :

- 1) Cibler les applications potentielles
- 2) Cerner les performances cibles à atteindre (INPUT) pour les enrobés à développer pour chacun des usages ciblés;
- 3) Cerner les dosages types et les caractéristiques cibles des particules de bardeaux à recycler

1. Applications potentielles

Au Québec, au cours des dernières années, certaines entreprises ont acquis une expérience dans le domaine de la récupération de bardeaux d'asphalte et de l'utilisation de ces bardeaux recyclés.

Certaines de ces entreprises ont développé des produits et/ou des procédés utilisant des bardeaux de postfabrication ou de postconsommation [1]. L'utilisation de bardeaux de postconsommation présente un potentiel indéniable pour certaines applications. Les applications suivantes ont été réalisées par des entreprises québécoises [1] :

- Incorporation de particules de bardeaux à de la pierre 0 - 20 mm pour la construction de chemins de parc ou de terre;
- Incorporation aux enrobés de rapiéçage à froid : «*cold patch*»;
- Procédé permettant de séparer les composantes du bardeau pour les réutiliser comme matière première pour la fabrication d'autres matériaux neufs;
- Incorporation, aux enrobés bitumineux pour la construction de routes.

Certaines de ces applications semblaient prometteuses, tandis que d'autres n'ont pas été assez rentables pour continuer à être développées [1]. Il est donc nécessaire de développer une application qui répondra à cette problématique et qui suscitera l'intérêt des acteurs importants.

2. Application ciblée : mandat du LUCREB

L'utilisation de bardeaux de postconsommation dans les enrobés de rapiéçage à froid (*cold patch*) ou dans les enrobés à chaud, pour la construction de pistes cyclables ou de stationnements, sont des applications tout à fait réalistes. Par contre, le volume d'enrobés annuellement produit pour ces applications ne permet pas le recyclage d'une proportion déterminante de bardeaux d'asphalte de postconsommation annuellement enfouis dans les sites de matières sèches. Dans le but d'incorporer le plus grand volume possible de bardeaux, l'application la plus pertinente est certainement leur incorporation dans les enrobés bitumineux couramment utilisés dans les chaussées souples. Plus précisément, la famille d'enrobés utilisée pour les routes rurales et régionales, gérées par les villes ou municipalités, présente un intérêt marqué puisque ces routes représentent plus de 72 pour cent des routes au Québec. À ce titre, l'enrobé correspondant le mieux à ce type de construction et qui est également le plus polyvalent est très certainement l'enrobé bitumineux EB14. En effet, cet enrobé à chaud peut servir aussi bien de couche de surface ou encore de couche de base. D'autre part, ce type d'enrobé est formulé suivant le principe de la méthode Marshall, laquelle est couramment utilisée et parfaitement maîtrisée sur l'ensemble du territoire québécois : la plupart des villes, entreprises et laboratoires sont équipées pour formuler des enrobés selon cette méthode.

Si l'incorporation de bardeaux de postconsommation dans l'enrobé EB14 prend son envol, la rentabilité de la transformation du bardeau de postconsommation suivra et il pourra être offert à moindre coût pour les applications qui en exigent moins (d'autres types d'enrobés utilisés au Québec).

Dans ce rapport, nous proposons de cerner les spécifications à rencontrer pour la confection de l'enrobé EB14 et d'évaluer à partir d'un programme d'essais exploratoires l'incidence d'incorporer des particules de bardeaux de postconsommation sur ses performances mécaniques. Les enrobés qui seront confectionnés en laboratoire seront alors désignés **EB14-BXY** (**Y**, correspondant au pourcentage de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation incorporé dans l'enrobé EB14 et exprimé en référence à la masse totale du mélange).

Bien que le fait de cibler une application particulière représente un premier pas dans le processus de l'étude de l'incorporation de particules de bardeaux de postconsommation au sein des enrobés

bitumineux, il demeure impératif d'apporter des arguments qui vont rallier les donneurs d'ouvrage à cette action de recyclage. Pour ce faire, il nous apparaît comme étant crucial de montrer non seulement le bien fondé de cette action mais de surcroît de mettre en relief les «*plus values*» le cas échéant. Dans ce contexte, il est important de cerner les propriétés à «atteindre» pour l'enrobé incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation. Outre les aspects liés à la production proprement dite quant aux enrobés incorporant des particules de bardeaux recyclés, le donneur d'ouvrage fonde son appréciation d'un matériau bitumineux à partir de deux niveaux de performance : 1) L'aspect structural et 2) L'aspect durabilité.

Pour une application dans les chaussées souples au Québec, l'aspect structural est défini essentiellement par l'évolution de la rigidité de l'enrobé, tel que défini par le module résilient (module réversible) évalué suivant diverses conditions de sollicitation (températures et fréquences). D'autre part, l'aspect de durabilité s'apparente à des performances attendues, telles que les résistances à l'orniérage, aux basses températures, à l'arrachement, au désenrobage, à la stabilité à l'eau, etc.

L'ensemble de ces performances vont permettre une appréciation rigoureuse du matériau bitumineux. C'est donc sur la base des performances actuelles attendues (performances requises) pour les enrobés couramment utilisés sur les chaussées souples au Québec que l'on doit porter une appréciation relative pour le cas d'un enrobé bitumineux incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation.

2.1 Performances requises pour l'application ciblée : les «*INPUT*» à atteindre

À la formulation d'un enrobé EB14, on doit s'assurer d'atteindre certaines performances : les performances requises – les «*INPUT*». Ces performances nous donnent une bonne idée du comportement que le matériau aura dans la chaussée. Cette appréciation se fonde sur des corrélations établies entre les résultats d'essais de laboratoire de nature empirique, obtenus sur des éprouvettes compactées dans des conditions standardisées, et le comportement observé dans la chaussée [13]. Il est donc important de chercher à obtenir les mêmes caractéristiques pour l'enrobé EB14-BXY que celles établies pour l'enrobé EB14.

Les performances attendues sont gérées à la fois par des exigences liées à la formation de l'enrobé (*Mix Design*) et par des résultats mesurables sur des éprouvettes réalisées dans des conditions de mise en œuvre contrôlées en laboratoire. Au niveau municipal, les exigences de formulation sont très souvent référencées aux critères établis par le MTQ, lesquels sont synthétisés dans la Normes – Ouvrages routiers, Tome VII : Matériaux (chap 4 – 4201) . Certains de ces critères sont d'ordre physique et d'autres d'ordre mécanique. Les caractéristiques physiques nous servent à prédire une partie du comportement mécanique de l'enrobé alors que les caractéristiques d'ordre mécanique, mesurable en laboratoire, donnent une bonne idée du comportement que l'enrobé aura une fois mis en place dans la chaussée souple.

2.1.1 Caractéristiques physiques à atteindre

L'enrobé EB14 doit premièrement respecter un nombre de classes granulaires minimal, une granulométrie déterminée, un pourcentage minimal de liants et des performances cibles évaluées sur des briquettes confectionnées en laboratoire suivant la méthode Marshall : une teneur en vides,

une compacité minimale et un volume de vides inter-granulaire maximal (VAM). Le Tableau 2.1 présente les spécifications physiques requises pour l'enrobé EB14 suivant les exigences du ministère des Transports du Québec (MTQ).

2.1.2 Caractéristiques mécaniques à atteindre

Les caractéristiques mécaniques que doit présenter l'enrobé EB14 sont de deux ordres : 1) des performances empiriques associées à la méthode de formulation Marshall (stabilité et fluage) et 2) des performances de simulation (essai à l'ornièreur, module résilient et tenue à l'eau). Notons que le module résilient n'est pas à proprement dit spécifié par une norme. Toutefois, comme nous l'avons souligné précédemment, cette caractéristique de l'enrobé est fort importante puisqu'elle est essentielle au dimensionnement des chaussées souples. Le module résilient joue un rôle important en ce qui a trait aux épaisseurs des différentes couches bitumineuses de la structure de la chaussée souple. Soulignons également que le logiciel «Chaussée» développé par les responsables de la conception des chaussées souples au MTQ intègre une fourchette de valeurs du module résilient d'un enrobé EB14. Le Tableau 2.1 donne la synthèse des limites cibles (INPUT) attendues dans le cas où l'on confectionne un enrobé bitumineux de type EB14.

Pour répondre à ces exigences, le dosage en particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation que l'on souhaite incorporer dans un enrobé EB14 doit être judicieusement établi. Une revue de la littérature concernant l'utilisation de bardeaux de postconsommation dans les enrobés bitumineux a donc été menée afin de connaître les composantes des bardeaux et les caractéristiques et le dosage de ces composantes. Une fois les composantes du bardeau connues, il est important de connaître les méthodes d'incorporation évaluées aux cours des différentes recherches. Il faut cerner la prise en compte des composantes du bardeau dans les mélanges, les méthodes de formulations utilisées et l'importance de la taille des particules. Il faut également connaître les différents taux optimums de bardeaux dans les mélanges. Il sera aussi nécessaire de déterminer le comportement des enrobés avec bardeaux lors des essais de laboratoire.

Tableau 2.1 Caractéristique cible (INPUT) pour l'enrobé à chaud EB14 formulé selon le principe de la méthode Marshall

INPUT EB14		
Nombre minimal de classes granulaires à utiliser		3
Granulométrie	Tamis (mm)	% Passant
	28	100
	20	100
	14	95-100
	10	75-90
	5	50-65
	2,5	29-47
	1,25	20-40
	0,63	14-34
	0,315	10-26
	0,16	5-17
	0,08	3,0-8,0
liant (% min.)		4,70
Fluage (mm)		2,0 -4,0
Stabilité (N)		>9000
Vides (%)		2,0 -5,0
VAM comblé (% max.)		85,0
Compacité (% min.)		92
Résistance à l'orniérage sur plaques de 100 mm; 60 °C; 30 000 cycles (% max. de déformation)		10
Teneur à l'eau (% min.)		70
Module résilient (module réversible) selon le logiciel "Chaussée" du MTQ (MPa)		1000 -7000

3. Revue de la littérature sur l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux

À ce jour, plusieurs recherches ont été faites pour tenter d'utiliser les rebus d'asphalte de postfabrication et/ou de postconsommation dans les enrobés bitumineux. Par contre, la plupart des études portent sur les bardeaux de postfabrication, c'est-à-dire les retailles ou les bardeaux qui ne correspondent pas aux normes de qualité fixées par les fabricants de bardeaux lors de la production. Les études sur l'incorporation de bardeaux de postconsommation étant beaucoup plus rares, la revue de la littérature qui suit comprend certaines études faites sur les bardeaux de postfabrication. La revue de la littérature vise à bien comprendre comment l'application ciblée peut être réalisée. Elle a été orientée sur l'analyse des différentes composantes du bardeau de postconsommation, la nature de ces composantes et leurs caractéristiques. Les différents procédés d'incorporation de bardeaux dans les enrobés bitumineux et les méthodes de formulation ont également été cernés.

3.1 Composition de l'ensemble des matériaux des toitures récupérés

Les différents matériaux récupérés lors de rénovations de toitures sont présentés au Tableau 3.1. Certains matériaux sont beaucoup moins présents sur les résidus des toitures résidentielles que sur ceux des toitures commerciales. Sur les toitures commerciales, plus de bois, de sous-couches de papier de goudron et de pièces de finition de métal sont présents. Il est important de souligner que la présence de sous-couches de feutre (produit imbibé d'hydro-carbures) n'est pas proprement dit problématique. L'élément majeur demeure l'homogénéité des résidus de manière à obtenir un enrobé ayant des performances stables. Du fait que la rénovation de toitures résidentielles

représente près de 90% des rénovations de toitures, plusieurs chercheurs [2 - 5] ont concentré leurs études sur les résidus de toitures résidentielles.

Tableau 3.1 Composition des matériaux de toitures généralement récupérés [5]

Composition (% par poids)	Résidentielles	Commerciales
Bardeaux d'asphalte	96	89
Finition de métal	0,14	2,5
Clous	0,5	3,4
Bande de plastique	0,06	0,35
Sous couche de feutre	3,3	4,75
Total	100	100

3.2 Spécification de fabrication des bardeaux d'asphalte

Essentiellement deux types de bardeaux sont fabriqués aux États-Unis et au Canada. Ces deux types de bardeaux doivent suivre des normes de conception. Les bardeaux construits avec des fibres organiques doivent répondre à la norme ASTM D225-86 et les bardeaux construits avec des fibres de verre à la norme ASTM D3462-87. Le Tableau 3.2 présente les spécifications pour la fabrication de ces deux types de bardeaux [1]. Il est à noter que les caractéristiques des composantes des bardeaux de postconsommation peuvent différer de ces spécifications, à cause, notamment, du vieillissement des matériaux bitumineux et de la perte des particules aux intempéries.

Tableau 3.2 Spécifications liées à la fabrication des bardeaux d'asphalte [1]

Propriétés	Bardeaux avec Fibres organiques ASTM D-225-86	Bardeaux avec Fibres de verre ASTM D-3462-82
Pénétration du bitume 0,1mm	<i>Non spécifié</i>	15 minimum
Température Billes Anneaux (TBA), °C	<i>Non spécifié</i>	130 maximum 88 minimum
Masse moyenne minimum par unité de surface, lb/100ft ²	95,0	70,0
Masse moyenne minimum par unité de surface de matière minérale passant le tamis No 6 et retenu sur le No70, lb/100ft ²	18,5	25
Pourcentage de la masse maximale de matière minérale passant le tamis No. 70 et retenue sur le No.200, basés sur la matière minérale totale passant le No.70	70,0	70,0

3.3 Composition du bardeau de postconsommation

Selon les différents ouvrages [1,4,8], la composition des bardeaux récupérés à la fin de leur vie utile est très semblable. Les quantités exactes des composantes retrouvées peuvent varier selon les

fabricants de bardeaux [1]. À notre grand étonnement, nous avons appris qu'il existe actuellement aux Etats-Unis des fournisseurs de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation. Deux principaux fournisseurs ont été identifiés : BTM A.S. et Reclaim inc. En vue de vérifier les proportions des différents constituants et d'en évaluer la stabilité, les produits de ces fournisseurs ont été analysés par différents chercheurs [1, 4 et 8]. Le Tableau 3.3 présente les résultats de ces analyses. Les résultats montrent que les composantes des différents produits de bardeaux de postconsommation sont à toutes fins pratiques comparables.

On peut donc admettre qu'il est tout à fait réaliste d'avoir un produit de recyclage commercial de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation relativement homogène, exempt de détritiques et ce, dans une perspective de marché à grande échelle.

3.3.1 Propriétés des bitumes extraits des bardeaux de postconsommation

Un élément important auquel on fait souvent référence dans la perplexité liée à l'incorporation des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés, demeure l'altération potentiel du bitume des bardeaux exposés aux intempéries en service. Les composantes bitumineuses des bardeaux recyclés sont habituellement de deux types. Le bitume de surface et le bitume de saturation. Ces deux types de bitume jouent un rôle très différent. Le bitume de surface est en premier lieu un imperméabilisant et permet également aux granulats de bien adhérer aux feuilles de bardeaux. Le bitume de saturation est plutôt un traitement subi par les fibres de renforcement [1].

Tableau 3.3 Proportion des composantes retrouvées dans les bardeaux postconsommation de différentes études [1][4][8]

Composition (% de la masse total)	Résultats obtenus	Spécification du fournisseur	Résultats obtenus	Résultats obtenus	Composantes des bardeaux Neufs
Résultats présentés par :	SENGOZ et al [4]	Grzybowski [8]		NEWCOMB, et coll. [1]	BAAJ et coll. [39]
Fournisseur des bardeaux récupérés et transformés	BTM A.S. [4]	Spécification de ReClaim inc. ReACT's HMATM [8]	Valeur mesuré par Grzybowski [8]	<i>Non spécifié</i>	<i>Non spécifié</i>
Bitume	32,5 %	30-40 %	30,7 %	25-35 %	25-30
Fibres de verre	2,5 %	5-8 %	6,8 %	5-15 %	10-15
Filler	30 %	50-65 %	62,5 %	60-70 %	25-30
Granulat	35 %				30-35

PAULSEN et coll. [9] ont effectué des essais d'extraction et de récupération de bitume de bardeaux de postconsommation pour connaître la teneur en bitume et évaluer leurs caractéristiques physiques. Ils ont procédé à l'extraction par centrifugation selon la méthode normalisée par *Abson Recovery* (ASTM 2172). La couleur foncée des granulats, suite à l'extraction du bitume tend à montrer qu'il n'y a pas d'extraction complète du bitume dans le cas des particules de bardeaux. Sengoz et coll. [4] estiment que l'extraction de bitume sans modifier ses propriétés n'est pas possible en utilisant les techniques conventionnelles. La présence de fibres et de bitume, beaucoup plus dure, demanderait un temps de trempage plus long dans le solvant. PAULSEN et coll. [9] soulignent qu'il devient impératif de définir une méthode plus convenable pour extraire et récupérer le bitume des bardeaux pour faciliter les comparaisons et l'analyse.

Après extraction, on peut séparer le solvant du bitume récupéré suivant deux méthodes : 1) séparation par distillation en pressions négatives (distillation) et, 2) évaporation à l'aide d'une plaque chauffante (évaporation) [9]. Selon la méthode utilisée, les résultats sont considérablement différents. Entre autres, la quantité de bitume mesurée suite à la méthode par évaporation est inférieure d'environ 10 % à celle établie par la méthode de distillation. Ce résultat montre que

l'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes, ou l'utilisation de différents solvants, peut faire varier considérablement les résultats aussi bien en ce qui a trait au pourcentage des constituants que vis-à-vis des propriétés physiques des bitumes obtenus par extraction [38].

GRZYBOWSKI [8] a analysé des extraits du bitume de bardeaux de postconsommation en utilisant un extracteur avec solvant. Il a séparé le bitume du solvant en utilisant une méthode d'évaporation à l'aide d'une centrifugeuse, sans toutefois spécifier les normes suivies. Le Tableau 3.4 présente les résultats de ces essais effectués sur des bitumes extraits de bardeaux de postconsommation fournis par ReACT's HMA [8].

Tableau 3.4 Essais effectués sur le bitume récupéré de bardeaux de postconsommation fournis par ReACT's HMA[8]

Essai effectué	Résultat	Norme
TBA	75.7°C	ASTM D 36
Indice de pénétrabilité à 4°C	5.0	ASTM D 5
Indice de pénétrabilité à 25°C	37	ASTM D 5
Viscosité à 60°C	682.4 Pa s	ASTM D 2171
Viscosité cinématique à 135°C	728 cSt	ASTM D 2170

ALI et al [5] ont extrait le bitume de bardeaux de postconsommation en utilisant la méthode *Abson Recovery*, ASTM 2172. Ils ont ensuite séparé le bitume du solvant selon la norme ASTM D 1856, soit par distillation. Les résultats de ces essais sont présentés au Tableau 3.5. Les résultats montrent que la viscosité cinématique du bitume récupéré des bardeaux est beaucoup plus grande que celle correspondante à un bitume habituellement utilisé dans un enrobé bitumineux [5]. Bien évidemment, le grade d'un bitume pour bardeau (estimé à un PG 100 selon [39]) est très différent de celui d'un bitume pour les enrobés (PG58 à PG70), ce qui se traduit inévitablement sur la viscosité du bitume. Toutefois, l'oxydation du bitume tout au long de la durée de vie d'un bardeau, et possiblement la procédure d'extraction [5,38], altèrent également la viscosité du bitume.

Tableau 3.5 Caractéristiques d'un bitume de bardeaux de postconsommation [5]

Essai effectué	Résultat	Norme
Essais de pénétration à 25°C	17.0 dmm	ASTM D 5
Viscosité cinématique à 135°C	54,000 cSt	ASTM D 2170
Densité	1.000	ASTM D-3124

Quoiqu'il en soit, un des éléments mitigieux quant à l'incorporation de particules de bardeaux dans l'enrobé demeure la différence entre les grades de bitume. C'est particulièrement au terme de la résistance aux basses températures que l'on s'interroge quant à l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation.

Baaj et coll. [39] ont étudié en détail la performance à basse température d'enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication. L'essai de retrait thermique empêché (TSRST) a été retenu dans le cadre de leur étude. Le programme d'essais a été réalisé sur des

enrobés de type EB-10S confectionnés à partir d'un bitume de grade PG64-34. La Figure 3.1 présente la synthèse des températures de rupture évaluées au TSRST pour les enrobés testés et contenant différents dosages de particules de bardeaux de postfabrication (2, 4 6 et 8%). Deux éléments de conclusion sont particulièrement intéressants de cette étude : 1) l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication dans l'enrobé n'a pas d'effet jugé significatif quant à la température de rupture et donne lieu à des enrobés de performance comparable à celle de l'enrobé de référence et, 2) les particules de bardeaux jouent un rôle actif et participent favorablement au comportement de l'enrobé à basse température.

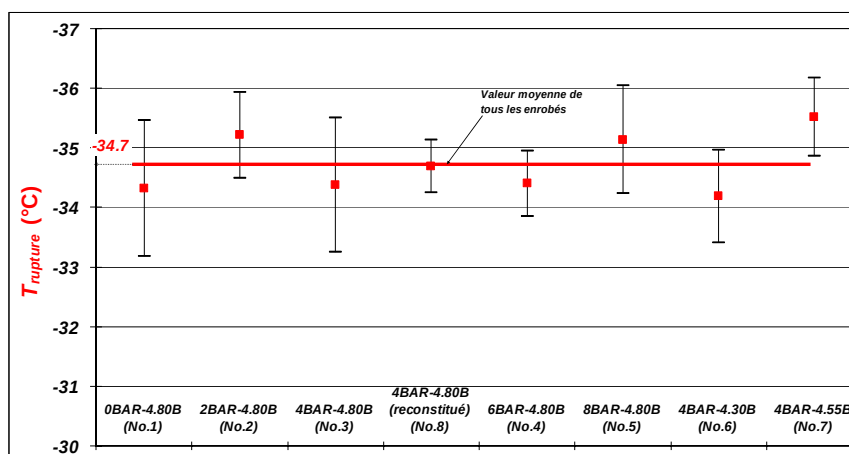


Figure 3.1 Valeurs moyennes et écarts types de la température à la rupture des différents enrobés testés.

3.3.2 Propriétés des granulats extraits des bardeaux de postconsommation

La plus grande proportion, en poids, des composantes d'un bardeau d'asphalte sont de nature minérale. Des particules de céramique, des particules de superposition de tête, du sable de surface arrière et du stabilisateur de bitume sont utilisés pour la fabrication des bardeaux. Les particules de céramique sont en fait des roches concassées recouvertes de céramique d'oxyde de métal. Ce sont les particules les plus importantes au terme de la performance des bardeaux. Les particules de superposition de tête sont les particules situées sur la tête des bardeaux, laquelle correspond à la section de chevauchement entre les bardeaux des lignes adjacentes sur la toiture. Ils proviennent en grande partie de scories de charbon concassé, et leur grosseur est semblable à celle des particules recouvertes de céramique. Le sable de surface arrière représente la plus petite portion de granulats. Ce sable, un sable naturel lavé, est ajouté en petites quantités pour empêcher les bardeaux de coller ensemble à l'emballage. Le stabilisateur de bitume est une poudre de calcaire [1]. La Figure 3.2 présente l'emplacement des différentes particules que l'on retrouve sur une feuille de bardeau.

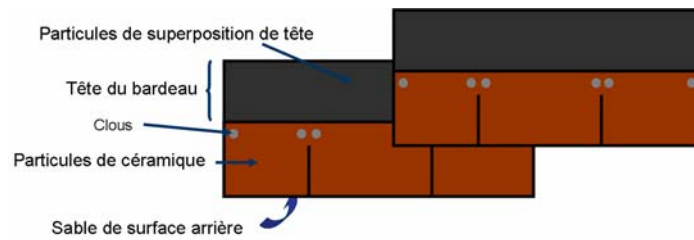


Figure 3.2 Emplacement des différentes particules sur une feuille de bardeau

Après avoir séparé les différents constituants du bardeau, NEWCOMB et coll. [1] ont analysé les particules récupérées. Le Tableau 3.6 présente les différentes proportions de ces particules. GRZYBOWSKI [8] a déterminé que la nature des granulats utilisés pour la fabrication des feuilles de bardeaux était un mélange de calcaire concassé.

Tableau 3.6: Composantes granulaires retrouvées dans les bardeaux postconsommation selon NEWCOMB, et coll. [1]

Composant	Quantité en proportion de la masse totale du bardeau	Dimmension des granulats
Granulat de céramiques	10-20%	Passant 1,70 mm Retenu 425 μ m
Granulat de superposition de têtes	15-25%	Passant 1,70 mm Retenu 425 μ m
Sable de surface arrière	5-10%	Passant le 425 μ m Retenu 106 μ m
Stabilisateur	70%-90%	Passant 150 μ m retenu 75 μ m

SENGOZ et coll.[4] ont cherché à connaître la granulométrie des granulats utilisés de manière à permettre leur intégration dans l'enrobé. Le Tableau 3.7 présente les résultats de l'essai de granulométrie. Également, ALI et coll. [5] ont déterminé la granulométrie des différents constituants de bardeaux de postconsommation après extraction (Figure 3.3). Ils ont déterminé que suite à l'extraction du bitume des bardeaux, la taille des particules était réduite d'environ une grosseur de tamis(Figure 3.4). Il demeure donc important de déterminer la granularité des particules récupérées des particules de bardeaux plutôt que de se référer à la composition d'origine servant à la confection des bardeaux neufs.

Tableau 3.7 Composantes granulaires retrouvées dans les bardeaux de postconsommation [8]

Dimension des granulats	Pourcentage passant
0,850mm / No.20	100%
0,212mm / No.70	39%
0,075mm / No.200	18 %

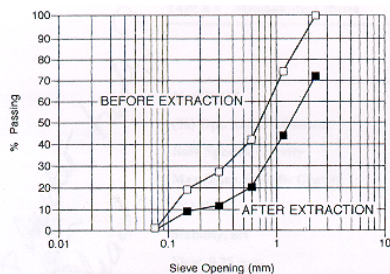


Figure 3.3: Courbe granulométrique avant et après extraction [5]

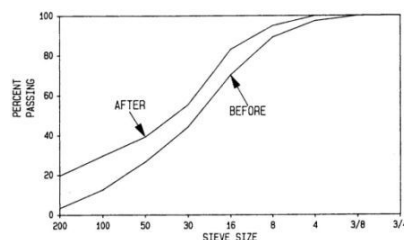


Figure 3.4: Courbe granulométrique avant et après extraction [9]

3.3.3 Les fibres de renfort contenues dans le bardeau

Les fibres de renfort dans les bardeaux d'asphalte constituent une part importante du bardeau de postconsommation (2,5-15% : Tableau 3.3). Or, la présence de fibres peut s'avérer un élément favorable quant à la performance de l'enrobé en permettant d'améliorer leur durabilité. Il est donc important d'en connaître la nature. Ces fibres sont généralement des fibres de cellulose, mais elles peuvent également être des fibres synthétiques (polyester ou polypropylène) ou d'amiante. PELTONEN [32] a évalué l'influence de différents types de fibres vis-à-vis de leur interaction avec le bitume. Le paramètre étudié fut la surface spécifique des différents types de fibres qui donne une indication quant à leur potentiel d'absorption de bitume. Les fibres de cellulose présentent la plus grande absorption, suivies des fibres de verre, des fibres de polyesters et des fibres minérales. Cette absorption peut jouer sur la teneur optimale en bitume dans l'enrobé. En conséquence, il peut s'avérer important d'en tenir compte lors de la formulation de l'enrobé incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation. Quoiqu'il en soit, il est important de souligner que les propriétés des fibres contenues dans les bardeaux d'asphalte ne changent pas beaucoup dans le temps et ne sont pas affectées par l'usure du bardeau [8].

Les bardeaux sont donc constitués en partie de granulats dont la qualité et les propriétés sont tout à fait acceptables et comparables à ceux que l'on utilise dans la confection des enrobés bitumineux. Étant donné que la performance et la durabilité de l'enrobé est étroitement liée à sa composition, il s'avère important de considérer l'apport granulaire des particules de bardeaux à l'enrobé de manière à ajuster la granularité des constituants vierges de petites tailles de l'enrobé lorsqu'on souhaite lui incorporer des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation.

3.4 Transformation des bardeaux postconsommation

La transformation des bardeaux récupérés est une étape importante du travail de recyclage. L'impact qu'elle aura sur les performances et la durabilité de l'enrobé et sur le coût du produit est déterminante. Pour obtenir un matériau prêt à l'utilisation pour les enrobés bitumineux, deux principales étapes doivent être effectuées à partir de l'ensemble des matériaux de toitures récupérés : 1) enlèvement des matériaux nuisibles et, 2) déchiquetage.

3.4.1 Enlèvement des matériaux nuisibles

La présence de matières nuisibles dans les résidus de bardeaux de postconsommation est relativement faible (Tableau 3.1). Les matériaux nuisibles au bon rendement de l'enrobé doivent être retirés. Bien que la séparation des composantes d'une toiture après son enlèvement n'est pas un

sujet abondamment discuté dans la littérature, il semble que la séparation des composantes non désirables du reste des bardeaux est plus facile à faire une fois les bardeaux déchiquetés. Les métaux peuvent être enlevés par l'action d'un champ magnétique alors que l'aluminium peut-être extrait par l'action d'un courant de Foucault. Pour les composantes non métalliques comme le papier fibres ou le bois, la séparation peut être effectuée par flottation.

Bien que l'étape qui consiste à enlever les matériaux nuisibles des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation demeure incontournable, elle ne représente en rien un obstacle quant au potentiel de recyclage des bardeaux de postconsommation.

3.4.2 Déchiquetage des bardeaux

Pour une application des bardeaux recyclés dans la confection d'enrobés bitumineux, il s'avère nécessaire de les déchiqueter. Il est important de s'assurer que la dimension des bardeaux déchiquetés correspond à l'utilisation visée et ce, tout en étant économiquement viable. À cet effet, plusieurs recherches ont été menées en vue de mettre en relief l'importance de la taille des particules de bardeaux. Des essais ont montré que les morceaux de bardeaux, une fois déchiquetés, ne doivent pas dépasser une dimension de 13 mm pour permettre une bonne incorporation dans l'enrobé et obtenir un enrobé de qualité [7]. Si les morceaux de bardeaux, une fois déchiquetés, sont d'une dimension plus grosse que 13 mm, ils se dispersent moins bien dans le mélange et ils agiront essentiellement à la façon d'un granulat [8]. Pour contrôler la dimension des particules de bardeaux, il est donc nécessaire de procéder au tamisage des bardeaux déchiquetés.

Il nous apparaît important de souligner que la machinerie utilisée pour le déchiquetage des bardeaux est simple et facile à se procurer. Notamment, on se réfère souvent au procédé de broyage à sec à l'aide d'un broyeur à boulets d'acier (*Ball mill*) que l'on peut retrouver dans les équipements de carrières.

Pendant le déchiquetage, la température des bardeaux peut augmenter ce qui fait que les particules de bardeaux ont tendance à s'agglomérer. Pour garder la température basse et empêcher ce phénomène il est possible de les arroser pendant le déchiquetage. Par contre, les particules doivent être par la suite séchées avant d'être incorporées à l'enrobé à chaud [3]. ALI et coll. [5] soulignent qu'il serait préférable de broyer les bardeaux à une température inférieure à -10 C pour empêcher toute agglomération des particules suite au broyage. Au Québec, il est simple de prévoir le broyage des bardeaux en saison hivernale afin de pallier à ce type de problème.

Par ailleurs, l'empilement des stocks de particules de bardeaux après déchiquetage risque d'engendrer des problèmes d'agglomération de particules. Lors de leur incorporation dans l'enrobé, on souligne qu'il peut s'avérer nécessaire de tamiser, et même dans certains cas de les déchiqueter à nouveau. de manière à ne pas utiliser des particules plus grosses que la dimension désirée [3]. Ce dernier point nécessite une investigation plus soutenue. En effet, il faut impérativement éviter de telles actions et, pour ce faire, on devrait travailler à valider un protocole de stockage approprié.

3.5 Mode d'incorporation des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux à chaud

ALI et coll. [5] ont essayé d'incorporer à température ambiante des particules de bardeaux à même les granulats avant qu'ils ne soient chauffés pour la confection d'un enrobé bitumineux à chaud. Ce

mode d'incorporation n'a pas été retenu, car une fois les bardeaux chauffés avec les granulats, le mélange s'agglomère et devient très difficile à malaxer.

GRZYBOWSKI [8] présente deux façons d'incorporer les particules de bardeaux à l'enrobé. Ces deux différentes techniques sont appelées, "*additive method*" et "*modifier method*". La première méthode consiste à ajouter les particules de bardeaux aux granulats préalablement chauffés et ensuite à ajouter le bitume vierge. La seconde méthode, pour des quantités de bardeaux plus petites, consiste à mélanger les particules de bardeaux broyés finement au bitume. Selon lui, cette dernière est préférable, mais elle exige des équipements de malaxage de bitume spécialisés. Le mode d'incorporation le plus utilisé, et qui ne semble pas causer de problème, consiste à faire chauffer les granulats à leur température maximale et ensuite d'incorporer les particules de bardeaux à température ambiante directement pendant le malaxage. Une fois les particules de bardeaux recyclés incorporées à la masse granulaire, le bitume vierge peut alors être ajouté [5].

3.6 Méthodes de formulation utilisées pour les enrobés contenant des particules de bardeaux de postconsommation et les enrobés de contrôle

NEWCOMB et coll. [1] formulent les enrobés incorporant des particules de bardeaux recyclés suivant la méthode de formulation Marshall. Dans la formulation, de manière à respecter la granulométrie optimale de la masse granulaire de l'enrobé, ils modifient l'apport en granulats vierges de petites dimensions, due à l'apport en granulats des particules de bardeaux. Ils modifient également les quantités de bitume vierge dans le mélange en fonction de l'apport en bitume des bardeaux recyclés.

NEWCOMB et coll. [1] ont étudié la performance d'enrobés contenant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation. L'ajout optimal de bitume fut calculé à partir de la méthode Marshall en se basant sur un volume d'air désiré de 4 %. Les particules de bardeaux sont incorporées au mélange une fois les granulats bien enrobés par le bitume vierge, après quoi, un malaxage additionnel de 30 à 60 secondes est effectué. Des briquettes ont alors été compactées suivant la méthode Marshall (75 coups de chaque côté). Les Figures 3.5 à 3.8 inclusivement, montrent l'influence de la quantité de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisés dans les enrobés bitumineux sur divers paramètres en suivant le principe de la formulation Marshall.

On constate que les enrobés comprenant des proportions importantes de particules de bardeaux semblent plus facile à compacter pour un bitume de pénétration 85/100, alors qu'il y a un dosage optimal pour le bitume de pénétration 120/150. Également, la stabilité Marshall, évolue distinctement suivant le type de bitume utilisé. Quoi qu'il en soit, l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation a pour effet d'accroître la stabilité Marshall de l'enrobé de référence. Il est important de rappeler ici que le dosage en bitume vierge de ces enrobés est réduit en proportion du dosage en bardeaux incorporés dans l'enrobé, dépendamment du type de bitume vierge ajouté au mélange.

SENGOZ et coll. [4] ont également procédé à la formulation de leurs enrobés à partir de la méthode Marshall. Compte tenu des matières premières retenues pour leur étude, SENGOZ et coll. [4] ont établi, sur briquettes, que le dosage de bitume optimal requis devait être de 5% (masse de bitume exprimée en référence à la masse de granulats) pour une teneur en vides cible de 4 %. À partir de

briquettes de contrôle et de briquettes contenant 6 différents dosages de bardeaux de postconsommation recyclés, ils ont évalué les différences de performance. Le Tableau 3.8 présente la masse des différentes composantes utilisées pour la confection des enrobés. On constate que le dosage en bitume vierge est maintenu constant dans tous les mélanges.

Tableau 3.8 Masse des matériaux utilisés pour la confection des différents enrobés [4]

	No Shingle	1% Shingle	2% Shingle	3% Shingle	4% Shingle	5% Shingle
Aggregate (gr)	1150	1137.925	1128.85	1113.775	1101.7	1089.625
Binder (gr) (5% of mixture weight)	57.5	57.5	57.5	57.5	57.5	57.5
Shingle (gr)	–	12.075	24.15	36.225	48.3	60.375
Mixture (gr)	1207.5	1207.5	1207.5	1207.5	1207.5	1207.5
Binder tolerance ($\pm 3\%$)	–	0.05%	0.09%	0.16%	0.22%	0.26%

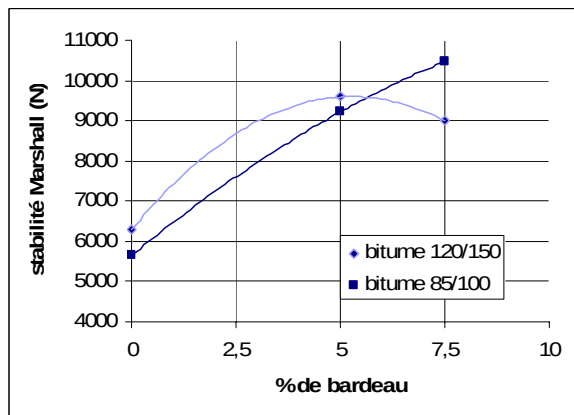


Figure 3.5: Stabilité Marshall en fonction du pourcentage de particules de bardeaux dans l'enrobé pour deux types de bitume vierge (dosage en bitume vierge réduit en proportion du dosage en bardeaux).[1]

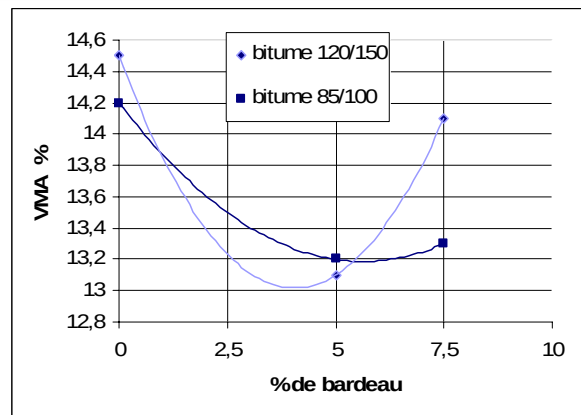


Figure 3.6: Pourcentage des vides inter-granulaire en fonction du pourcentage de bardeaux pour deux types de bitume vierge (dosage en bitume vierge réduit en proportion du dosage en bardeaux). [1]

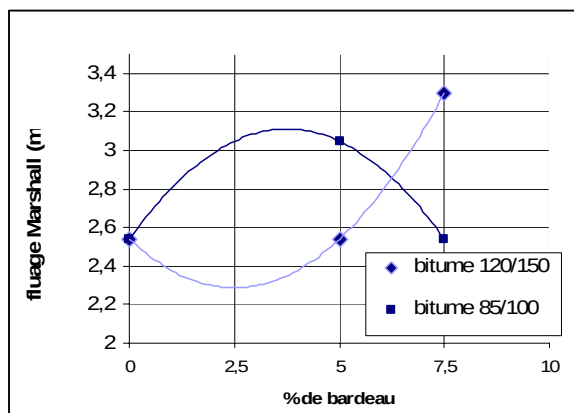


Figure 3.7: Fluage Marshall en fonction du pourcentage de particules de bardeaux dans l'enrobé pour deux types de bitume vierge (dosage en bitume vierge réduit en proportion du dosage en bardeaux) [1]

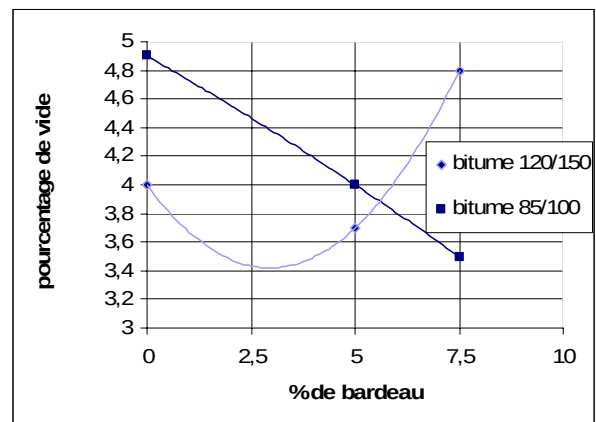


Figure 3.8: Pourcentage des vides en fonction du pourcentage de particules de bardeaux pour deux types de bitume vierge (dosage en bitume vierge réduit en proportion du dosage en bardeaux) [1]

Les résultats des essais Marshall sont présentés à la Figure 3.9. On constate que les enrobés contenant moins de 2% de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation présentent les meilleures stabilités. Ils proposent de travailler avec un dosage de 1% de particules de bardeaux dans l'enrobé. À partir de l'enrobé incorporant 1% de particules de bardeaux de postconsommation, ils ont étudié l'influence du dosage en bitume vierge dans le mélange. Ils ont diminué la quantité de bitume vierge de 4,76% à 4,30% et 3,85% (% exprimé en référence à la masse totale) tout en conservant la masse de bardeaux à 1 %. La meilleure stabilité Marshall a été obtenue avec le mélange ayant la teneur en bitume vierge la plus faible, correspondante à 4,30 % (Figure 3.10). Selon cette étude, l'utilisation de bardeaux recyclés dans les enrobés bitumineux à chaud permettrait de diminuer la teneur optimale en bitume vierge de l'enrobé [4]. Ce résultat revêt une importance de premier plan.

ALI et coll. [5] ont également utilisé la méthode de formulation Marshall pour formuler les enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation. Ils ont premièrement réalisé des briquettes de contrôle pour déterminer les composantes de l'enrobé devant incorporer des particules de bardeaux de postconsommation recyclés. Avec l'ajout de particules de bardeaux dans l'enrobé, ils ont ajouté du bitume vierge jusqu'à ce qu'ils obtiennent un enrobage complet des granulats et une consistance semblable à l'enrobé de contrôle. Ils ont incorporé différentes quantités de particules de bardeaux de postconsommation par tranche de 5 %, jusqu'à un maximum de 50 % de la masse du mélange. Les résultats des essais de stabilité et de fluage Marshall ont montré que les briquettes contenant plus de 25 % de bardeaux recyclés ne parvenaient pas à répondre aux exigences cibles. Deux dosages ont donc été retenus pour des essais complémentaires : 15 % et 25%. Pour les enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, le dosage en bitume vierge a été réduit pour prendre en compte le bitume du bardeau (Tableau 3.9). La Figure 3.11 présente les résultats de stabilité et de fluage Marshall obtenus pour ces enrobés et pour un enrobé de contrôle. Pour ces trois enrobés (0, 15 et 25% de particules de bardeaux), des essais de module résilient ont été réalisés et les résultats seront traités à la section suivante.

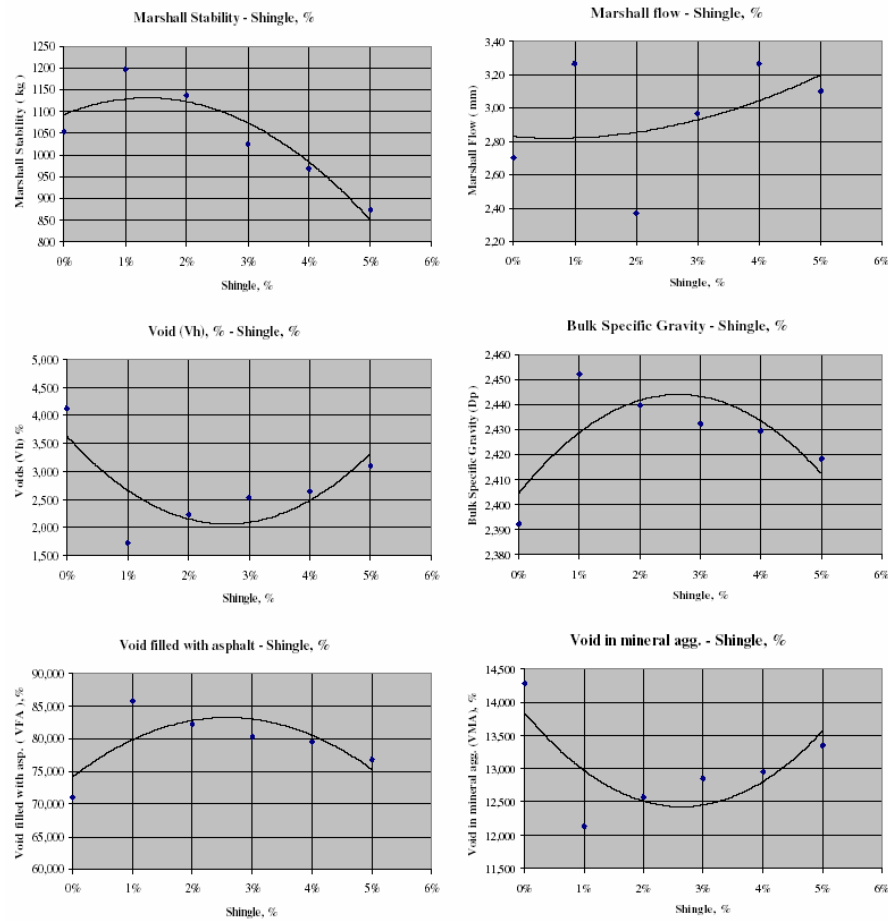


Figure 3.9 Résultats des essais de la formulation Marshall en fonction de la teneur en bardeau [4]
 (Dosage du bitume vierge constant, fixé à 4,76% - aucune réduction en proportion au dosage en particules de bardeaux)

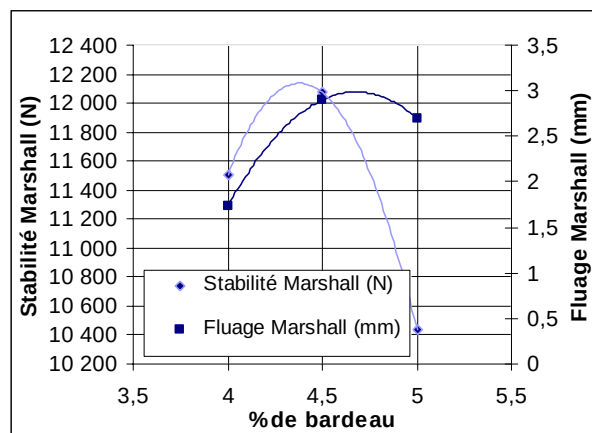


Figure 3.10 Stabilité et fluage Marshall mesurés sur des briquettes comprenant différentes quantités de bitume vierge pour 1% de bardeau recyclés [4]
 (dosage du bitume vierge réduit en proportion au dosage en particules de bardeaux)

Tableau 3.9 Caractéristiques des mélanges réalisés lors de l'étude faite par ALI, et coll. [5]

	A	B	C
Dosage en bardeaux (%)	25	15	0
bitume vierge (%)	1,85	3,40	5,25
Vides (%)	3,25	3,95	3,50
Stabilité (N)	18 000	14 000	9 300
Fluage (mm)	8,5	10,0	8,0

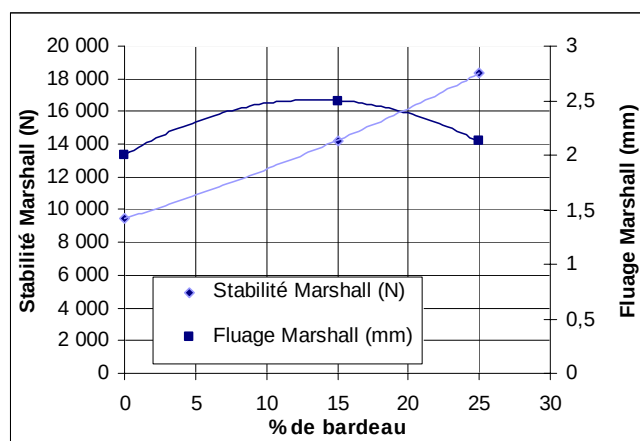


Figure 3.11 Stabilité et fluage Marshall pour différents teneurs en bardeau [5]

3.7 Essais de caractérisation et de simulation effectués sur des enrobés incorporant différents pourcentages de particules de bardeaux de postconsommation

Dans la perspective d'avoir une meilleure appréciation de la performance des enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, certains chercheurs ont effectué des essais de caractérisation (module résilient), de simulation (essais à l'orniéreur) et de prédiction par modélisation de la performance sur route (modèle VESYS IIIA).

3.7.1 Mesure du module résilient ou réversible

L'essai de mesure du module résilient est un essai américain couramment utilisé et normalisé par la norme ASTM D-4123. Le détail et la signification du module résilient est donnée à l'annexe I. NEWCOMB et coll. [2] ont procédé à des essais de module résilient sur des enrobés confectionnés à partir de deux types de bitume et incorporant différents pourcentages de particules de bardeaux de postconsommation. Pour des températures d'essai de 25 et 40°C, les résultats indiquent que les enrobés incorporant 5 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation ont des modules résilients plus élevés que ceux en incorporant 7,5 % (voir Figure 3.12). Par contre, pour une température d'essai de 0°C, le module résilient de l'enrobé à 5% est légèrement inférieur à ceux des deux autres enrobés (0% et 7,5%). La diminution du module semble aussi être affecté par le grade du bitume vierge de l'enrobé. Plus le bitume vierge est mou, plus le module résilient tend à diminuer. D'autre part, NEWCOMB et coll. [2] ont remarqué que les propriétés rhéologiques diffèrent pour des enrobés confectionnés avec des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation provenant des différentes sources d'approvisionnement. Ils proposent donc de

bien tester les enrobés comprenant des matériaux de diverses sources avant de procéder à la construction de projets.

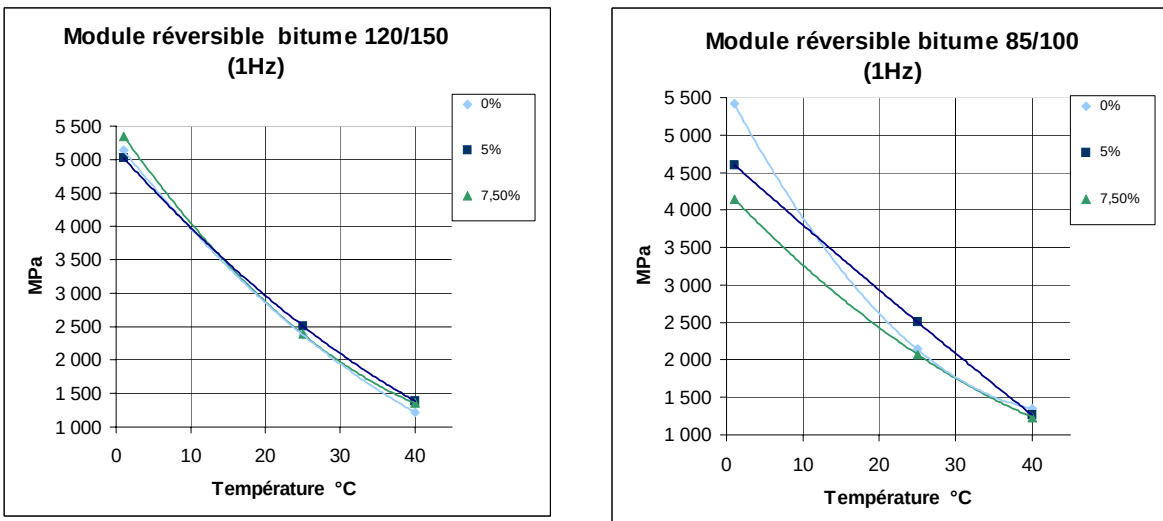


Figure 3.12 Résultats des essais de module résilient sur des enrobés confectionnés avec différents grades de bitume et contenant différents pourcentages de particules de bardeaux de postconsommation [2]

ALI et coll. [5] ont également mesuré le module résilient suivant la norme ASTM D-4123 sur trois enrobés incorporant 0, 15 et 25% de particules de bardeaux de postconsommation. Le détail des dosages de ces enrobés est présenté au Tableau 3.9 et les résultats obtenus sont présentés à la Figure 3.13.

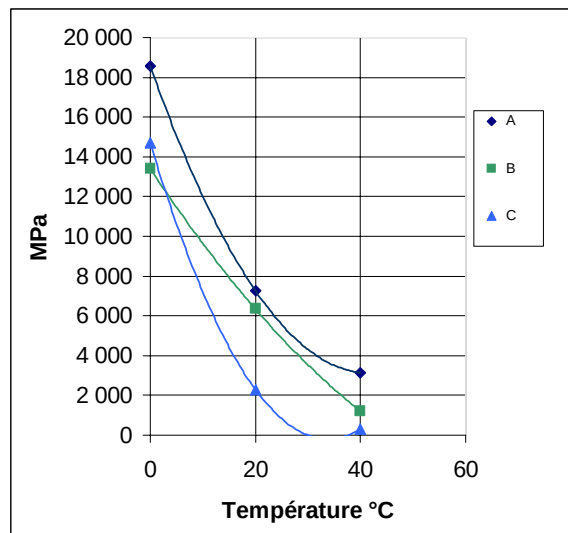


Figure 3.13 Résultats des essais de module résilient sur des enrobés confectionnés contenant différents pourcentages de particules de bardeaux de postconsommation [5]

Les résultats de la Figure 3.13 indiquent clairement que les modules résilients des enrobés incorporant des particules de bardeaux recyclés sont plus élevés que celui de l'enrobé de contrôle.

Selon ALI et coll. [5] ce phénomène s'explique en partie par l'apport en bitume des bardeaux recyclés qui est plus rigide. Cette constatation est d'autant plus vraie à haute température (40 °C) : le module résilient de l'enrobé incorporant 25 % de particules de bardeaux de postconsommation est 10 fois plus élevé que celui de l'enrobé de contrôle. À basse température (0 °C), le module résilient de l'enrobé incorporant 25 % de particules de bardeaux est 1½ fois plus élevé que celui de l'enrobé de référence.

Les résultats indiquent que l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation a pour effet d'accroître le module résilient (M_r) de l'enrobé. D'un point de vue structural, c'est donc dire, que pour des épaisseurs de couches constantes, l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation réduit la déflexion de la chaussée.

3.7.2 Résistance à l'orniéreur (*rut resistance*)

Il est couramment admis que l'incorporation de particules de bardeaux dans les enrobés donne de meilleurs résultats à l'essai à l'orniéreur [4,6,8]. Ce comportement face à l'orniérage, est en grande partie du à la plus grande rigidité du bitume qui se trouve dans les particules de bardeaux (Figure 3.14 et Figure 3.15). Les fibres du bardeau jouent également un rôle important dans l'amélioration du comportement des enrobés à l'orniérage.

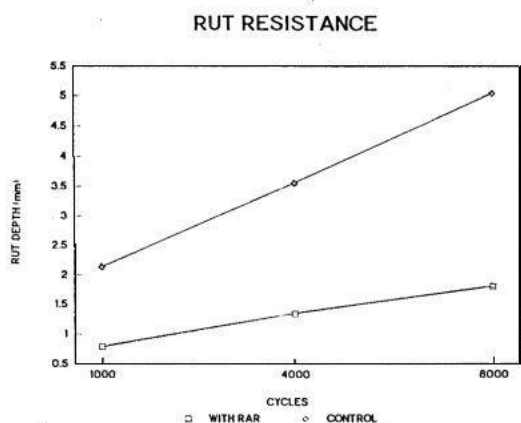


Figure 3.14 : Résistance à l'orniérage mesuré par GRYBOWSKI [8]

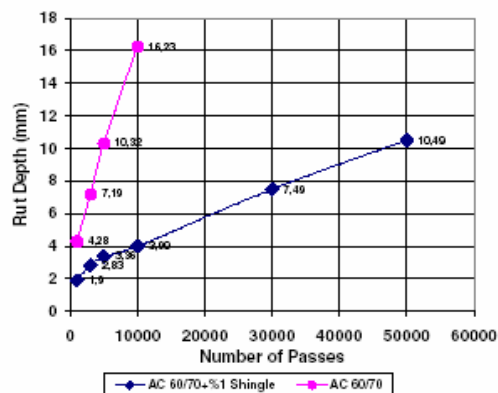


Fig. 3. Rutting test results.

Figure 3.15 : Résistance à l'orniérage mesuré par Sengoz et al.[4]

3.7.3 Prédiction par modélisation de la performance sur route

ALI et coll. [5] ont utilisé un modèle de performance pour prédire le comportement des trois enrobés contenant 15 et 25 % de bardeau postconsommation (dosages : voir tableau 3.9) . Ce modèle vise à prédire l'évolution de la performance de la route en service. Cette performance se caractérise par l'orniérage, la fissuration thermique et l'état global de la route du point de vue de l'utilisateur. Cette prédiction a été faite à partir du logiciel VESYS IIIA. Toutes les sections évaluées étaient constituées d'une couche de fondation granulaire de 300 mm d'épaisseur et d'une couche 150 mm d'enrobé incorporant ou non des particules de bardeaux de postconsommation. La modélisation a été conduite de manière à cerner l'enrobé répondant le mieux aux critères de performances fixés, tels que l'orniérage, la fissuration, la rugosité et la qualité générale de la route telles que définies par le PSI (*Performance Serviability Index*).

Le modèle d'endommagement implanté dans VESYS IIIA estime les déformations permanentes associées à l'orniérage à partir de la rigidité du matériau et du volume de trafic. L'analyse avec VESYS IIIA a permis d'établir que la structure de chaussée constituée d'une couche d'un enrobé de référence (0 % de particules de bardeaux) est susceptible de présenter des profondeurs d'ornières de l'ordre de 12,5mm après 5 ans de service. Pour la structure de chaussée constituée d'une couche d'enrobé incorporant 15% de particules de bardeaux de postconsommation le même niveau d'ornière serait atteint après 7 ans de service alors qu'il faudrait attendre plus de 12,5 ans de service pour la structure de chaussée constituée d'un enrobé incorporant 25% de particules de bardeaux de postconsommation.

La performance au terme de la fissuration réfère à la fissuration par fatigue et à basse température de la couche d'enrobé bitumineux. Le critère retenu pour prédire la fissuration en fatigue de l'enrobé est basée sur son module résilient alors que celui pour la fissuration à basse température réfère à l'essai de traction indirecte à basses températures. L'analyse a permis de mettre en relief que la structure de chaussée constituée à partir d'un enrobé de référence (0 % de particules de bardeaux) est susceptible de présenter une fissuration sévère après 5 ans de service seulement. La structure de chaussée constituée à partir d'un enrobé incorporant 15 % de particules de bardeaux de postconsommation serait susceptible de présenter une fissuration nettement moins sévère et ce, après 9,5 ans de service. Finalement, l'analyse a montré que la structure de chaussée constituée d'une couche d'enrobé incorporant 25 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconcommation serait susceptible de présentent une modérée fissuration après 17 ans de services.

Du point de vue global de l'état de la route, le facteur de service, le PSI, est retenu comme critère d'appréciation. Pour une valeur de PSI inférieure à 2,5, la route est jugée comme étant en très mauvais état. Le résultat des simulations avec VESYS IIIA ont montré qu'un tel niveau de PSI est atteint entre la 7^{ème} et la 8^{ème} année de service quant à la structure de chaussée de référence alors qu'il faut plus de 11 ans de service pour atteindre le même niveau de dégradation pour la structure constituée d'un enrobé avec 15% de particules de bardeaux de postconsommation et plus de 16 ans pour celle constituée d'un enrobé incorporant 25% de particules de bardeaux de postconsommation.

3.8 Planches d'essais réalisées

Certains États américains ont construit des planches d'essais avec des enrobés bitumineux incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation.

L'État du Minnesota [10] a procédé à la mise en place d'un enrobé de bardeaux incorporant 9 % (% massique) de particules de bardeaux de postconsommation pour la construction d'une piste cyclable en 1990. Après avoir remis à niveau la surface existante, ils ont mis en place une fondation de béton concassé de 100mm d'épaisseur. Par la suite, ils ont mis en place l'enrobé, sur une largeur de 3,7m et d'une épaisseur de 64mm. L'enrobé a été compacté par un compacteur à deux roues d'acier. En 1996, l'analyse de l'état de la piste cyclable a permis de conclure qu'elle était encore en parfait état et qu'aucune différence était notable entre la section de contrôle (sans bardeaux) et la section avec particules de bardeaux.

Suite à cette bonne performance, l'État du Minnesota a procédé au resurfaçage d'une route à fort trafic. Cette route avait été pavée en 1974 et présentait alors une forte oxydation de surface et de la fissuration transversale sévère à environ tous les 3m. Le resurfaçage a été fait en deux couches :

une première couche de 38mm d'épaisseur d'un premier enrobé incorporant des particules de bardeaux de postconsommation (*wearing coarse*) pour la mise à niveau et une deuxième couche d'un enrobé de roulement de 25mm incorporant également des particules de bardeaux (5 - 7% :% massique de la masse de granulat). Tous les trous ont été remplis avant de mettre en place la couche de nivellement. L'enrobé bardeau mis en place a été formulé pour répondre à tous les critères de conception du ministère des Transports du Minnesota. La planche d'essai comportait 7 sections resurfaçées avec différents dosages de particules de bardeaux pour la couche de roulement ou pour la couche de liaison (Tableau 3.10).

Tableau 3.10 Pourcentage de bardeau dans les différentes couches de la planche d'essai [10]

Wearing Course	Binder Course
7% Shingles	Conventional Hot Mix
7% Shingles	5% Shingles
7% Shingles	7% Shingles
5% Shingles	5% Shingles
5% shingles	7% Shingles
5% Shingles	Conventional Hot Mix
Conventional Hot Mix	Conventional Hot Mix

Une deuxième planche d'essai, toujours sous investigation, a été mise en œuvre dans l'État du Minnesota [10] en 1991. Cette deuxième planche d'essai est une construction de chaussée neuve. La construction a consisté en une voie d'une largeur de 3,7m et d'un accotement de 2,4m. La route est construite en plusieurs couches. La couche de surface, d'une épaisseur de 50mm, d'une couche de liaison de 50mm, une couche de base de 100mm et d'une couche de fondation de 280mm de granulat compacté. Des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation ont été incorporés dans l'enrobé utilisé en couche de base. L'enrobé bardeau a été mis en place à l'aide d'une paveuse Barber Green 260 et compacté à l'aide d'un compacteur à deux roues d'acier vibrantes de marque Ingersoll-Rand. Au compactage, on n'a pas réussi à rencontrer les spécifications cibles (96% de la densité Marshall). En fait, la densité Marshall mesurée en laboratoire sur des échantillons pris derrière la paveuse ont donné des résultats de 97.7 % après 50 coups, avec 5.7 % d'air dans le mélange. Les caractéristiques de l'enrobé bardeau sont montrés au tableau 4.10. En 1995, une première évaluation de performances a été conduite sur la section comprenant du bardeau. Autant la section comprenant du bardeau que celle n'en comprenant pas étaient en excellente condition avec des fissures transversales minimales. Les fissures transversales étaient espacées de 87 mètres pour la section comprenant du bardeau et de 27 mètres pour la section n'en comprenant pas. Cette différence de fissuration peut-être attribuée à la différence du terrain et du sol support des sections respectives, plus qu'aux différences quant à la formulation des enrobés.

4. Essais exploratoires quant à l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux au Québec

Dans la perspective d'évaluer la faisabilité d'incorporer des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation au sein d'enrobés bitumineux, un programme d'essai exploratoire a été élaboré à partir d'un enrobé bitumineux EB14. Le programme d'essais exploratoire a porté sur deux niveaux : 1) une analyse partielle quant aux composantes des bardeaux recyclables au Québec et, 2)

une évaluation sommaire des performances permettant aux donneurs d'ouvrages de porter une appréciation de ces enrobés. Cette dernière a été conduite aussi bien d'un point de vue structural (mesure du M_r) que d'un point de vue durabilité, notamment en ce qui a trait aux aspects de «*Mix design*» quant aux exigences liées à la formulation de l'enrobé ciblé (EB14).

Le plan d'étude et d'essais exploratoires présenté à la Figure 4.1, résume les étapes qui ont été suivies pour mieux définir les composantes des particules de bardeaux de postconsommation et d'en évaluer le comportement d'enrobés bitumineux les incorporant. Le programme d'essais a été réalisé en deux volets. Le premier volet se concentre sur la caractérisation des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation et, le deuxième, sur la performance des enrobés contenant un pourcentage de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation.

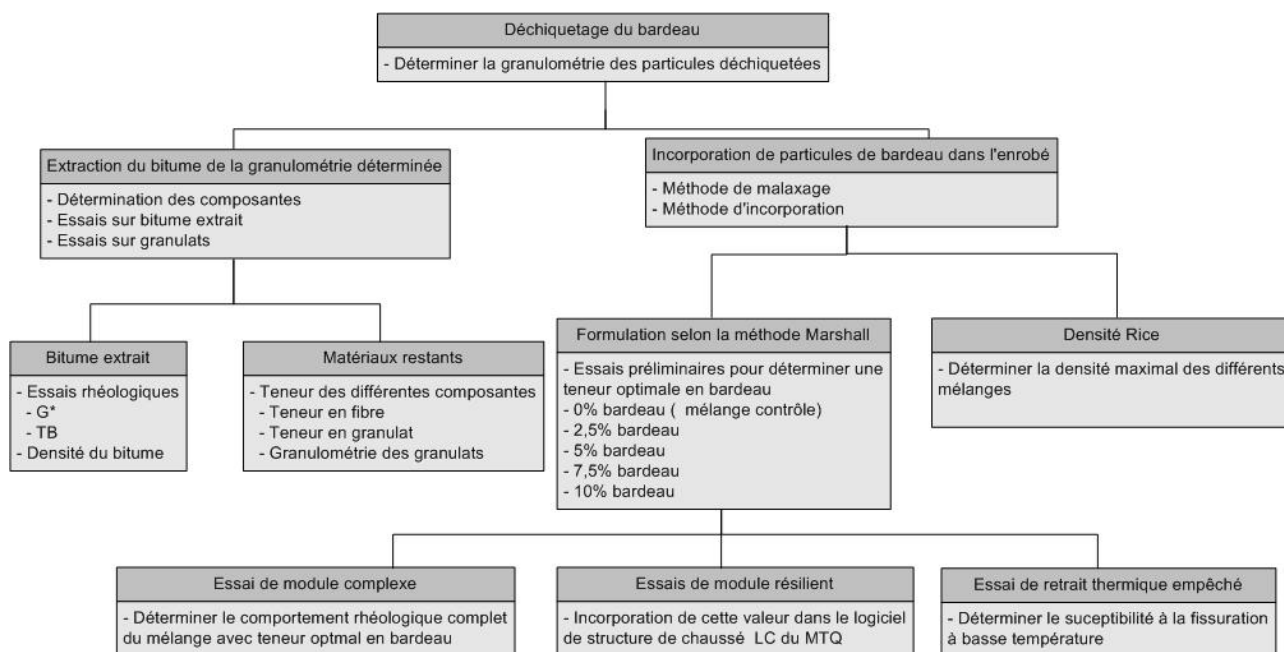


Figure 4.1 Plan d'étude et d'essais exploratoires pour évaluer la faisabilité d'incorporer des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans l'enrobé EB14

4.1 Analyse partielle quant aux composantes de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre du programme d'essais exploratoires

Dans la perspective d'évaluer les composantes de bardeaux de recyclage de la région de Montréal, notre analyse a porté sur trois éléments : 1) Granulométrie des particules de bardeaux de postconsommation après déchetage, 2) Rhéologie du bitume et 3) Évaluation des bitumes.

4.1.1 Déchetage du bardeau en laboratoire

Pour les essais en laboratoire, des feuilles de bardeaux récupérées de la reconstruction d'une toiture de la région de Ste-Thérèse au nord de Laval, ont été utilisées. On estime que la durée de service de ces feuilles de bardeaux est comprise entre 20 et 25 ans. Le bardeau est de type standard, incorporant des fibres de cellulose. Un déchetage de cinq feuilles de bardeaux en

laboratoire a été réalisé en utilisant simplement un malaxeur à mortier. Par la suite, un essai granulométrique a été fait pour connaître les dimensions des particules de bardeaux après au déchiquetage. Une dimension maximale de 12mm a été fixée pour la confection des enrobés pour permettre de limiter le coût de transformation des bardeaux à recycler. Suite au déchiquetage des bardeaux, la granulométrie des particules est donc égale et inférieure à 12mm et comporte des particules de dimension même inférieure à 0,08mm.

La courbe granulométrique des particules de bardeaux après déchiquetage est présentée à la Figure 4.2. Le tamisage a été fait sur les particules de dimension inférieure à 12.5mm. Tous les essais sur les particules de bardeaux et la confection des enrobés bardeaux ont été réalisés sur des échantillons correspondants à cette granulométrie.

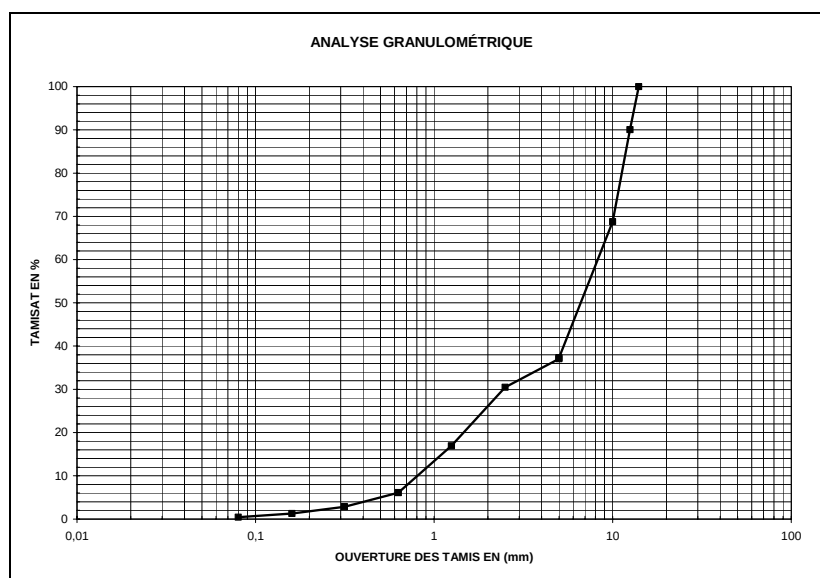


Figure 4.2 Granularité du granulat extrait des particules de bardeaux d’asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre du programme d’essais exploratoires

4.1.2 Teneur des différentes composantes, granulométrie des constituants solides et rhéologie du bitume des particules de bardeaux d’asphalte utilisées dans le cadre du programme d’essais exploratoires

Pour évaluer la teneur des différentes composantes, la granulométrie des particules solides et la rhéologie du bitume des particules de bardeaux, des essais d’extraction ont été réalisés. L’extraction du bitume des autres constituants des particules de bardeaux a été effectuée à l’aide d’une centrifugeuse en utilisant du trichloroéthylène. Suite à l’extraction, le bitume mélangé au solvant se retrouve séparé du reste des composantes solides des particules de bardeaux. À partir de ces deux phases, on peut alors déterminer pour les particules de bardeaux de postconsommation analysées : 1) la granulométrie de sa masse granulaire, 2) la teneur de ses constituants et, 3) évaluer les performances du bitume. À partir du processus d’extraction du bitume des particules de bardeaux, on peut connaître avec précision le dosage de ses composantes (bitume, fibre et granulats) qui seront incorporées aux enrobés lors d’un ajout de particules de bardeaux d’asphalte de postconsommation.

4.1.2.1 Teneur des différentes composantes constituant les particules de bardeaux de postconsommation utilisées dans le cadre du programme d'essais exploratoires

Suite à l'extraction du bitume des particules de bardeaux, une séparation du reste des composantes (fibres et granulats) a été faite par flottation. Cette séparation a permis de déterminer le dosage des différentes composantes du bardeau. Les résultats obtenus pour les particules de bardeaux utilisées dans le cadre des essais exploratoires sont présentés au

Tableau 4.1. Ces résultats sont en tout point semblables à ceux que l'on retrouve dans la littérature.

Tableau 4.1 Teneur des composantes des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre du programme d'essais exploratoires

Composition (% de la masse total)	Résultats obtenus
Bitume	38 %
Fibres de cellulose	7%
Granulats	55 %

4.1.2.2 Granularité des constituantes solides des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre du programme d'essais exploratoires

Une fois le granulat séparé du bitume des particules de bardeaux, la granularité a été établie. La granulométrie du granulat des particules de bardeaux utilisées pour les essais exploratoires est présentée à la Figure 4.3. De manière à respecter les exigences de formulation, il est possible de corriger la fraction granulaire utilisée pour la confection de l'enrobé en prenant en compte celle des particules de bardeaux.

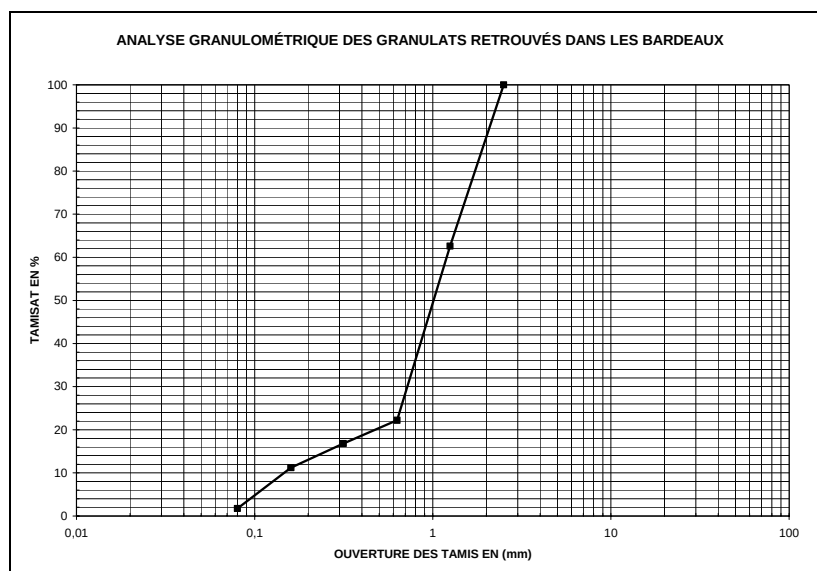


Figure 4.3 Résultat de l'analyse granulométrique faite sur les granulats des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation utilisées dans le cadre des essais exploratoires

4.1.2.3 Rhéologie du bitume extrait du bardeau

Une fois le bitume extrait des particules de bardeaux et séparé du solvant, des essais sur le bitume ont été réalisés. Ces essais ont permis d'avoir une idée du comportement rhéologique du bitume à basse et haute température. Toutefois, il est difficile de déterminer avec précision le comportement des bitumes provenant de particules de bardeaux puisque le processus d'extraction avec solvant modifie ses caractéristiques. Une autre difficulté ayant été rencontrée concerne les températures d'essais à appliquer compte tenu de la dureté que représente un tel bitume.

4.1.3 Évaluation sommaire des aspects de formulation (*Mix design*) d'enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation

L'analyse des résultats associée aux aspects de formulation (*Mix design*) de l'enrobé incorporant différents dosages de particules de bardeaux de postconsommation sera centrée sur deux éléments : 1) la façon d'incorporer les particules de bardeaux à l'enrobé et la méthode de malaxage en laboratoire et, 2) la performance suivant la méthode Marshall à partir de la confection de plusieurs enrobés (EB14-BXY : 0, 2.5, 5, 7.5 et 10 %).

4.1.3.1 Incorporation de particules de bardeaux d'asphaltes de postconsommation dans l'enrobé

L'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans l'enrobé doit donner comme résultat un mélange homogène. Les particules de bardeaux doivent être mélangées sans agglomération et ne pas trop créer de vides dans l'enrobé une fois compacté. Pour ce faire, nous avons utilisé une méthode couramment citée dans la littérature. Cette méthode consiste à faire chauffer les granulats à leur température maximale avant d'y incorporer les particules de bardeaux broyés, non chauffées et on malaxe le tout environ 30 secondes avant d'incorporer le bitume vierge.

Dès la confection des premiers enrobés incorporant des particules de bardeaux (de 5% à 10% de particules de bardeaux) suivant cette méthode d'incorporation, nous avons été à même de constater que la répartition des particules de bardeaux était tout à fait homogène.

4.1.3.2 Formulation (*Mix design*) selon la méthode Marshall

Dans un premier temps, en référence aux critères associés à la méthode de formulation Marshall, nous avons cherché à cerner un pourcentage optimal de particules de bardeaux pouvant être incorporé dans l'enrobé EB14-BXY. Après quoi, dans un deuxième temps, des essais mécaniques ont été réalisés sur l'enrobé incorporant ce dosage optimal de particules de bardeaux et sur un enrobé de contrôle (EB14) et ce, de manière à pouvoir mettre en relief les différences de comportement.

La formulation cible pour l'enrobé EB14 étant déjà bien maîtrisée, nous avons formulé différents enrobés incorporant différents teneurs en particules de bardeaux (0; 2,5; 5; 7,5 et 10 %). Tous les enrobés ont été confectionnés en prenant en compte l'apport de matériaux provenant des particules de bardeaux. La totalité des granulats provenant des particules de bardeaux ont été retranchés de la masse granulaire de l'enrobé EB14 et ce, de manière à conserver la granularité d'origine. Par ailleurs, une partie du bitume contenue dans les particules de bardeaux, en l'occurrence 30%, a été comptabilisée comme liant de sorte que le dosage en bitume vierge de l'enrobé EB14 a donc été réduit. La valeur de 30% a été fixée après avoir discuté de la problématique avec une entreprise utilisant déjà des bardeaux dans les enrobés au Québec. On considère que 50 % du bitume des particules de bardeaux contribue à titre de liant au mélange. Compte tenu du fait que cette donnée est appliquée pour des particules de bardeaux de postfabrication, nous avons convenu de demeurer conservateur à ce niveau dans le programme d'essais exploratoires. Les quantités initiales prévues de granulats vierges et de bitume vierge ont donc été corrigées pour respecter la formulation cible de départ pour l'enrobé EB14 sans bardeaux.

Nous avons par la suite procédé aux essais courants suivant le principe de la méthode Marshall pour déterminer le pourcentage optimal de particules de bardeaux pouvant être incorporées dans l'enrobé EB14- BXY. Cette valeur optimale a été déterminée à partir de la stabilité, le fluage, les vides totaux dans le mélange et la densité du mélange mesurées en laboratoire suivant les spécifications fixées par la méthode Marshall pour l'enrobé de référence (EB14). Les Figures 4.4 à 4.7 présentent la variation de la stabilité Marshall, du fluage, de la teneur en vides et de la densité mesurée sur briquettes d'enrobés en fonction de la teneur en particules de bardeaux incorporée dans l'enrobé EB14-BXY. À partir de ces Figures, on est à même de constater que l'enrobé incorporant 5% de particules de bardeaux (%massique en référence à la masse totale de l'enrobé) permet de satisfaire l'ensemble des spécifications fixées pour l'enrobé EB14 et ce, tout en étant relativement éloigné des limites de spécification. L'enrobé de type EB14 comprenant 5 % de bardeau a donc été retenu comme enrobé optimal : EB14-BX5.

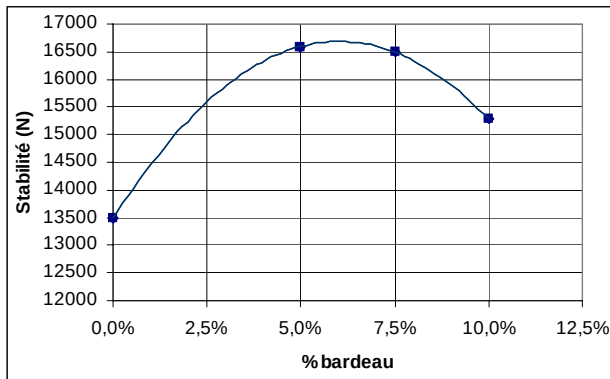


Figure 4.4: Variation de la stabilité mesurée sur briquettes Marshall en fonction de la teneur en particules de bardeaux incorporées dans l'enrobé EB14

(Bitume vierge corrigé au taux de 11,4% de la teneur en particules de bardeaux)

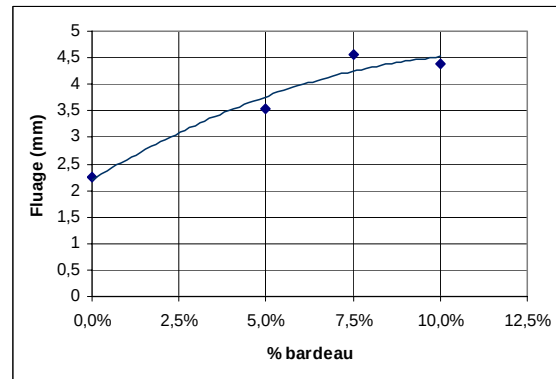


Figure 4.5: Variation du fluage mesuré sur briquette Marshall en fonction de la teneur en particules de bardeaux incorporées dans l'enrobé EB14

(Bitume vierge corrigé au taux de 11,4% de la teneur en particules de bardeaux)

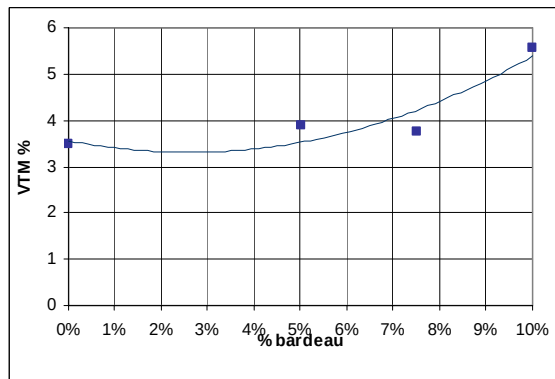


Figure 4.6 Variation de la teneur en vides mesurée sur briquettes Marshall en fonction de la teneur en particules de bardeaux incorporées dans l'enrobé EB14

(Bitume vierge corrigé au taux de 11,4% de la teneur en particules de bardeaux)

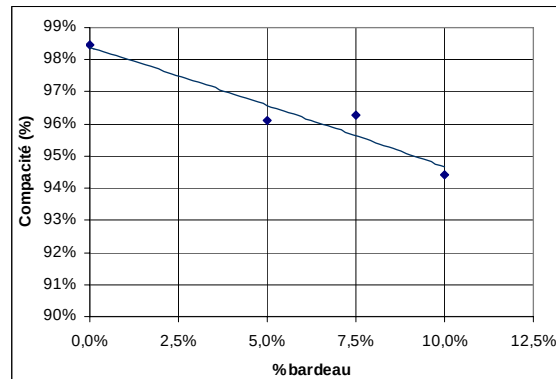


Figure 4.7: Variation de la compacité mesurée sur briquettes Marshall en fonction de la teneur en particules de bardeaux incorporées dans l'enrobé EB14

(Bitume vierge corrigé au taux de 11,4% de la teneur en particules de bardeaux)

4.2.2 Évaluation sommaire des performances mécaniques de l'enrobé incorporants 5% de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : EB14-BX5

Des essais exploratoires de performances mécaniques ont été réalisés sur l'enrobé EB14-BX5. Les essais réalisés sont : 1) le module complexe, 2) le retrait thermique empêché et, 3) le module résilient ou réversible. Le module complexe permet de caractériser le comportement intrinsèque de l'enrobé en petites déformations alors que l'essai de retrait thermique empêché permet d'évaluer la résistance à la fissuration thermique. La mesure des modules résilients donne une autre indication quant à la cohésion de l'enrobé pour divers couples de fréquence-température. Notons que le module résilient est utilisé dans un logiciel de structure de chaussée, utilisé par les villes et entreprises, pour le dimensionnement des chaussées souples. Tous ces essais ont été réalisés au LUCREB.

Les éprouvettes pour les essais de modules complexes, de retrait thermique empêché et de modules résilients, ont été prélevées par carottage dans des plaques d'enrobé compactées en laboratoire. Les plaques d'enrobé ont été compactées en laboratoire avec le compacteur des plaques LCPC du laboratoire LUCREB à l'ÉTS (Figure 4.8). Les plaques obtenues ont une forme prismatique (400 x 600 x 125 mm). Les carottes, à raison de onze par plaque, ont été prélevées dans la direction normale aux plans de sciage, parallèlement à la surface compactée et suivant la direction du compactage. La planéité et le parallélisme des surfaces planes sont assurés à l'aide d'une surfaceuse rotative au carbure. La procédure de carottage est schématisée à la Figure 4.9. Les éprouvettes sont ensuite entreposées à température et humidité contrôlées ($T = 20^{\circ}\text{C}$ et $H.R. = 50\%$) sur un lit de sable, suivant leur axe de révolution, de manière à éviter leur gauchissement en cours d'entreposage.



Figure 4.8 Compacteur de plaques MLPC (LUCREB ÉTS)

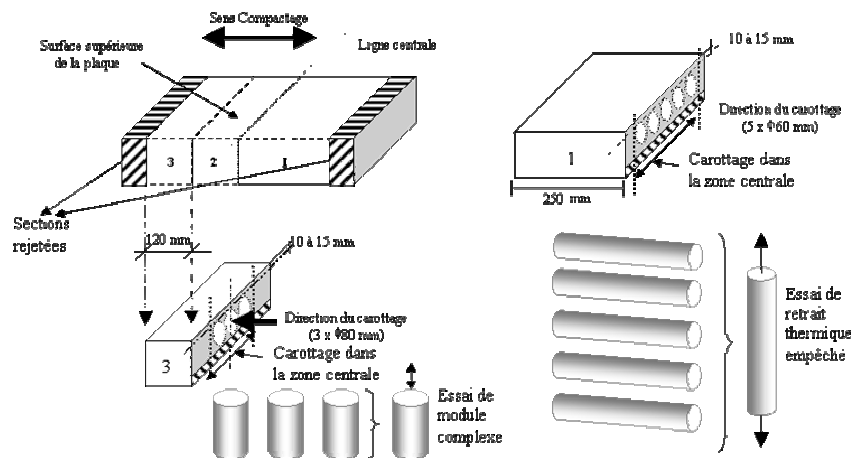


Figure 4.9 Schématisation du plan de carottage des plaques d'enrobés pour les essais de module complexe, retrait thermique empêché et module résilient.

4.2.2.1 Essais de module complexe

Pour la réalisation des mesures de modules complexes, l'essai de traction-compression alternée a été mis au point dans les laboratoires du LUCREB de l'École de Technologie Supérieure. La presse servo-hydraulique MTS 810 est utilisée pour cet essai. Des éprouvettes d'enrobés de forme cylindrique de diamètre de 80 mm et d'une hauteur de 120 mm sont soumises à cet essai (Figure

4.10). Elles sont testées en contrôle de déformation selon leur axe de révolution de façon cyclique suivant une sollicitation de type sinusoïdale. Cette sollicitation est exercée à différentes fréquences et différentes températures. L'avantage principal de cet essai est l'état homogène des champs de contrainte et de déformation, signifiant que le couple de la contrainte et la déformation (σ , ϵ) est identique en tout point de l'éprouvette.

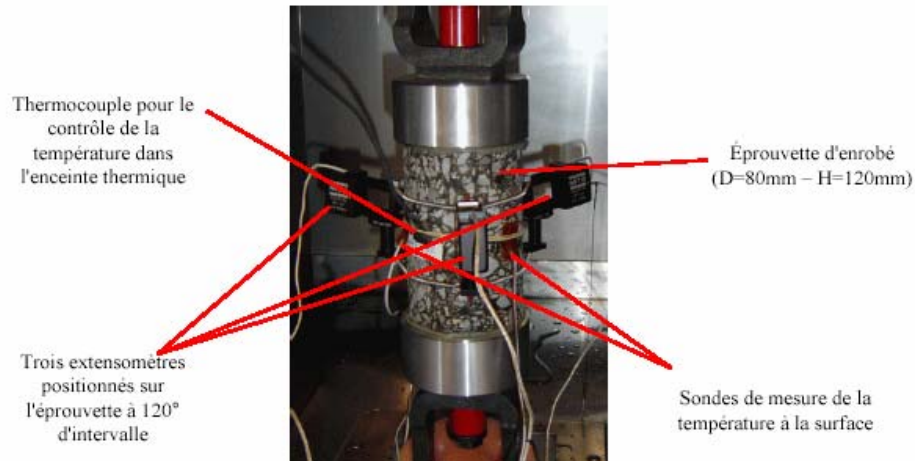


Figure 4.10 Montage de l'essai de module complexe

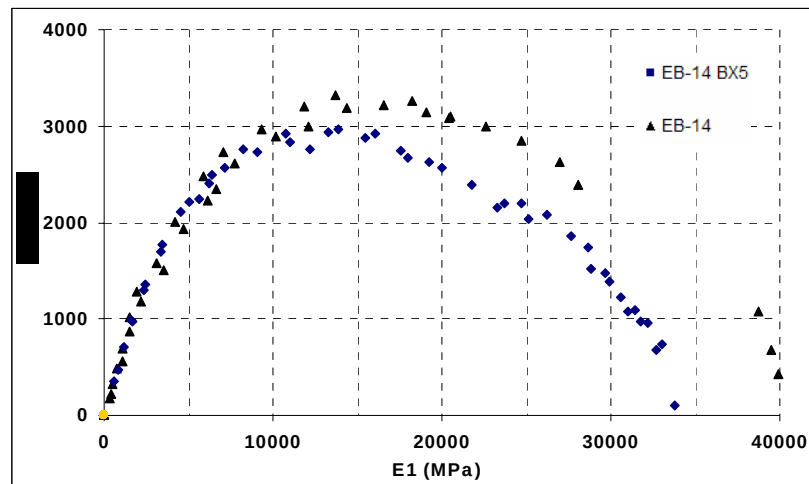


Figure 4.11 Résultats des essais de module complexe pour l'enrobé EB14 et l'enrobé EB14-BX5

Les résultats présentés à la Figure 4.11 montre une réponse typique du comportement de l'enrobé EB14-BX5 en petites déformations. Ce dernier présente un comportement différent et témoigne de l'influence de l'ajout de particules de bardeaux au sein de l'enrobé.

4.2.2.2 Essais de module résilient (module réversible)

Le principe de l'essai du module résilient est détaillé à l'annexe I. Un chargement diamétral est appliqué sous forme de pulsation (0,1s de charge et 0,9s de repos) sur une éprouvette cylindrique ($\phi 100$ mm ou $\phi 150$ mm x 50 mm). La Figure 4.12 montre le type d'essai. Lors des chargements, on mesure, à l'aide d'extensomètres, la dilatation radiale perpendiculairement à la charge appliquée.

Le déplacement vertical de l'éprouvette dans la direction de la charge est également mesurée par des LVDT placés à chaque bout de l'éprouvette. Le module résilient correspond au rapport de la contrainte répétée sur la déformation réversible. Ce module correspond en fait au module du matériau qui est considéré comme élastique, après l'application de plusieurs cycles de sollicitation. L'essai se réalise suivant la norme ASTM D4123-82.

Éprouvette d'enrobé
(D=100mm H=50mm)

Deux extensomètres
Positionnés à chaque bout

Deux LVDT
positionnés à chaque bout

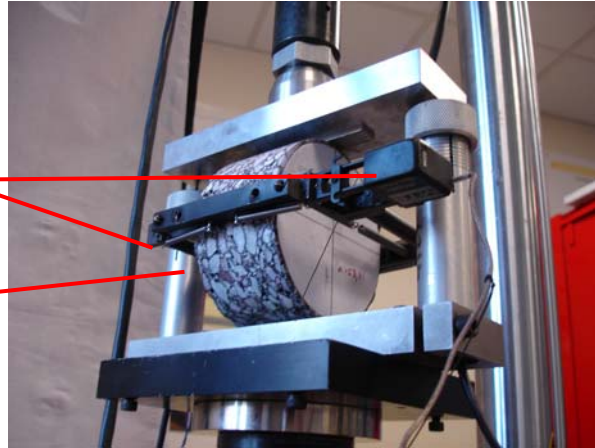


Figure 4.12 Montage de l'essai de module réversible ou résilient

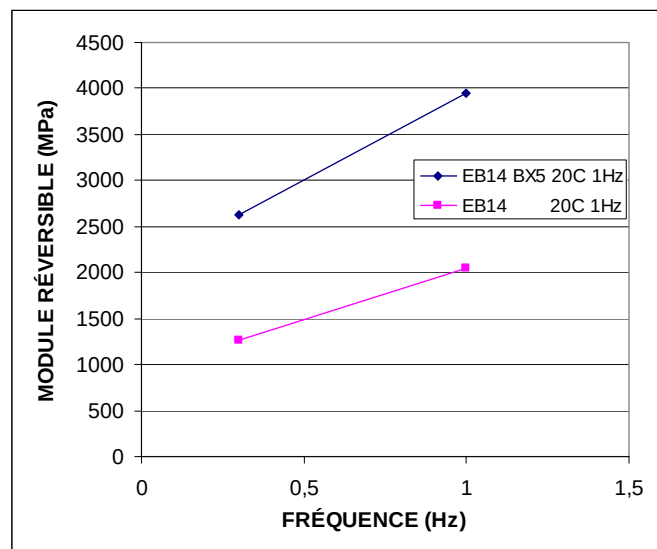


Figure 4.13 Résultats de l'essai de module réversible pour l'enrobé EB14 et l'enrobé EB14-BX5

Les résultats confirment les observations des différents chercheurs vis-à-vis de la cohésion des enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : l'enrobé est plus cohésif. On peut estimer que cette augmentation est de l'ordre de 50%.

4.2.2.3 Essai de retrait thermique empêché

Le principe de l'essai de retrait thermique empêché est décrit dans la norme AASHTO TP10-93 (*Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength*). L'essai consiste à empêcher la déformation axiale d'une éprouvette d'enrobé (hauteur constante) pendant que la température de son environnement diminue progressivement. Le refroidissement (10°C/hre) incitera l'éprouvette à se contracter, mais la presse servo-hydraulique MTS 810, l'empêchera de se

déformer. Des contraintes de tension se développent alors au sein de l'éprouvette qui entraînera une rupture par retrait thermique empêché. La température à la rupture, ainsi que la contrainte correspondante, sera alors déterminée.

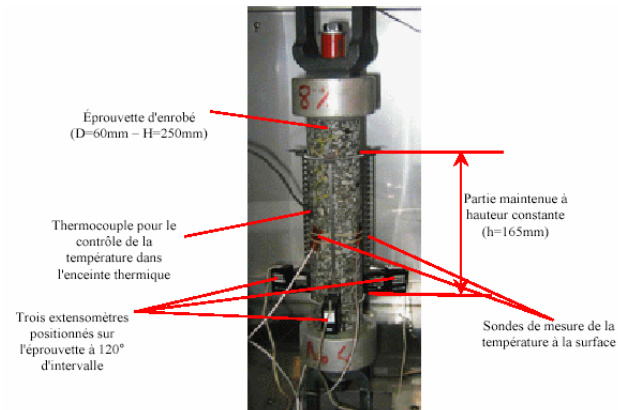


Figure 4.14 Montage de l'essai de retrait thermique empêché (TSRST)

Compte tenu du fait que l'ajout de particules de bardeaux de postconsommation se traduit par un matériau plus rigide aux conditions ambiantes (température : 20°C et Fr : 1Hz), on est en droit de se demander si cette observation a des conséquences importantes aux basses températures. Les résultats des essais au TSRST de l'enrobé EB14-BX5 sont présentés à la Figure 4.15. Tout comme les observations rapportées par Baaj et Coll. [39], les résultats de nos essais indiquent que l'ajout d'un dosage de 5% de particules de bardeaux de postconsommation ne semble pas avoir d'effet jugé significatif sur la performance à basse température. En effet, l'enrobé EB14-BX5 a été confectionné à partir d'un bitume PG58-28. Or, il est admis que la température de rupture à l'essai de TSRST est très semblable à la température basse du grade de bitume. Les résultats de la Figure 4.15 indiquent que la température de rupture est exactement de cet ordre (-28,5°C). Évidemment, ces essais sont sommaires et il convient d'approfondir cette question pour vérifier plus en détail le comportement de ces enrobés aux basses températures.

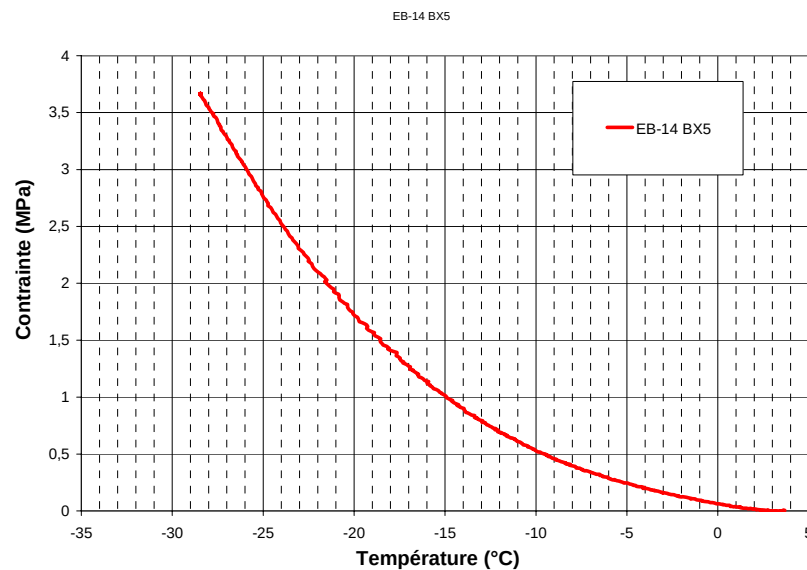


Figure 4. 15: Résultats de l'essai de retrait thermique empêché pour l'enrobé EB14 et l'enrobé EB14-BX5

5. Lignes directrices en vue de mener au développement d'enrobés bitumineux contenant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation au Québec

Bien évidemment, il faut impérativement valider la performance des enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation à partir d'un programme d'investigation complet aussi bien par un programme d'essais en laboratoire qu'à partir de planches d'essais In Situ.

Globalement, il faut envisager :

- 1- Établir un protocole de production des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation à grande échelle
 - a. Stratégies de récupération (Trie à la source; voies incitatives; etc.)
 - b. Définir et valider une procédure de déchiquetage (techniques de broyage; entreposage; normalisation de cette nouvelle matière première)
 - c. Préciser les techniques d'enlèvement des débris (modes; limites acceptables; autres)
- 2- Établir les performances cibles de l'enrobé avec particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation et ce, à partir de trois productions en centrales d'enrobage
 - a. Caractérisation complète de l'enrobé avec particules de bardeaux de postconsommation (M_r ; module complexe; TSRST; Traction directe à différentes températures;)
 - b. Simulation en laboratoire (essais orniéreur; tenue à l'eau; autres)
- 3- Évaluer les performances sur routes
 - a. Planches d'essais (évaluer l'aptitude de compactage; valider le M_r par rétrocalcul :essais à la masse tombante-FWD; autres)
 - b. Assurer un programme quant aux suivis de performance sur le court, moyen et long terme
- 4- Mettre sur pied un comité d'expert pour élaborer une norme de production et d'opération

Références bibliographiques

1. Germain, B, Cahrland M. – *Étude de faisabilité sur la récupération et le recyclage de bardeaux d’asphalte*. rapport préparé pour le CRIQ Novembre 2004
2. NEWCOMB, D.E., M. STROUP-GARDINER, B. WEIKLE, and A. DRESCHER. – *Influence of Roofing Shingles on Asphalt Concrete Mixture Properties*. Report prepared for Minnesota Department of Transportation at the University of Minnesota, March 1993.
3. W.H. CHESNER, R. J. COLLINS, M. H. MACKAY. – *User Guideline For Waste and By-Product Materials in Pavement Construction* Report prepared for Office of Engineering Research and Development Federal Highway Administration publication no. FHWA-RD-97-148 april 1998
4. B. SENGOZ, A. TOPAL. *Use of Asphlt Roofing Shingle Waste in HMA*. Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Dokuz Eylul. University Construction and Building Materials, v 19, n 5, June, 2005, p 337-346
5. N. ALI, JOSEPH S.S. CHAN, ALEX J.POTYONDY, R. BUSHMAN; A.T. BERGAN (Technical Univ. of Nova Scotia) – *Mechanistic evaluation of asphalt concrete mixtures containing reclaimed roofing materials* Source: Transportation Research Record, n 1515, Jul, 1995, p 28-36
6. K.Y. FOO,D.I. HANSON,T.A. LYNN, (Bradley Univ.) – *Evaluation of roofing shingles in hot mix asphalt* Source: Journal of Materials in Civil Engineering, v 11, n 1, Feb, 1999, p 15-20
7. *From Rooftops to Roads*, Asphalt Contractor, July 1995, pp. 42-47.
8. K.F. GRZYBOWSKI, *Recycled asphalt roofing materials – A Multi-Fonctional, Low Cost Hot Mix Asphalt Pavement Additive*, Use of Waste Materials in Hot mix Asphalt, ASTM Special Technical Publication 1193, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania,1993
9. G. PAULSEN, M. STROUP-GARDINER, and J. EPPS. – *Recyclingwaste Roofing material in Asphalt Paving mixture*. Source: Transportation Research Record, n 1115, Jul, 1987, p 171-182
10. David W. Janisch and Curis M. Turgeon . – *Minnesota’s Experience with scrap shingles in bituminus pavements.Final report 1991 to 1996 report number 96-34*
11. OLARD, F., *Comportement thermomécanique des enrobés à basses températures*, Thèse présentée à l’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
12. CORTE, J.F, DI BENEDETTO, H., « Matériaux routiers bitumineux 1, Description et propriétés des constituants ». Lavoisier, Paris, 2005.
13. CORTE, J.F., DI BENEDETTO, H., « Matériaux routiers bitumineux 2, Constitution et propriétés thermomécanique des mélanges », Lavoisier, Paris, 2005.
14. PUCCI, T., *Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux*, Thèse de Doctorat EPFL Lausanne, 2000.

15. Association mondiale de la route (AIPCR), *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, « Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en techniques routières », Paris, 1999.
16. LESUEUR, D., LITTLE, D. N., SHASHIDHAR, N., SHENOY, A., « Effect of hydrated lime on rheology, fracture, and aging of bitumen ». *Transportation Research Record*, 1999, vol. 1661, pp. 93-105.
17. SAINTON, A., PUIATTI, D., WALTER, D., “Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée”, *Revue Générale des Routes et Aérodrômes*, n°770, février 1999.
18. LESUEUR, D., « La rhéologie des bitumes : Principes et modification », *Rhéologie*, Vol. 2, 2002, pp.1-30.
19. LEE, H. J., *Uniaxial constitutive modeling of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory*. Phd Thesis, Department of Civil Engineering, Raleigh, North Carolina State University, 1996.
20. HUET, C., *Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés*. Thèse de Docteur Ingénieur, Paris: Faculté des Sciences de l'université de Paris, 1963, 69 p.
21. DI BENEDETTO, H., « Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique », *Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control, Proceedings of the Fourth Rilem Symposium*, Budapest, 1990.
22. DUMONT, A.-G., PUCCI, T., « Réalisation des Infrastructures de Transport », *Infrastructures routières et matériaux*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
23. OLARD, F., DI BENEDETTO, H., ECKMANN, B., « Prédiction des résultats des tests de fluage BBR à partir des résultats de module complexe », *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées* 252-253, Paris, 2004
24. MANDEL, J., *Cours de Mécanique des Milieux Continus*, Tome II : Mécanique des Solides, Gauthier-Villars Editeur, Paris, 1966.
25. SAYEGH, G., *Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux*. Thèse de Doctorat d'Ingénieur : Faculté des Sciences de l'université de Paris, juin 1965.
26. OLARD, F., DI BENEDETTO, H., ECKMANN, B., TRIQUIGNEAUX, J-P., “Linear viscoelastic properties of bituminous binders and mixtures at low and intermediate temperatures”, *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Volume 4, Issue 1, 2003, pp. 77-107.

27. OLARD, F., DI BENEDETTO, H., "General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes", *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Volume 4, Issue 2, 2003, pp. 185-224.
28. American Association of State Highway and Transportation Officials, mxt on the 1990 European Asphalt Study Tour, AASHTO, Washington, DC, 1991, pp. 69-82.
29. DECOENE, Y., "Contribution of Cellulose Fibers to the Performance of Porous Asphalts", *Transportation Research Record 1x3*, Transportation Research Board, Washington, DC, 1990, pp. 82-86.
30. HUET, M., et al., "Experiments with Porous Asphalt on the Nantes Fatigue Test Track", *Transportation Research Record 1265*, Transportation Research Board Washington D.C., 1990, pp. 54-58.
31. El-Sheikh, M. et al., "Cracking and Seating of Concrete Pavement on 1-74", *Transportation Research Record 1268*, Transportation Research Board , Washington, D.C., 1990, pp. 25-33.
32. Peltonen, P. V., "Characterization and Testing of Fibre-modified Bitumen Composites", *Journal of Materials Science* 26, 1991, pp. 5618-5622.
33. CHEN, J.S., PENG, C.H., "Analyses of Tensile Failure Properties of Asphalt-Mineral Filler Mastics", *Journal of Materials in Civil Engineering*, novembre 1998, pp 256-262.
34. CUPO-PAGANO, M., D'ANDREA, A., CANTISANI, G., "The role of filler in bituminous mastics and concretes", *Mechanical Tests for Bituminous Materials*, Di Benedetto & Francken (eds), RILEM 1997, pp 485-492
35. DURAND, A., SUTTON, O., MOREL, J., MULLER, G., "Investigations on bitumen/polymer/filler interactions and rheological properties of mastics", *Mechanical Tests for Bituminous Materials, Proceeding of the 5th International RILEM Symposium*, Lyon 14-16 mai 1997, pp 173-178.
36. MOLENAAR, J.M.M., VOSKUILEN, J.L.M., BOTHMER, J.J., "Effects of filler aggregate on rheological properties of mastic", *Mechanical Tests for Bituminous Materials, Proceeding of the 5th International RILEM Symposium*, Lyon 14-16 mai 1997, pp. 173-178.
37. WORTELBOER, J.P., HOPPEN, H.J., RAMOND, G., PASTOR, M., "Rheological Properties of Bitumen/Filler Mixtures", *1st European Eurobitume and Eurasphalt Congress*, Strasbourg, 1996
38. Peterson J.C., Chemical composition of Asphalt Related to Asphalt Durability: State of the Art, *Transportation Research Record*, Vol 999, 1984

ANNEXE I

Matériaux constituant les chaussées bitumineuses

Bitumes

Généralités

Le bitume présente une grande complexité concernant à la fois sa composition chimique et ses réponses aux sollicitations mécaniques. Il s'agit d'un matériau très visqueux à température ambiante, alors que sa viscosité diminue nettement en le chauffant. Il s'agit donc d'un matériau *thermoplastique*. Ses propriétés d'adhésion et d'adhérence en font un matériau approprié pour des « collages ». Il possède en outre des propriétés d'étanchéité vis-à-vis de l'eau, c'est en particulier pour cette raison qu'il est utilisé dans des constructions diverses qui exigent une étanchéité fiable (bâtiments, chaussées, bateaux etc.).

Fabrication

Obtenu par raffinage des pétroles bruts, le bitume est un produit pétrolier. Il représente la fraction la plus lourde après la distillation. En dehors des produits industriels, on utilise toujours des bitumes naturels, issus des gisements de Trinidad au Venezuela et au Canada.

Composition chimique

Le bitume est un hydrocarbure contenant des molécules de différents poids moléculaires. En dehors du carbone et de l'hydrogène, le matériau présente de faibles teneurs en soufre, oxygène et azote ainsi que des traces de métal (fer, nickel, aluminium, silicium). Ces éléments en faible teneur influencent les propriétés physiques et chimiques [12].

Bitumes modifiés aux polymères

Généralités

Par ajout de polymères lors de la fabrication, on obtient des bitumes modifiés par des polymères (BMP). Les composantes polymères sont généralement employées à une teneur de 2 à 7 % en poids par rapport au bitume. Les polymères le plus souvent utilisés sont les copolymères blocs SBS (Styrène-Butadiène-Styrène) et EVA (Etylène-Vinyle-Acétate). Un ajout d'EVA donne une bonne résistance à la fatigue et une stabilité thermique remarquable, alors qu'un bitume modifié au SBS permet une augmentation des températures de ramollissement et d'écoulement, ainsi qu'une diminution de la susceptibilité thermique du liant [12].

Les modifications sont apportées afin d'améliorer plusieurs caractéristiques et ainsi de s'approcher du liant « idéal » [17] :

- Diminution de la susceptibilité thermique dans la plage des températures(- 20°C à + 60°C)
- Faible viscosité aux températures de mélange, de mise en œuvre et de compactage
- Résistance élevée à la fatigue et aux déformations permanentes (orniérage)
- Bonne adhésivité avec le granulat
- Stabilité dans le temps et résistance au vieillissement

Essais de caractérisation sur bitumes

Comportements des bitumes en fonction de la déformation et de la température

Les bitumes ont un comportement complexe. La Figure I.1 permet d'identifier l'évolution en fonction de la température des propriétés mécaniques du bitume.

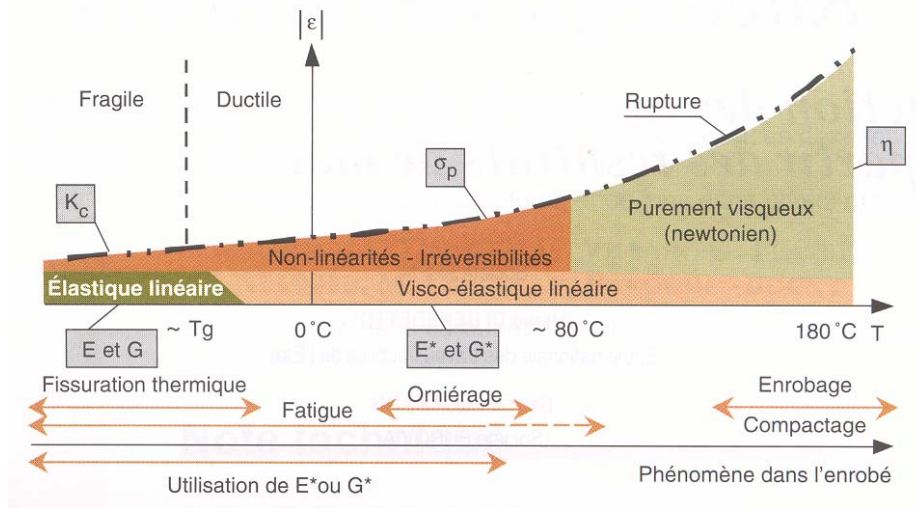


Figure I. 1: Comportement des bitumes en fonction de la température [11]

Les propriétés mécaniques des bitumes dépendent aussi bien de la température que de l'amplitude de déformation (Figure I. 1). Dans le domaine des petites déformations, le comportement mécanique est linéaire. Aux températures inférieures à la température de transition vitreuse (T_g), le bitume se comporte comme un corps purement élastique dont le comportement peut être décrit par le *module de Young* (E). Lorsque la déformation dépasse un certain seuil, le matériau se casse par sa fragilité. Si la température du bitume est supérieure à T_g , les effets visqueux apparaissent, c'est-à-dire que la réponse à une sollicitation mécanique dépend du temps. Afin de décrire les effets de la viscoélasticité, le paramètre de module complexe E^* peut être introduit [11]. Lorsque l'amplitude de déformation est trop grande, la non-linéarité apparaît.

Tests classiques empiriques

Essai de pénétrabilité

L'essai de pénétrabilité sert à classer les bitumes en fonction de leur consistance. La profondeur de l'enfoncement d'une aiguille dans des conditions de température (25°C) normalisées, de charge (100 g) et de temps (5 s) est mesurée (Figure I.2). La profondeur exprimée en dixièmes de millimètre permet de classer les bitumes. Un bitume 50/70 présente une pénétrabilité entre 5 et 7 millimètre à 25°C. Quoique la mesure de la pénétration est encore utilisée au Québec, cette classification est surtout utilisée en Europe.

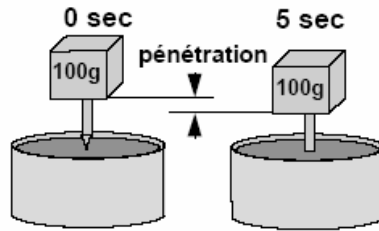


Figure I.2: Schéma d'un essai de pénétrabilité [11]

Température de ramollissement bille et anneau : TBA

Cet essai se réalise dans l'eau qui est chauffée pour augmenter la température. Le bitume est placé dans un anneau, sur lequel repose une bille. Le but de ce test est de définir la température pour laquelle le bitume s'est déformé jusqu'à ce qu'il atteigne un allongement prédéterminé (Figure I.3). Cette température correspond ainsi à un certain degré de ramollissement. Comme pour la pénétration, ce test est peu utilisé au Québec.

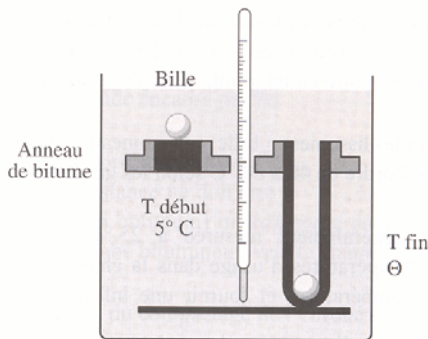


Figure I.3: Schéma d'un essai de ramollissement bille et anneau [12]

Test de comportement à basses températures dit « essai Fraass »

Ce test développé par *Fraass* permet de décrire le comportement des bitumes aux très basses températures. Il fournit la température à laquelle un film de bitume de 0,5 mm sur une plaque flexible en acier se rompt sous l'effet d'une flexion (Figure I.4). La plaque est fléchi en continue pendant que la température ambiante est abaissée de 1°C par minute. On détermine la température pour laquelle apparaît la première fissure comme température de fragilité *Fraass*. Ce test est également peu utilisé au Québec.

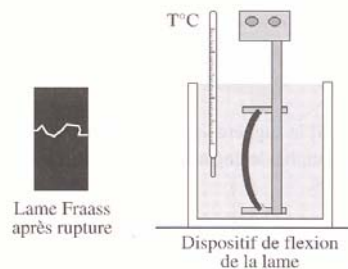


Figure I.4: Schéma d'un essai de fragilité Fraass [12]

Conditionnement RTFOT

Le conditionnement RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) permet de simuler le vieillissement du bitume sous l'effet de l'enrobage. La température au voisinage de 160°C lors de l'enrobage favorise,

en effet, un vieillissement du bitume à cause de l'oxydation. Ce conditionnement permet de simuler l'oxydation et la perte des matières volatiles de manière réaliste. Le bitume placé en film mince est exposé à un flux d'air chaud (Figure I.5). Au cours du conditionnement, les valeurs pertinentes, telles que la pénétrabilité et la température de ramollissement, nommées dorénavant RTFOT, sont mesurées et comparées aux valeurs initiales.

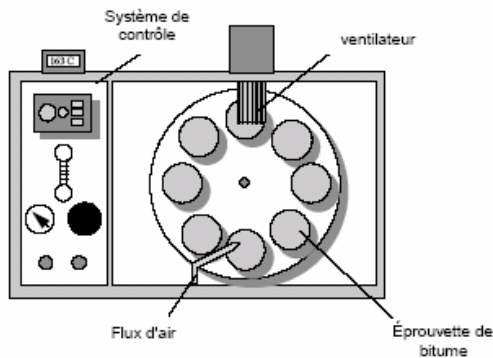


Figure I.5: Essai RTFOT [45]

Conditionnement PAV

Pour caractériser les propriétés des bitumes in-situ, l'essai de PAV (Pressure Aging Vessel) est utilisé. Il permet d'accélérer le processus du vieillissement. Une éprouvette issue de l'essai RTFOT est chauffée et versée dans un plateau métallique. Plusieurs plateaux sont placés dans un rack dans une enceinte thermique (Figure I.6). A la température de 100°C une pression de 20 bar est appliquée. Au bout de 20 heures, les éprouvettes sont placées dans un four à 163°C pendant 30 minutes. Après cela, les propriétés habituelles, dites maintenant PAV, qui peuvent être comparées aux valeurs initiales et aux valeurs RTFOT sont mesurées.

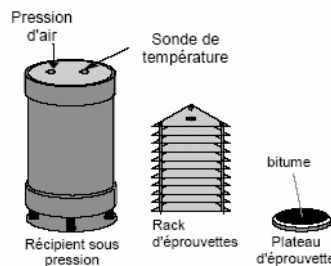


Figure I.6: Essai PAV [45]

Exemples d'essais rhéologiques

Essais sous charge constante

En appliquant une contrainte constante sur une éprouvette de bitume à une température définie, celle-ci s'allonge en fonction du temps. La mesure de la déformation en fonction du temps (isotherme) ou en fonction de la température (isochrone) permet de tracer des courbes de fluage.

Avec la plupart des viscosimètres rotatifs cône-plateau, plateau-plateau et cylindre-cylindre, des essais de fluage en cisaillement sont réalisés. Pour les bitumes, ils s'effectuent le plus souvent avec

une géométrie du type cône-plateau pour des températures comprises entre 10 et 60°C et cylindre-cylindre pour les températures plus élevées [12].

Dans le domaine des basses températures, la courbe de fluage est obtenue par l'essai BBR (Bending Beam Rheometer) de fluage en flexion [12]. La flèche d'un barreau de bitume posé sur deux appuis et soumis à une charge centrale est mesurée (Figure I.7). Le barreau est immergé dans un bain dont la température est maintenue constante au cours de l'essai. La mesure de la déformation en fonction du temps sous charge constante $\epsilon(t)$ permet de calculer les modules pour différentes températures :

$$S(t,T) = \frac{PL^3}{4bh^3\Delta l(t,T)}$$

Avec

$S(t,T)$ =	module en flexion (Pa);
P =	charge (N)
L =	longueur du barreau entre les supports (mm)
b =	largeur du barreau (mm)
h =	épaisseur du barreau (mm)
$\Delta l(t,T)$ =	la flèche du barreau sous charge (mm)



Figure I.7: Principe de l'essai de BBR [12]

Essai de module complexe – sollicitation sinusoïdale

Les essais sous sollicitations sinusoïdales permettent de déterminer en particulier le module complexe d'un matériau viscoélastique linéaire. Avec des appareils à mouvement rotatif, par exemple un viscosimètre rotatif plan-plan (Figure I.8), le module de cisaillement G^* est mesuré. Le module complexe en traction-compression peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$E^* = 2G^*(1+\nu^*)$$

ν^* : coefficient de poisson complexe (0.5 pour matériaux incompressibles)

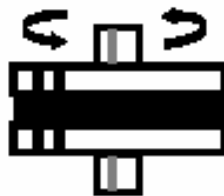


Figure I.8: Principe d'un rhéomètre rotatif plan-plan (DSR, Dynamic² Shear Rheometer) [12].

² Il est à noter que le terme « dynamique », couramment utilisé à tort, n'existe que si les phénomènes liés à l'accélération sont non négligeables (propagation d'ondes, etc.). Or, la sollicitation mécanique en question est *quasi-statique* (par opposition à dynamique) et *cyclique* (par opposition à monotone). Le terme de « rhéomètre à cisaillement dynamique » est également utilisé à tort [10].

L'éprouvette est soumise à des sollicitations sinusoïdales dans le domaine des petites déformations, ce qui assure que la réponse du matériau est viscoélastique linéaire. La réponse du matériau est également sinusoïdale avec un angle de déphasage caractéristique.

Mastics

Définition

Un mastic bitumineux est composé de bitume et de filler (encore appelé « fines » dont les grains ont une taille inférieure à $80\mu\text{m}$) [13]. Le mastic, composé par la suspension des fines dans le bitume, est le véritable liant dans un enrobé. Son rôle est de permettre une surface de contact suffisante entre les éléments du squelette granulaire, alors que l'épaisseur du film de liant enrobant les granulats ne doit pas être excessive car, dans ce cas, le liant risque de migrer sous l'action des sollicitations subies par la chaussée en service.

L'influence du filler

Les paramètres du filler influence considérablement les propriétés du mastic. Elles dépendent en particulier de [34] : la masse volumique des grains, la taille des grains (*i.e.* la surface spécifique des fines), le pourcentage de vides des fines, la nature du filler, la concentration fines/bitume, la forme des grains, l'angularité.

Enrobés bitumineux

Définition

Un enrobé bitumineux est un mélange de liant bitumineux (5 à 7 % en masse), de granulats et de fines. Les propriétés des liants utilisés s'avèrent très importantes : ils assurent l'adhésion entre les granulats et ils doivent présenter une consistance variable avec la température afin de faciliter la fabrication et la mise en œuvre [13]. En outre, il faut tenir compte du fait que le liant bitumineux transmet son comportement viscoélastique à l'enrobé.

Fabrication

Tant que la température est supérieure à 140°C environ [13], le bitume garde ses propriétés newtoniennes et s'écoule relativement facilement, ce qui facilite l'enrobage des granulats à la fabrication dite « à chaud ». Le malaxage des granulats et du bitume se fait généralement pendant une durée de 30 à 60 secondes. Le durcissement apparaît lors du refroidissement.

Afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage des granulats par un film mince, il faut définir une teneur en liant optimale, tout en évitant les effets défavorables, tels que l'orniérage (accumulation de déformations permanentes) des routes.

Essais de caractérisation sur enrobés bitumineux

Comportement mécanique des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux ont un comportement complexe. La Figure I.9 permet d'identifier les quatre types de comportements principaux des enrobés bitumineux en considérant l'amplitude de la déformation ε et le nombre de cycles de chargement appliqués [21].

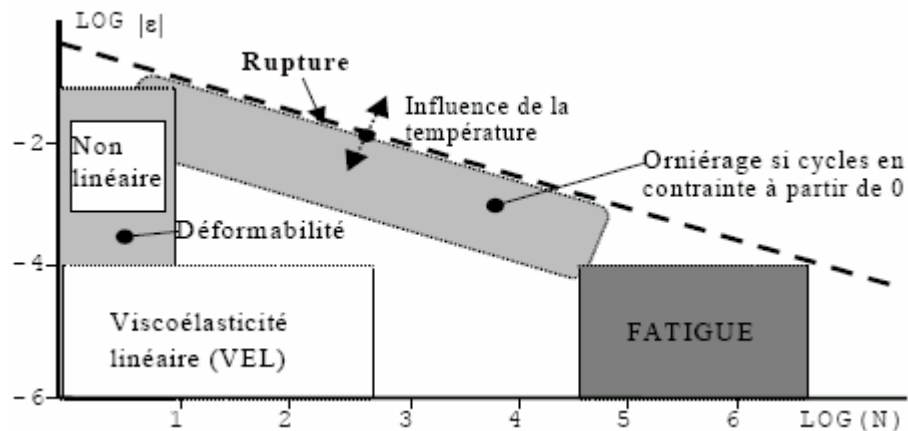


Figure I.9: Comportement des bétons bitumineux, ε déformation, N nombre de chargements [11]

- Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pourcents, le comportement observé est fortement non linéaire.
- Pour un faible nombre de chargements et des déformations faibles ($< 10^{-4}$) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.
- Lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des faibles déformations, les phénomènes d'endommagement apparaissent, le matériau se fatigue.
- En outre, lorsque des cycles déviatoires en contraintes sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables existent pour des amplitudes de déformation proches de la rupture. Leur accumulation crée de l'orniérage. C'est le quatrième type de comportement qu'il convient d'identifier [13].

Correspondant à ces quatre types de comportement, on peut considérer quatre propriétés mécaniques importantes pour les matériaux utilisés dans la fabrication des routes [13] :

- la rigidité, le module complexe (comportement viscoélastique linéaire),
- le comportement en fatigue,
- le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes (phénomène lié aux irréversibilités),
- la fissuration et la propagation de fissure au travers de la structure de chaussée (phénomène de fissuration par apparition de contraintes liées aux différentielles de température).

Module complexe

Une des possibilités pour décrire le comportement viscoélastique linéaire d'un matériau donné est de mesurer expérimentalement le module complexe. Pour ce faire, on utilise un signal de chargement sinusoïdal d'une fréquence f et d'une certaine amplitude, tout en s'assurant de travailler dans le domaine linéaire des petites déformations [13].

Le module complexe E^* est défini comme le rapport entre l'amplitude complexe de la contrainte sinusoïdale ($\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$) et l'amplitude complexe de la déformation résultante [13]. Compte tenu du comportement viscoélastique du matériau, la déformation accuse un retard sur la contrainte, ce qui se traduit par un angle de déphasage δ entre les deux signaux : $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$ (Figure I.10).

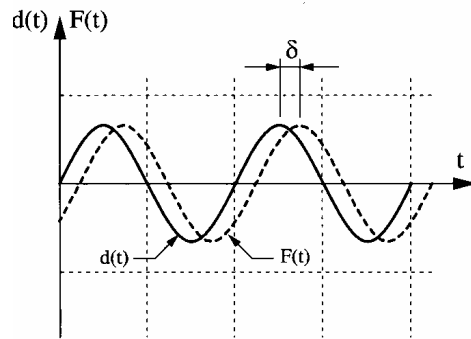


Figure I.10: Déphasage entre la sollicitation (force) et la réponse (déformation) du matériau [13]

En écriture complexe, E^* s'écrit :

$$\begin{aligned} E^* &= E_1 + i E_2 \\ E^* &= |E^*| e^{i\varphi} \\ E^* &= |E^*| (\cos\varphi + i \sin\varphi) \end{aligned}$$

où :

E_1 partie réelle, parfois appelée le module d'élasticité (Pa) [13]

E_2 module de perte (Pa) [13]

$|E^*|$ module ou la norme de E^* (Pa) [13]

φ angle de déphasage entre la contrainte et la déformation ($^\circ$) [13]

Afin d'interpréter les résultats de tels essais, des courbes isothermes (Figure I.11), qui présentent la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence en coordonnées bilogarithmiques pour chacune des températures d'essais sont tracées. La pente des isothermes permet d'estimer la susceptibilité cinétique du matériau, *i.e.* la variation du module avec la vitesse de sollicitation.

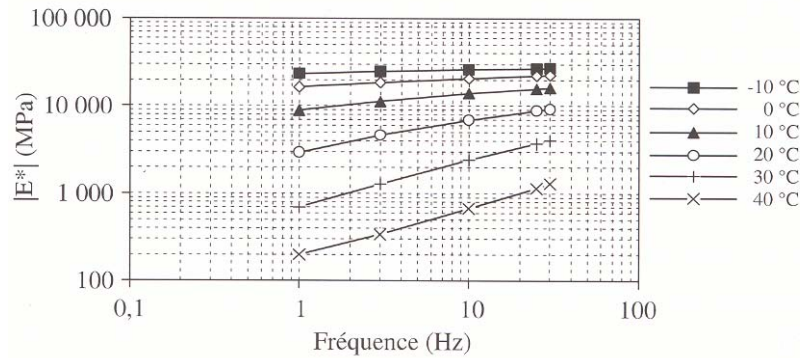


Figure I.11 : Isothermes d'un béton bitumineux [12]

Des courbes isochrones (Figure I.12) exprimées en coordonnées semi-logarithmiques sont obtenues en traçant inversement la norme du module complexe en fonction de la température pour chaque fréquence. La pente des isochrones permet d'estimer la susceptibilité thermique du matériau, *i.e.* la variation du module en fonction de la température.

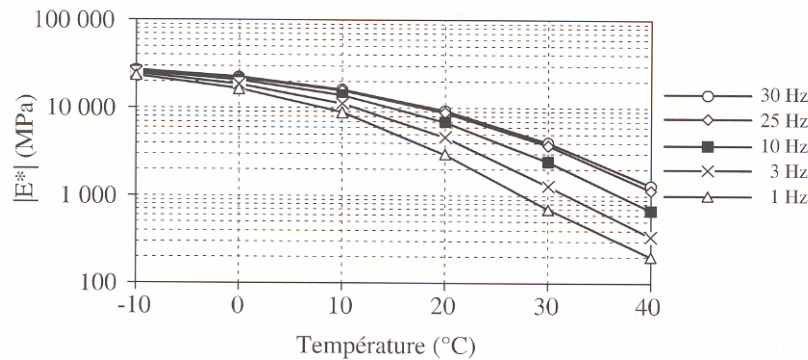


Figure I.12 : Isochrones du même matériau [12]

Une autre manière de présenter le module complexe est de le tracer dans un plan de Cole-Cole : la partie réelle se retrouve en abscisses et la partie imaginaire en ordonnées (Figure I.13). Lorsque le matériau obéit au principe d'équivalence temps-température (PETT), les résultats expérimentaux permettent de définir une courbe unique et continue.

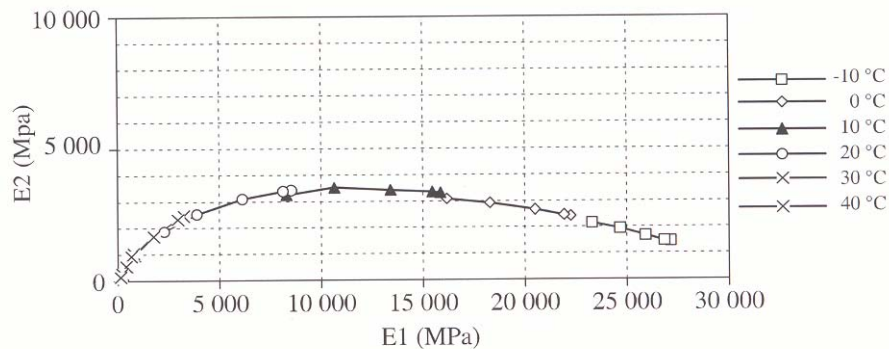


Figure I.13 : Module complexe dans le plan Cole-Cole pour le même matériau [12]

La représentation dans un espace de Black consiste à tracer le logarithme de la norme du module en fonction de l'angle de phase correspondant (Figure I.14). Comme dans un plan de Cole-Cole, les résultats permettent de définir une courbe unique et continue, lorsque le matériau suit le principe d'équivalence temps-température (PETT). Ce type de représentation est souvent utilisé pour visualiser la zone des modules faibles et en particulier la diminution d'angle de déphasage pour les hautes températures [4]. Ce « retour élastique » s'observe notamment pour les bitumes modifiés aux polymères [12].

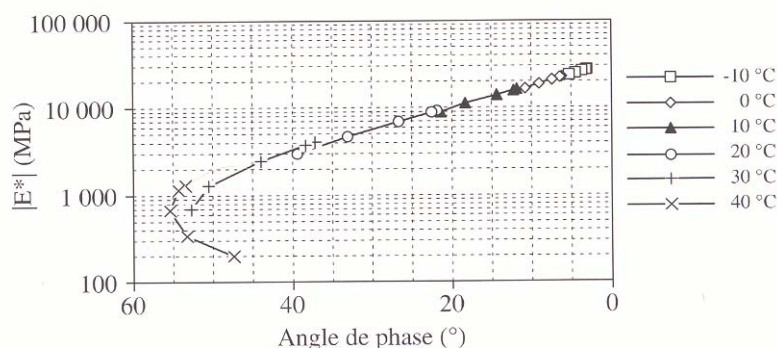


Figure I.14 : Module complexe dans l'espace de Black pour le même matériau [13]

Module résilient ou réversible

Le principe de l'essai du module réversible ou de l'anglais résilient, est d'appliquer une charge sous forme de pulsation sur l'éprouvette de type cylindrique d'un diamètre de 100mm ou de 150mm et d'une épaisseur de 50mm (Figure 4.12). Cet essai peut se réaliser à différentes températures. Plus la température d'essai est basse plus la valeur du module augmentera. Ce phénomène est en grande partie causé par le bitume dont ses propriétés mécanique dépendent de la température. Lors des chargements on mesure la dilatation du rayon perpendiculaire, au sens de la force appliquée. Le module résilient ou module réversible correspond au rapport de la contrainte répétée sur la déformation réversible. Ce module correspond en fait au module du matériau qui est considéré comme élastique, après l'application de plusieurs cycles de sollicitation. L'approximation par un comportement élastique est parfois très éloigné de l'observation. Il est important de noter que la répartition des contraintes au sein de l'éprouvette n'est pas homogène, ce qui peut rendre l'analyse des résultats plus difficile. Il est aussi difficile de s'assurer de demeurer dans le domaine visco-élastique. On peut donc induire des déformations plastiques qui peuvent biaiser les résultats.

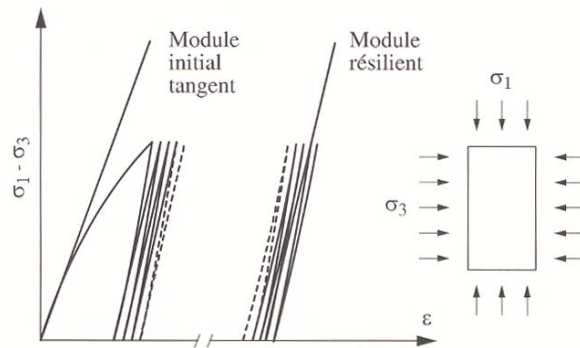


Figure I.15 : Courbe typique contrainte-déformation lors d'un essai de module résilient triaxial[13]

Principe d'équivalence temps-température (PETT)

Lorsque la courbe obtenue en traçant les composantes du module complexe dans le plan Cole-Cole ou dans l'espace de Black permet de définir une courbe unique et continue, le principe d'équivalence temps-température est valable. Les points de mesure se retrouvent en première approximation sur une courbe unique qui n'est influencée ni par la température, ni par la fréquence (Figure I.13 et Figure I.14).

Par voie de conséquence, on peut constater que, pour les bitumes purs et en première approximation pour les bitumes faiblement modifiés en polymère [10], il y a équivalence entre la température et la fréquence. Une même valeur de E^* peut être obtenue pour différents couples :

$$E^*(\omega_1, T_1) = E^*(\omega_2, T_2)$$

La courbe du module peut donc être paramétrée par une seule variable g , qui est fonction de la fréquence et de la température. Un tel corps est considéré *thermorhéologiquement simple*.

$$E^*(\omega, T) = E^*[g(\omega, T)]$$

Si les isothermes de $|E^*|$ sont tracées, on remarquera qu'en translatant les isothermes le long de l'axe des fréquences par rapport à une isotherme d'une température de référence $T_{\text{réf}}$ choisie arbitrairement, on obtient une courbe unique. Une telle courbe est appelée courbe maîtresse et elle couvre l'isotherme de $T_{\text{réf}}$. (Figure I.16) présente le cas d'une courbe maîtresse obtenue à $T_{\text{réf}} = 10^\circ\text{C}$ pour un bitume pur.

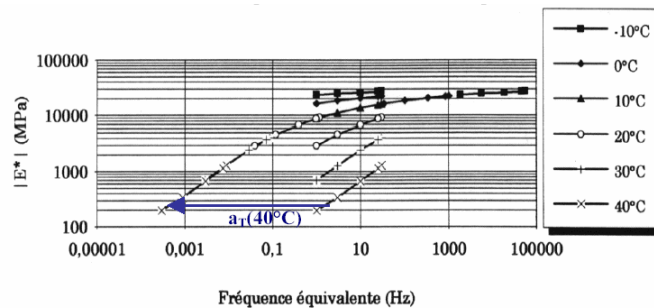


Figure I.16 : Exemple d'isothermes et de courbe maîtresse à 10°C d'un enrobé fabriqué avec un bitume pur [11]

Le facteur qui décrit la translation de la courbe, dit facteur de translation a_T , peut être calculé par des formules mathématiques :

$$g(\omega, T) = \omega \tau(T)$$

où τ est une fonction de la température T et est appelée temps de relaxation. Cette fonction peut être écrite de la forme suivante :

$$\tau(T) = \tau_0 a_T$$

avec a_T le facteur de translation. Il est égal à 1 à la température de référence choisie $T_{\text{réf}}$. L'évolution du facteur a_T peut être décrite par exemple avec la loi établie expérimentalement par William, Landel et Ferry (W.L.F) :

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{\text{réf}})}{C_2 + (T - T_{\text{réf}})}$$

où C_1 et C_2 sont des constantes du matériau qui varient avec la température de référence $T_{\text{réf}}$ [24]. La connaissance du facteur a_T et la création de la courbe maîtresse permet d'obtenir les modules pour des fréquences inaccessibles par l'expérimentation et ainsi les paramètres associés à basses et hautes fréquences.

Essai à l'ornérier

L'essai à l'ornérier consiste à soumettre une plaque de l'enrobé à tester au va-et-vient d'une roue chargée en surface (Figure I.17). Pendant l'essai la plaque est maintenue à une température constante dans une enceinte thermorégulée. On enregistre l'évolution de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de passage de la charge.



Figure I.17: Vue d'une plaque d'enrobé soumise à l'essai d'orniérage

Structure d'une chaussée

Une chaussée est habituellement constituée de plusieurs couches. Aujourd'hui, différentes compositions d'enrobés bitumineux sont utilisées selon leur fonction et leur localisation dans la structure de la chaussée. Généralement, les propriétés des granulats, la nature des fines minérales et la teneur en liant déterminent les caractéristiques mécaniques et fonctionnelles de chaque couche.

Dans le cas général, une route repose sur une assise de chaussée constituée d'une couche de fondation et une couche de base. Elles apportent à la chaussée l'essentiel de sa rigidité. Le rôle de l'assise de chaussée est de réduire les sollicitations dans les couches dues au trafic pour éviter des

déformations permanentes [13]. L'assise de chaussée est couverte d'une couche de surface qui se compose d'une couche de roulement et d'une couche de liaison entre celle-ci et la couche de base. La couche de roulement est exposée directement à l'action du trafic et du climat (Figure I.18).

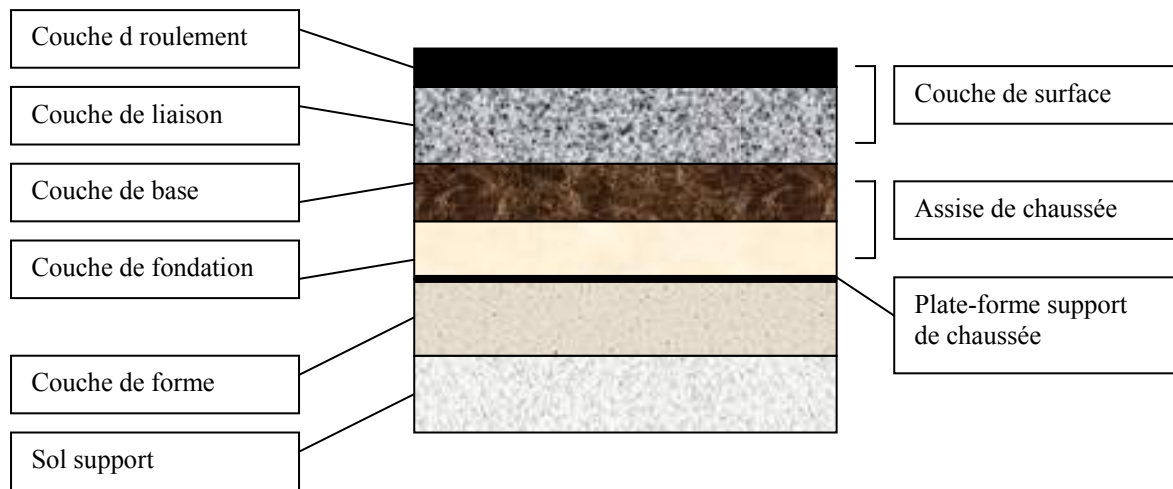


Figure I.18 : Coupe type d'une structure de chaussée souple

Sollicitations subies par la chaussée

Les routes sont soumises aussi bien à d'importantes sollicitations mécaniques qu'à de fortes influences thermiques. En outre, l'effet de vieillissement joue un rôle important (Figure I.19).

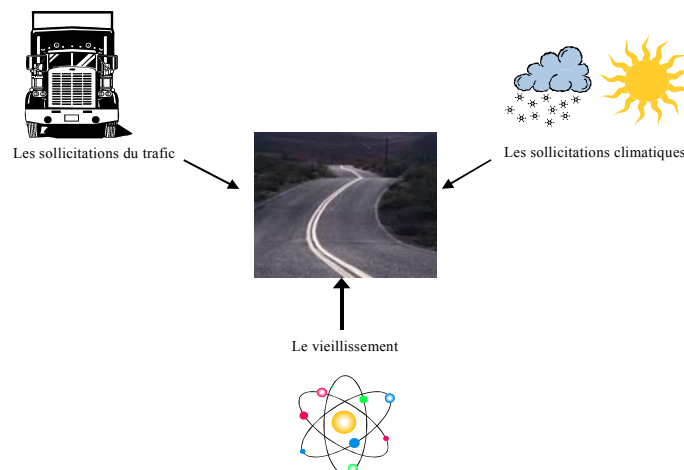


Figure I.19 : Sollicitations combinées agissant sur les chaussées routières

Concernant les sollicitations mécaniques, chaque couche de la structure d'une chaussée subit des écrasements et des efforts de flexion répétés sous l'effet du trafic, ce qui mène respectivement à des endommagements par orniérage ou par fatigue dans la chaussée (Figure I.20).

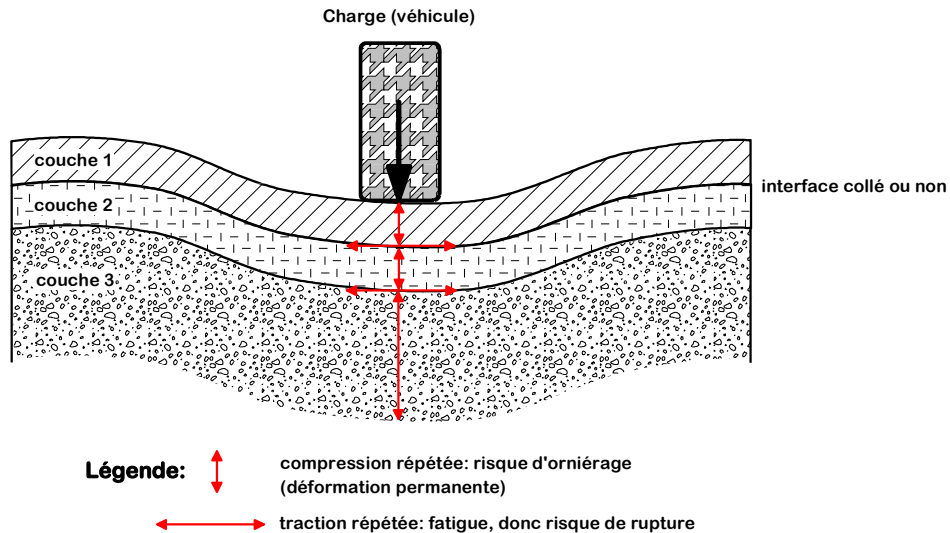


Figure I.20 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic [11]

Des fissures induites thermiquement peuvent apparaître transversalement lorsque les températures sont très basses, ce qui induit une nouvelle répartition des contraintes dans la structure de la chaussée (Figure I.21).

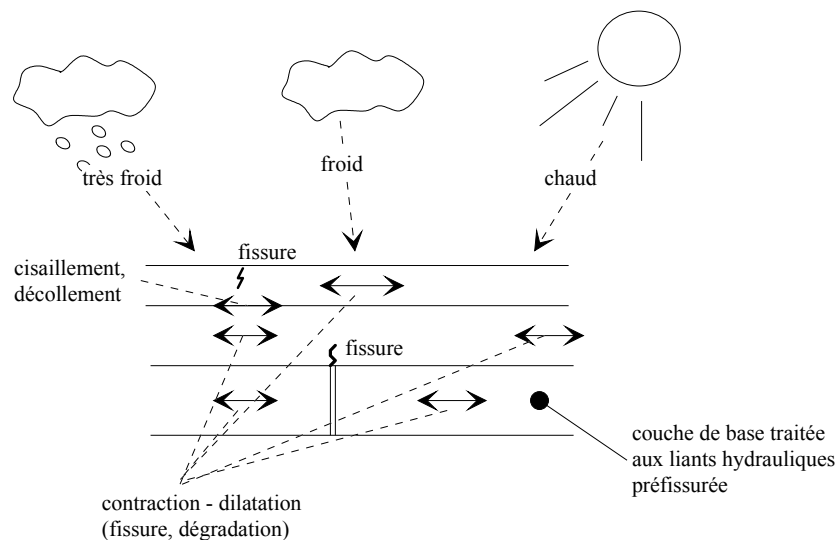


Figure I.21: Schématisation des sollicitations induites par la température [22]

Exception faite des couches ultra minces, chacune des couches bitumineuses de la structure d'une chaussée souple joue un rôle structural. Pour évaluer la fonction du matériau bitumineux dans le contexte des chaussées souples et en connaître son évolution potentielle vis-à-vis des effets combinés du trafic et de la température, il convient d'avoir une compréhension rigoureuse de quatre propriétés thermomécaniques de base (Di Benedetto et De La Roche, 1998) :

1. Le module et sa dépendance vis-à-vis de la température et du mode de chargement : maîtriser la notion de module complexe;

2. L'endommagement sous chargements répétés dû à l'action de sollicitations de faibles intensités (quelques dizaines de microdéformations mesurées en bas de couche des matériaux bitumineux) : c'est le phénomène fatigue des matériaux bitumineux;
 3. L'évolution des déformations permanentes : l'orniérage;
- La fissuration et la propagation des fissures aux basses températures.

ANNEXE II

Résumé projet bardeaux postconsommation : 3R MCDQ – RECYC QUÉBEC - LUCREB

INCORPORATION DE PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION DANS LES ENROBÉS BITUMINEUX

F. NOËL, D. PERRATON, A. CARTER

LUCREB École de Technologie Supérieure

Décembre 2006

Résumé

Au Québec, chaque année, entre 170 000 et 200 000 tonnes de bardeaux d'asphalte sont retirées des toitures à la fin de leur vie utile pour être remplacées. En ce moment, toutes ces tonnes de matériaux sont disposées dans des sites d'enfouissement de matériaux secs. Bien sûr pour disposer de ces débris les entrepreneurs doivent déboursier un certain montant. Plutôt que de simplement disposer de ces débris, il est envisageable d'en tirer bénéfice par une action de recyclage. Le recyclage des bardeaux d'asphalte de postconsommation présente un bénéfice environnemental non négligeable, dû à la diminution de bardeaux dans les sites d'enfouissement. D'autre part, un bénéfice économique est également significatif car il est possible de diminuer la consommation des matières premières par remplacement des composantes par des bardeaux recyclés.

Ce rapport présente en premier lieu, les différentes applications potentielles connues. Ensuite il traite plus en détail d'une application ciblée pour le recyclage de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, laquelle prend en compte une contrainte de mise en marché importante, à savoir la taille de déchetage. Dans le but d'incorporer le plus grand volume possible de bardeaux, l'application la plus pertinente est certainement l'incorporation dans les enrobés bitumineux. Plus spécifiquement, les enrobés utilisés pour les routes rurales et régionales, gérées par les villes ou municipalités, présentent un intérêt marqué puisque ces infrastructures routières représentent plus de 72 pour cent des routes au Québec. À ce titre, de par sa polyvalence, l'enrobé EB-14 correspond le mieux à ce type de construction. En effet, cet enrobé à chaud, peut servir aussi bien de couche de surface ou encore de couche de base.

Une revue de la littérature a permis de déterminer les différentes composantes des bardeaux de postconsommation ainsi que certaines de leurs caractéristiques et de connaître de quelle façon ces composantes interagissent une fois incorporées à l'enrobé. La revue de la littérature a également permis de mettre en relief le mode d'incorporation approprié et préconisé des particules de bardeaux de postconsommation. La composition des matériaux récupérés, lors de rénovation de toitures, montre que la présence de matériaux indésirables est relativement faible. A priori, l'enlèvement des matières non désirables ne présente donc pas un obstacle majeur, notamment en favorisant le tri à la source. Également, différentes méthodes de formulation sont reportées dans la littérature et les dosages optimaux de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation diffèrent grandement. Les dosages optimaux peuvent varier (de 1 à 25%) selon les matières premières utilisées. D'un point de vue mécanique, la littérature souligne que l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans un enrobé a pour effet d'accroître son module résilient (M_r). D'un point de vue structural, c'est donc dire, que pour des épaisseurs de couches constantes, l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation réduit la déflexion de la chaussée. Il a aussi été démontré, par des essais de laboratoire, que la résistance à l'orniérage est grandement améliorée par l'ajout de particules de bardeaux de postconsommation.

Dans la perspective d'évaluer la faisabilité d'incorporer des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation au sein d'enrobés bitumineux, un programme d'essais exploratoires a donc été élaboré pour l'enrobé bitumineux EB-14. Le programme d'essais exploratoires a porté notamment sur deux niveaux : 1) Une analyse partielle quant aux composantes des bardeaux, et 2) Une évaluation sommaire des performances permettant aux donneurs d'ouvrages de porter une appréciation de l'enrobé avec bardeaux, soit d'un point de vue structural (mesure du M_r) et d'un point de vue durabilité. Ce dernier étant essentiellement abordé d'un point de vue «*Mix design*» et ce, en référence aux exigences liées à la formulation de l'enrobé EB-14.

Tous les essais exploratoires ont été réalisés dans les laboratoires de LUCREB. Une formulation établie suivant le principe de la méthode Marshall a été fixée pour déterminer la quantité optimale de particules de bardeaux de postconsommation pouvant être incorporée dans l'enrobé EB-14. Des enrobés incorporant 0; 2,5; 5; 7,5 et 10% (% de la masse d'enrobé) de particules de bardeaux de postconsommation ont été réalisés. La détermination de la teneur optimale en particules de bardeaux de postconsommation a été établie sur la base des critères fixés par le ministère des Transports du Québec concernant l'enrobé EB-14. L'enrobé incorporant 5% de particules de bardeaux de postconsommation, désigné EB-14BX5, a été retenu pour la suite des essais exploratoires visant à évaluer l'ordre de grandeur de ses performances mécaniques.

Dans le but de comparer son comportement mécanique à partir de la mesure des modules réversibles des modules complexes et de retrait thermique empêché, des essais ont été réalisés sur l'enrobé EB-14 BX5 et sur un mélange témoin EB-14 sans bardeau. Les différents résultats sont très encourageants. Le tableau II.1 présente la synthèse des critères cibles à rencontrer (*INPUT*), en correspondance aux spécifications de l'enrobé EB-14, et la synthèse des critères mesurés (*OUTPUT*) de l'enrobé EB-14BX5. Les résultats des essais de module réversible (M_r) montrent que la résistance de l'enrobé EB-14BX5 est supérieure à celle de l'enrobé de référence. Notamment, le M_r de l'enrobé EB-14BX5 est deux fois celui de l'enrobé de référence à 10°C-10Hz. Par ailleurs, les résultats d'essais de modules complexes montrent également une bonne réponse en petites déformations de l'enrobé EB-14BX5 aux différentes fréquences de sollicitation et de températures.

Tableau II.1 : Synthèse des critères cibles à rencontrer pour l'enrobé EB-14BX5 (*INPUT*-spécifications d'un EB-14 : méthode de formulation Marshall) et synthèse des critères mesurés (*OUTPUT*)

	Critères cibles EB-14 (<i>INPUT</i>)	Critères mesurés EB-14BX5 (<i>OUTPUT</i>)
Stabilité Marshall (N)(min)	9 000	16 500
Fluage Marshall (mm)	2,0-4,0	3,5
vides (%)	2,0-5,0	4
Compacité (%min)	92%	96
Résistance orniérage	10% max.	Essai non réalisé
M_r (MPa) (20°C;1Hz)	>1000	3900

Bien que les résultats obtenus des essais préliminaires soient très positifs, il n'en demeure pas moins qu'ils sont préliminaires et incomplets. Ces essais ont été effectués sur une seule source de bardeau et, de surcroît, concassé en laboratoire. Des séries d'essais complémentaires plus exhaustives sont requises pour préciser les performances en petites déformations (E^* et M_r), à la fatigue, à l'orniérage et aux basses températures. En effectuant ces essais sur des enrobés contenant divers pourcentages de bardeaux provenant de différentes sources, il sera possible d'évaluer l'impact précis de l'incorporation de particules de bardeaux de postcosommation sur les performances de l'enrobé. Il est impératif de cerner l'importance de la variabilité attendue de ces performances en variant les sources de bardeaux et par la suite suivant des conditions de mise ne œuvre en conditions de chantier : la mise en œuvre de planches d'essais jumelée à un suivi de performances rigoureux représente une voie à privilégier.