

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Ing.

PAR
Tomy MARCOTTE

ÉVALUATION DE L'EFFET DE LA TENEUR EN EAU SUR LE COMPORTEMENT À
L'ORNIÉRAGE ET SUR LE MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS SEMI-TIÈDES
COMPORTANT DES ENROBÉS RECYCLÉS

MONTRÉAL, LE 12 AOÛT 2013

©Tous droits réservés, Tomy Marcotte, 2013

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Alan Carter, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Perraton, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Robert Hausler, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Michel Vaillancourt, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 19 JUILLET 2013

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La rédaction et la présentation de ce mémoire ont pu être réalisées grâce au soutien, à l'aide et à l'encouragement de nombreuses personnes. Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement mon directeur de recherche, Alan Carter qui m'a soutenu et aidé tout au long de ce projet avec ces commentaires instructifs et ces astuces qui m'ont permis de progresser rapidement. De plus, je remercie mon co-directeur, Daniel Perraton, qui m'a soutenu et qui m'a souvent aidé à pousser plus loin ma réflexion dans les divers aspects de cette recherche.

Je tiens également à remercier toute l'équipe du Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure (ETS) qui a pris de leur temps afin d'effectuer mes essais en raison de mon absence à l'école. Je remercie particulièrement Francis Bilodeau, Sergio Canela, et Alberto Cardenas pour les essais de caractérisation du granulat bitumineux recyclé, les essais à l'orniéreur et le module complexe.

Également, ce mémoire n'aurait pu être complété sans l'aide de l'équipe de Construction Norascon qui m'a laissé leur laboratoire à ma disposition afin de formuler les enrobés et d'effectuer certains essais nécessaires à ma recherche.

Enfin, je tiens à souligner ma copine, ma famille est mes amis qui ont subi mon absence complète durant de nombreux soirs et fins de semaine afin que je puisse réaliser cet ouvrage. Leur patience, leur compréhension et leur encouragement m'ont donné à plusieurs reprises l'énergie nécessaire qui m'a été grandement utile afin de terminer cet ouvrage.

ÉVALUATION DE L'EFFET DE LA TENEUR EN EAU SUR LE COMPORTEMENT À L'ORNIÉRAGE ET SUR LE MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS SEMI-TIÈDES COMPORTANT DES ENROBÉS RECYCLÉS

Tomy MARCOTTE

RÉSUMÉ

L'industrie des enrobés est en constante recherche de réduction de coûts d'énergie et d'impacts néfastes sur l'environnement. Depuis quelques années, les enrobés à basse énergie (EBE), ou semi-tièdes, ont été développés afin de diminuer considérablement ces aspects. La principale caractéristique de ces enrobés est un enrobage en dessous de 100 °C par un procédé de moussage de bitume produit par l'eau contenu dans les granulats froids et humides.

Le présent programme expérimental permet de voir l'effet de la teneur en eau ajoutée dans un mélange à basse énergie sur le comportement mécanique de l'enrobé. L'évaluation du comportement a été réalisée avec l'essai d'orniérage et de module complexe sur un enrobé de surface largement utilisé au Québec, soit un ESG-10. Une quantité de 15 % de granulats bitumineux recyclés (GBR) a également été ajouté aux enrobés avec des teneurs en eau de 1 à 9 %, par rapport à la masse du GBR.

Les essais ont montré que c'est la teneur en eau initiale qui influence le plus la maniabilité des enrobés et non la teneur en eau résiduelle qui est presque identique pour tous les EBE. De plus, les EBE possèdent un pourcentage de déformation à l'orniérage plus petit que l'enrobé à chaud à faible nombre de cycles. Cependant, les déformations des EBE augmentent plus rapidement par la suite par rapport à l'enrobé à chaud. Ensuite, les déformations deviennent très semblables à grand nombre de cycles pour l'enrobé à chaud et EBE.

Les essais des modules complexes ont montré que la norme du module complexe diminuait avec l'augmentation de la teneur en eau initiale du GBR. De plus, l'effet de la teneur en eau est plus accentué pour des basses fréquences, soit en dessous de 1,0 Hz.

Globalement, l'effet de la teneur en eau initiale ajoutée aux enrobés semi-tièdes avec ajout de GBR ne semble pas avoir d'impact significatif sur le comportement à l'orniérage et le module complexe en comparaison avec les enrobés à chaud traditionnel.

Mots-clés : enrobés à basse énergie, EBE, enrobés semi-tièdes, teneur en eau, enrobés recyclés, GBR

ÉVALUATION DE L'EFFET DE LA TENEUR EN EAU SUR LE COMPORTEMENT À L'ORNIÉRAGE ET SUR LE MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS SEMI-TIÈDES COMPORTANT DES ENROBÉS RECYCLÉS

Tomy MARCOTTE

ABSTRACT

The asphalt industry is constantly seeking ways to reduce energy cost and negative impacts on the environment. In recent year, Low Energy Asphalt (LEA) or half warm-mix asphalt (HWMA) have been developed to significantly reduce these issues. The main feature of these mixes is the fact that the coating is done at temperature below 100 °C by a foaming process with water contained in the aggregates cold and wet.

The experimental program was setup to evaluate the effect of the amount of added water to half warm-mix asphalt on behavior of mix. The evaluation was carried out with the rutting resistance and complex modulus test on a dense-graded surface mix commonly used in Quebec, an ESG-10. 15 % of reclaimed asphalt pavement (RAP) was used with water content varying from 1 % to 9 % based on the weight of RAP.

Tests have shown that it is original content as influencing the handling of coated and uncoated the residual water content is almost identical for all LEA. The tests showed that half warm-mix asphalt have smaller deformation with low number of cycles. The initial rate of deformation is higher for LEA and rutting are very similar to hot mix asphalt (HMA) in high number of cycles.

The results of complex modulus show that the norm of the complex modulus decreases with the increase of the initial RAP water content. In addition, the effect of water content has more impact for frequencies below 1,0 Hz.

Overall, the effect of initial water content added to the half warm-mix asphalt with addition of RAP does not seem to have a significant impact on the behavior of rutting and the complex modulus in comparison with the HMA.

Keywords : low energy asphalt, LEA, half warm-mix asphalt, HWMA, water content, reclaimed asphalt pavement, RAP

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	3
1.1 L'enrobé.....	3
1.1.1 Rôles des constituants de l'enrobé	4
1.1.2 Les types d'enrobés.....	5
1.1.2.1 Graves-bitumes	6
1.1.2.2 Enrobés de liaison.....	6
1.1.2.3 Enrobés de surface	6
1.2 Les granulats	7
1.2.1 Caractéristiques des granulats recherchés pour les enrobés	7
1.2.1.1 Caractéristiques intrinsèques	7
1.2.1.2 Caractéristiques de fabrication.....	8
1.2.2 Granulométrie	9
1.2.2.1 Fuseau granulométrique.....	10
1.3 Le bitume et ses dérivés.....	11
1.3.1 L'origine du bitume	11
1.3.2 Composition du bitume.....	11
1.3.3 Comportement mécanique du bitume	13
1.3.4 Vieillissement du bitume	14
1.3.5 Le bitume dans l'enrobé.....	16
1.3.6 Bitumes avec polymères	17
1.3.7 Mousse de bitume	18
1.3.7.1 Origine de la mousse de bitume.....	18
1.3.7.2 Principe de la mousse de bitume.....	19
1.3.7.3 Caractérisation d'une mousse de bitume	20
1.3.7.4 Facteurs influençant la qualité d'une mousse de bitume	21
1.3.7.5 Facteurs influençant sur la qualité d'enrobage d'un enrobé à la mousse de bitume.....	25
1.4 Les propriétés mécaniques des enrobés à chaud.....	28
1.4.1 Résistance à l'orniérage	29
1.4.2 Résistance à la fissuration (par fatigue et par retrait thermique)	29
1.4.3 Résistance à l'arrachement et au désenrobage.....	30
1.4.4 Résistance à l'abrasion, à l'usure et imperméabilité.....	30
1.5 Utilisation de granulats bitumineux recyclés (GBR) dans les enrobés.....	30
1.5.1 Historique de l'utilisation de GBR dans les enrobés	31
1.5.2 Principales utilisations du GBR	31
1.5.3 Étapes préliminaires d'analyse du GBR	33
1.5.4 Comportement des enrobés avec GBR	34
1.6 Comportement thermomécanique des enrobés	36
1.6.1 Classe de comportement des enrobés	37

1.6.2	Module complexe.....	38
CHAPITRE 2 LES ENROBÉS À BASSE ÉNERGIE.....		41
2.1	Fondement et principe des enrobés à basse énergie.....	41
2.2	Utilisation d'adjuvants	44
2.3	Méthodes d'enrobage des enrobés à basse énergie.....	45
2.3.1	Méthode d'enrobage EBE 01	46
2.3.2	Méthode d'enrobage EBE 02	47
2.3.3	Méthode d'enrobage EBE 03	47
2.3.4	Méthode d'enrobage EBE 04	47
2.4	Production en centrale.....	48
2.5	Performance en chantier	49
2.6	Comportement thermomécanique des EBE	50
2.6.1	Impact de la teneur en eau dans le mélange.....	50
2.6.2	Ouvrabilité	52
2.6.3	Orniérage.....	55
2.6.4	Module complexe.....	56
2.7	Avantages et désavantages des enrobés à basse température	58
CHAPITRE 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL		61
3.1	Objectif du programme expérimental	61
3.2	Critères de formulation d'un enrobé	61
3.3	Enrobé ciblé	61
3.3.1	Caractéristiques de l'enrobé ciblé.....	63
3.4	Variables de formulation.....	64
3.4.1	Choix de la méthode d'enrobage des EBE	65
3.4.2	Choix des teneurs en eau.....	66
3.4.3	Type de bitume	67
3.5	Plan expérimental.....	67
3.6	Caractérisation des granulats	69
3.7	Formulation de l'enrobé.....	69
3.7.1	Choix des proportions granulaires	69
3.7.2	Calculs et ajustement des paramètres de formulation.....	70
3.8	Procédure d'essai à la PCG.....	71
3.8.1	Principe de l'essai	71
3.8.2	Détermination des températures de malaxage et de compactage.....	72
3.8.2.1	Enrobés à chaud	73
3.8.2.2	Enrobés à basse énergie (EBE)	73
3.8.3	Fabrication des enrobés pour l'essai à la PCG.....	74
3.8.3.1	Enrobés à chaud	74
3.8.3.2	Enrobés à basse énergie	75
3.8.4	Compaction des éprouvettes	75
3.9	Procédure d'essai à l'orniéreur	76
3.9.1	Principe de l'essai	76
3.9.2	Fabrication et compactage des plaques.....	77

3.9.3	Réalisation de l'essai à l'orniére.....	78
3.10	Essai de module complexe (mesure de E*)	79
3.10.1	Principe de l'essai	79
3.10.2	Préparation des éprouvettes	79
3.10.3	Procédure d'essai du module complexe.....	81
3.10.4	Traitements des données	82
3.10.5	Principe d'équivalence temps-température (PETT).....	84
3.10.6	Indice de qualité des données (I.Q.).....	85
3.10.7	Modèle 2S2P1D	87
CHAPITRE 4	CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA FABRICATION DES ENROBÉS	91
4.1	Granulats	91
4.1.1	Granulats de calibre 5-10 mm.....	92
4.1.2	Granulats de calibre 0-5 mm.....	93
4.1.3	Granulat de calibre 0-1,25 mm (Sable naturel).....	93
4.1.4	Filler94	
4.1.5	Granulats bitumineux recyclés (GBR).....	95
4.2	Bitume.....	96
CHAPITRE 5	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	99
5.1	Formulation des enrobés	99
5.1.1	Dosage en enrobé recyclé	100
5.1.2	Formule de mélange.....	100
5.1.2.1	Combiné granulométrique	100
5.1.2.2	Calibration des formules de mélange des enrobés	102
5.2	Températures des enrobés lors du malaxage et du compactage	104
5.3	Variation de la teneur en eau de l'enrobé lors du malaxage, de la cure et du compactage	106
5.4	Évaluation de la qualité de l'enrobage	107
5.5	Aptitude au compactage (PCG)	108
5.6	Résistance à l'orniéage	110
5.7	Module complexe.....	112
5.7.1	Enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28	112
5.7.2	Enrobés confectionnées avec un bitume PG 64-34.....	114
CHAPITRE 6	ANALYSE DES RÉSULTATS.....	117
6.1	Évolution de la température des EBE	117
6.2	Évolution de la teneur en eau des EBE.....	120
6.2.1	Enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28	120
6.2.2	Enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34	122
6.2.3	Comparaison de l'évolution de la teneur en eau expérimentale avec les modèles théoriques de conduction thermique	125
6.3	Aptitude au compactage.....	128
6.3.1	Enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28	128
6.3.2	Enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34	131

6.3.3	Comparaison entre les EBE avec bitume PG 58-28 et PG 64-34	133
6.3.4	Sommaire	135
6.4	Résistance à l'orniérage	135
6.5	Module complexe.....	139
6.5.1	Enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28	139
6.5.2	Enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34	143
6.5.3	Comparaison entre les modules vitreux (E_0)	146
6.5.4	Sommaire	147
CONCLUSION	149
ANNEXE I	NOTIONS COMPLÉMENTAIRES SUR LES GRANULATS	149
ANNEXE II	NOTIONS COMPLÉMENTAIRES SUR LES MÉLANGES GRANULAIRES.....	151
ANNEXE III	NOTIONS COMPLÉMENTAIRES SUR L'AJOUT EN CENTRALE DE GBR.....	159
ANNEXE IV	BILAN THERMIQUE DES ENROBÉS À BASSES ÉNERGIE CONFECTIONNÉS.....	163
ANNEXE V	PROCÉDURE DE CALIBRATION DU MODÈLE 2S2P1D POUR L'ANALYSE DE L'ESSAI DE MODULE COMPLEXE.....	169
ANNEXE VI	FICHES DESCRIPTIVES DE L'ENROBÉ ESG-10 AVEC LES BITUMES PG 58-28 ET PG 64-34.....	171
ANNEXE VII	FICHES DESCRIPTIVES DES BITUMES PG 58-28 ET PG 64-34.....	173
ANNEXE VIII	RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE.....	175
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		187

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1 Synthèse des facteurs d'influences relatifs aux propriétés de la mousse de bitume et des propriétés thermomécaniques des EBE	65
Tableau 3.2 Principales étapes du programme expérimental	68
Tableau 3.3 Température de chauffage et de malaxage des matériaux et des enrobés confectionnés	74
Tableau 5.1 Nomenclature des enrobés confectionnés	99
Tableau 5.2 Combiné granulométrique des enrobés confectionnés	100
Tableau 5.3 Proportions massiques finales de formulation des enrobés ESG-10 à chaud et EBE avec les bitumes PG 58-28 et PG 64-34	103
Tableau 5.4 Températures des composantes et des enrobés lors de l'essai à la PCG	105
Tableau 5.5 Évolution de la teneur en eau dans les EBE lors du malaxage, de la cure et de la compaction pour l'essai à la PCG	106
Tableau 5.6 Qualité de l'enrobage des EBE confectionnés pour l'essai à la PCG avec le bitume PG 58-28	108
Tableau 5.7 Moyenne des vides et des écarts-types de trois briquettes obtenus à l'essai PCG	110
Tableau 5.8 Pourcentage de déformation des enrobés à l'essai d'orniérage (repos plaque : 48 h à température du labo; température essais : $58 \pm 2^\circ\text{C}$)	111
Tableau 5.9 Constantes de calibration du modèle 2S2P1D pour les enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28	113
Tableau 5.10 Constantes de calibration du modèle 2S2P1D pour les enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34	114
Tableau 6.1 Bilan énergétique comparatif des données expérimentales et des calculs théoriques	127
Tableau 6.2 Pourcentage d'écart des déformations de la moyenne des plaques de l'enrobé HMA est des EBE avec le bitume PG 58-28 entre différents nombres de cycles	139

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Représentation en volume absolu d'un enrobé compacté.....	3
Figure 1.2	Représentation graphique de différentes granulométries.....	10
Figure 1.3	Structure des bitumes.....	12
Figure 1.4	Classe de comportement du bitume selon la température (T) et l'amplitude de la déformation ($ \varepsilon $).....	14
Figure 1.5	Indice de vieillissement du bitume selon les années de services	15
Figure 1.6	Procédé de moussage de bitume	19
Figure 1.7	Expansion de la mousse de bitume	21
Figure 1.8	Influence de la teneur en eau ajoutée et la température du bitume sur le coefficient d'expansion et le temps de demi-vie de la mousse de bitume.....	22
Figure 1.9	Optimisation de l'expansion et de la demi-vie de la mousse de bitume	24
Figure 1.10	Représentation de l'indice énergétique de mousse (FE) en fonction du rapport d'expansion (ER_a) et du temps (t)	25
Figure 1.11	Fuseau granulométrique approprié d'un enrobé pour l'enrobage à la mousse de bitume.....	26
Figure 1.12	Effet de la température et de la dimension des granulats sur l'enrobage à la mousse de bitume.....	28
Figure 1.13	Profondeur d'ornières pour différents enrobés	35
Figure 1.14	Courbes maîtresses du module complexe pour différents enrobés	36
Figure 1.15	Classes de comportement type des enrobés	38
Figure 1.16	Presse MTS au LCMB	39
Figure 1.17	Évolution des contraintes et des déformations d'un matériau viscoélastique linéaire lors d'un essai de module complexe	39
Figure 2.1	Différents types d'enrobé selon les températures de malaxage.....	42

Figure 2.2	Évolution de la température des matériaux durant le malaxage d'un enrobé à basse énergie	44
Figure 2.3	Quatre principales méthodes et d'étapes de malaxage d'EBE.....	46
Figure 2.4	Installation d'une usine pour la fabrication d'un enrobé EBE.....	49
Figure 2.5	Comparaison des énergies requise pour la production d'un enrobé à chaud et d'un EBE	50
Figure 2.6	Pourcentage de vides selon le nombre de girations pour trois températures de malaxage d'EBE (70 et 90 °C) et d'un enrobé à froid (20 °C) avec une teneur initiale en eau des granulats de 5 %.....	53
Figure 2.7	Évolution du pourcentage de vides selon le nombre de girations à la PCG pour un EBE (LEA) avec une teneur en eau initiale de 5 % et deux enrobés à chaud (HMA).....	54
Figure 2.8	Pourcentage de déformation d'un essai à l'orniére d'un enrobé à chaud (HMA) et d'un EBE (LEA) avec une teneur en eau initiale du GBR ajouté à froid de 5 %	56
Figure 2.9	Courbes maîtresses à 15 °C du module complexe pour deux types d'EBE (LEA) et d'enrobé à chaud (HMA) avec une teneur en eau initiale des granulats fins ajoutés à froid de 4 %	57
Figure 2.10	Modules complexes représentés dans le plan Cole-Cole pour deux enrobés à chaud (HMA) et un EBE (LEA) avec une teneur en eau du GBR ajouté à froid de 5 %.....	58
Figure 3.1	Critères de formulation des enrobés au MTQ.....	62
Figure 3.2	Courbe de masse volumique maximale et limites du fuseau granulométrique de l'enrobé ESG-10.....	64
Figure 3.3	Exemple d'une méthode d'enrobage en centrale continue d'un EBE avec ajout de GBR humide.....	66
Figure 3.4	Étape de calcul pour la formulation d'un enrobé	70
Figure 3.5	Principe de compaction de l'essai PCG.....	71
Figure 3.6	Presse à cisaillement giratoire utilisée de marque Troxler	72
Figure 3.7	Orniére LCPC utilisé pour les essais	76
Figure 3.8	Compacteur de plaque LCPC.....	77

Figure 3.9	Gabarit pour les prises de mesures de la profondeur d'ornières	78
Figure 3.10	Plan de carottage pour les éprouvettes du module complexe	80
Figure 3.11	Montage de l'éprouvette pour l'essai du module complexe	82
Figure 3.12	Résultats obtenus d'un module complexe dans le plan Cole-Cole et calage du modèle 2S2P1D	83
Figure 3.13	Représentation du principe d'équivalence temps-température.....	85
Figure 3.14	Représentation d'un bon indice de qualité du signal.....	86
Figure 3.15	Représentation d'un mauvais indice de qualité du signal	86
Figure 3.16	Représentation schématique du modèle 2S2P1D	87
Figure 3.17	Représentation graphique du calage des constantes du modèle 2S2P1D dans le plan Cole-Cole	89
Figure 4.1	Granulométrie des granulats utilisés pour la formulation.....	93
Figure 5.1	Granulométrie des enrobés par rapport aux points de contrôle du fuseau granulométrique et à la CMVM.....	101
Figure 5.2	Comparaison de la granulométrie des enrobés confectionnés versus le fuseau granulométrique favorable d'un enrobé confectionné à la mousse de bitume.....	102
Figure 5.3	Résultats des essais des modules complexes des enrobés avec le bitume PG 58-28 incluant la courbe du modèle 2S2P1D	113
Figure 5.4	Résultats des essais des modules complexes des enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34 incluant la courbe du modèle 2S2P1D	115
Figure 6.1	Températures après malaxage et après les essais à la PCG des EBE selon le type de bitume et la teneur en eau initiale du GBR	118
Figure 6.2	Évolution de la teneur en eau des EBE avec le bitume PG 58-28 lors du malaxage, de la cure et du compactage.....	121
Figure 6.3	Évolution de la teneur en eau des EBE avec le bitume PG 64-34 lors du malaxage, de la cure et du compactage.....	122
Figure 6.4	Évolution de la teneur en eau des EBE pour les enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28 et ceux confectionnés avec le bitume PG 64-34 après le malaxage, la cure et la compaction.....	123

Figure 6.5	Pourcentage de vides selon le nombre de girations pour les enrobés à chaud et EBE avec le bitume PG 58-28.....	129
Figure 6.6	Pourcentage de vides selon la teneur en eau initiale du GBR pour les EBE confectionnés avec un bitume PG 58-28.....	131
Figure 6.7	Pourcentage de vides selon le nombre de girations pour l'enrobé à chaud et EBE confectionnés avec un bitume PG 64-34	132
Figure 6.8	Pourcentage de vides selon la teneur en eau initiale du GBR pour les EBE confectionnés avec un bitume PG 64-34.....	133
Figure 6.9	Différence du pourcentage de vides moyens des EBE confectionnés avec un bitume PG 58-28 et PG 64-34 selon la teneur en eau initiale du GBR ($T_{compacate}$: 95 °C).....	134
Figure 6.10	Évolution du pourcentage d'ornière moyen des deux plaques selon le nombre de cycles à chaud des EBE avec le bitume PG 58-28.....	136
Figure 6.11	Évolution de l'orniérage des EBE avec le bitume PG 58-28 selon la teneur en eau initiale ajoutée.....	138
Figure 6.12	Résultats dans le plan Cole-Cole des modules complexes des enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28.....	140
Figure 6.13	Courbes maîtresses à 10 °C des enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28	141
Figure 6.14	Évolution des écarts des coefficients de la norme du module complexe pour les enrobés EBE confectionnés avec le bitume PG 58-28 ($T_{réf}$: 10 °C).....	143
Figure 6.15	Résultats dans le plan Cole-Cole des modules complexes des enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34.....	144
Figure 6.17	Évolution des écarts des coefficients de la norme du module complexe pour les enrobés EBE confectionnés avec un bitume PG 64-34 ($T_{réf}$: 10 °C).....	145
Figure 6.18	Effet de la teneur en eau et du type de bitume sur le module vitreux (basses températures) et sur la norme du module complexe à 10°C et 0,003 Hz (hautes températures) des différents enrobés confectionnés	147

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2S2P1D	<i>2 springs, 2 parabolic, 1 dashpot</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
CMVM	Courbe de masse volumique maximale
CSA	Canadian Standards Association
EBE	Enrobé à basse énergie
EBT	Enrobé à basse température
ESG	Enrobé semi-grenu
EBE	Enrobé à basse énergie
GBR	Granulat bitumineux retraité
DGM	Dimension de grosseur maximale
DGNM	Dimension de grosseur nominale maximale
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DTT	<i>Direct Tension Test</i>
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
IQ	Indice de qualité
L.A.	Essai Los Angeles
LEA	<i>Low Energy Asphalt</i>
LC	Laboratoire des Chaussées du MTQ
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux de l'ÉTS

LCPC	Laboratoire Central sur les Ponts et Chaussées
MLPC	Matériau du Laboratoire des Ponts et Chaussées
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MTS	<i>Materials Testing System</i>
NQ	Normalisation du Québec
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PETT	Principe d'équivalence temps-température
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
VAM	Vides intergranulaires
VEL	Viscoélastique linéaire
PG	<i>Performance grade</i> (Grade de performance du bitume)
PCG	Presse à cisaillement giratoire
TCD	Traction-compression directe
WLF	Loi de Williams-Landel-Ferry

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
©	Copyright
°C	Degré Celsius
a_T	Facteur de translation dans l'essai de module complexe
β	Contrainte moyenne du signal sinusoïdal
cm^3	Centimètre cube
C_p	Capacité de chaleur massique
$ C^*_E $	Coefficient du module complexe
d_b	Densité du bitume
d_{ga}	Densité apparente
d_{gb}	Densité brut du granulat
d_{ge}	Densité effective du granulat
d_{mm}	Densité maximale du mélange
E^*	Module complexe
E_{00}	Module statique du module obtenu lorsque ω tend vers 0
E_0	Module instantané du module obtenu lorsque ω tend vers l'infini
E_r	Coefficient d'expansion
E_{rm}	Coefficient d'expansion maximale
$ \varepsilon $	Déformation
$ E^* $	Norme du module complexe
FI	Indice de mousse
FE	Indice énergétique de mousse

Fr	Fréquence
g	Gramme
Hz	Hertz
J	Joule
kg	Kilogramme
kJ	Kilojoule
kN	Kilo Newton
kPa	Kilo Pascal
m	Masse
mm	Milimètre
MPa	Méga Pascal
n/a	Non applicable
n/d	Non disponible
Pa	Pascal
Pa·s	Pascal·seconde
P _b	Pourcentage de bitume dans l'enrobé
P _{ba}	Pourcentage de bitume absorbé par les granulats
P _{bi}	Pourcentage de bitume initial dans l'enrobé
Q	Énergie
s	Seconde
S	Écart-type
S ₀	Module de rigidité

μm	Micromètre
t	Temps
$t_{1/2}$	Temps de demi-vie
T	Température
T_b	Température basse de caractérisation du bitume
T_e	Température élevée de caractérisation du bitume
T_f	Température finale
TG	Total granulométrique
T_i	Température initiale
VAM	Volume intergranulaire
VCB	Vides comblé par le bitume
V_b	Volume de bitume total
V_{ba}	Volume de bitume absorbé
V_{be}	Volume de bitume effectif
VEL	Viscoélastique linéaire
V_{gb}	Volume brut du granulat
V_{ge}	Volume effectif du granulat
V_i	Vides interstitiels
V_{mb}	Volume brut du mélange
V_{mm}	Volume maximal du mélange sans vides interstitiels
ω	Pulsation donnée par $\omega = 2\pi f_r$

INTRODUCTION

Les chaussées en enrobé sont actuellement le type de chaussée le plus utilisé au Canada. L'incertitude des marchés pétroliers, les coûts sans cesse à la hausse, le manque de granulat de qualité et les enjeux environnementaux n'ont jamais été autant d'actualité qu'en ce moment. Des études récentes ont montré l'impact majeur de la production d'enrobé sur les impacts environnementaux de la construction routière en général (Forfylow et Middleton, 2008). L'industrie de l'enrobé n'a eu d'autre choix que de s'adapter à ce nouveau contexte.

Depuis le début des années 2000, plusieurs procédés d'enrobage tièdes ont vu le jour afin d'abaisser la température de malaxage des enrobés de l'ordre de 10 °C à 40 °C selon le procédé (Forfylow et Middleton, 2008) et ainsi réaliser une réduction de coût, d'énergie et d'émissions polluantes. Également, l'utilisation de granulats bitumineux recyclés (GBR) est en constante augmentation, soit pour la réutilisation en centrale d'enrobage ou pour le retraitement en place des chaussées.

Plus récemment, et toujours dans l'idée de produire des enrobés aux meilleurs coûts et moins polluants, Fairco et Eiffage travaux publics ont développé vers le milieu des années 2000, les enrobés à basse énergie (EBE) ou connu sous l'acronyme anglais LEA (*Low Energy Asphalt*). Le niveau d'économie énergétique des EBE est considérable. D'après plusieurs études, une économie d'environ 50 % d'énergie avec les EBE est possible comparativement de 10 à 30 % pour les enrobés tièdes par rapport à des enrobés à chaud standard (Ventura et al. 2008). De plus, l'utilisation de GBR avec les EBE permet d'accroître davantage cette économie énergétique.

Le concept principal des enrobés à basse énergie est de produire un enrobage en dessous de 100 °C. Pour ce faire, le moussage du bitume (injection d'eau et de bitume) est nécessaire afin de bien enrober les granulats. Le principe est de sécher et malaxer la partie grossière des granulats avec le bitume chaud et d'y ajouter, par la suite, le granulat fin et humide.

Le procédé de mousse de bitume est utilisé de façon régulière depuis le milieu des années 90. Donc, les enrobés à basse énergie utilisent des techniques d'enrobage relativement nouvelles comparativement aux enrobés à chaud. La connaissance sur le comportement mécanique de ces enrobés à court terme est en pleine évolution et celui à long terme est peu connu. Dans cette ligne d'idée, ce mémoire se concentre sur l'étude du comportement mécanique des enrobés à basse énergie. Le but principal est de déterminer si le comportement à l'orniérage et en petite déformation (E^*) d'un EBE est semblable à celui d'un enrobé à chaud standard et d'en déterminer un pourcentage d'humidité optimal des granulats humides pour un enrobage et des performances adéquates.

Des GBR contenant divers pourcentages d'humidité, afin de représenter la variation constante de l'humidité dans une réserve extérieure exposée aux intempéries, ont été utilisées dans les EBE. Le présent mémoire débute avec une synthèse de la littérature des éléments importants des enrobés. Par la suite, la notion d'enrobé à basse température est approfondie. Ensuite, la méthodologie expérimentale réalisée est décrite. Les essais d'aptitude au compactage, de la résistance à l'orniérage et l'essai de module complexe ont été réalisés sur les différents enrobés.

Les quatrième et cinquième chapitres présentent les résultats sur les caractéristiques des granulats utilisés ainsi que sur les résultats des essais de comportement des EBE comparativement aux enrobés à chaud. En dernier lieu, les résultats sont analysés et un bilan est présenté sur les principaux éléments traités et sur les connaissances acquises.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

1.1 L'enrobé

L'enrobé est un mélange de matériau granulaire auquel est ajouté un liant hydrocarboné appelé bitume (Langlois, 2005). De façon plus précise, ce mélange comporte de la pierre, du sable, du filler et du bitume. Chaque composante est préalablement définie et joue un rôle spécifique selon l'utilisation désirée. De façon générale, la masse totale de l'enrobé, en pourcentage massique, se compose de 93 % à 96 % de granulat et de 4 % à 7 % de bitume (Lelièvre, 1994).

Une méthode pour représenter les constituants d'un enrobé est d'employer une représentation en volume absolu. Celle-ci prend en compte les différentes densités des constituants. Cette méthode est présentée à la Figure 1.1.

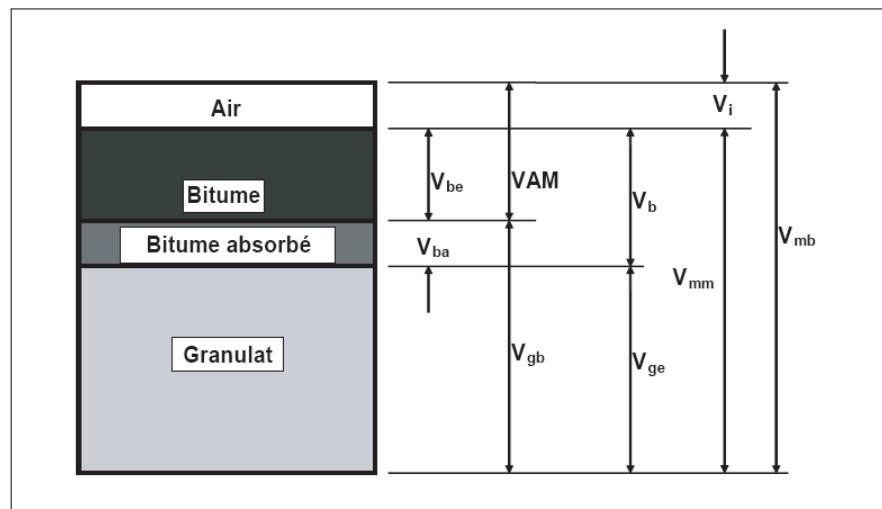


Figure 1.1 Représentation en volume absolu d'un enrobé compacté
Tirée de Langlois (2005, p. 38)

où les termes suivants signifient :

V_{be} : Volume de bitume effectif,

V_{ba} : Volume de bitume absorbé,

VAM : Volumes des vides intergranulaires,

V_{gb} : Volume brut du granulat,

V_b : Volume total de bitume,

V_{ge} : Volume effectif du granulat,

V_{mm} : Volume de l'enrobé sans vides interstitiels,

V_i : Volume des vides interstitiels,

V_{mb} : Volume brut de l'enrobé compacté.

Avec cette représentation volumétrique, les enrobés possèdent, de façon générale, environ 6 à 9 % d'air, 6 à 16 % de bitume et 75 à 85 % de granulats. Bien entendu, ces données sont pour un enrobé fraîchement mis en place et compacté (Lamothe, 2004).

En définitive, l'enrobé est composé de deux grandes phases, soient la phase grossière des gros granulats ainsi que la matrice. La matrice forme un mortier et est composée du mélange du bitume et des granulats fins. Notons que la portion des vides dans le mélange (V_i) est partie prenante de la matrice. (Kim *et al.* 2004).

1.1.1 Rôles des constituants de l'enrobé

Afin de déterminer les proportions à choisir, les caractéristiques des composantes de l'enrobé doivent être connues. Il existe plusieurs paramètres qui peuvent être mesurés afin de caractériser les granulats. Une attention particulière doit être apportée à la granulométrie utilisée en fonction du type d'usage envisagé. Le mélange des granulats grossiers (pierres), des granulats fins (sable et filler) et du bitume permet d'obtenir un enrobé possédant un pourcentage de vides ciblés afin de posséder des comportements mécaniques favorables pour résister à l'orniérage, à la fissuration, à l'infiltration d'eau, etc (Langlois 2005). Également, le

squelette granulaire formé, par ces granulats, permet de distribuer et transférer les charges dans l'enrobé vers les couches inférieures en résistant au cisaillement par le contact entre les grains.

En ce qui concerne le filler, il aide légèrement au soutien des charges, car il est en grande majorité en suspension dans le bitume. Il contribue davantage à augmenter la cohésion du bitume ainsi qu'à réduire les vides interstitiels (Di Benedetto *et al.*, 2005).

Enfin, l'air existant dans l'enrobé permet de créer une zone tampon lors d'application de charge et permet également de bien enrober tous les granulats par un mince feuil de bitume. Toutefois, son utilité est bien plus importante. Il ne faut pas négliger ce pourcentage d'air même s'il ne représente qu'un faible volume du mélange. Celui-ci influence directement la durabilité de l'enrobé, son imperméabilité, sa résistance à l'orniérage ainsi qu'au cycle de gel et dégel (Lamothe 2004).

1.1.2 Les types d'enrobés

Un enrobé possède des caractéristiques et des propriétés physiques et mécaniques propres en fonction du squelette granulaire employé ainsi que de la classe et de la teneur en bitume utilisée (Di Benedetto *et al.* 2005). Plusieurs types d'enrobés existent et sont identifiés selon la position de la couche de l'enrobé dans la structure de chaussée ainsi que par la fonction désirée. Par ailleurs, les enrobés peuvent être distingués selon la méthode d'incorporation du bitume au mélange. Notamment, on distingue trois grands types de mélange (Di Benedetto *et al.* 2005), soient :

1. Les enrobés à chaud,
2. Les enrobés à froid à base d'émulsion, de mousse de bitume ou de liants mixtes hydrocarbonés/hydrauliques,
3. Les mélanges à base d'émulsion ou de bitume fluxé (cutback) utilisés en traitement de surface.

Au Québec, le Ministère des Transports du Québec (MTQ) différencie les enrobés à chaud en trois différents types en fonction des constituants, de leur rôle et de leur emplacement dans la structure de chaussée. Ces types sont les graves-bitumes, les enrobés de liaison et les enrobés de surface.

1.1.2.1 Graves-bitumes

Les graves-bitumes sont des enrobés utilisés en couche de base possédant une granulométrie grossière (jusqu'à 28 mm), une faible teneur en bitume (3 à 4,5 %) et sont employés sur des épaisseurs de 60 à 150 mm. Avec ces particules grossières, ces enrobés possèdent une très bonne capacité à supporter les charges en raison du contact entre les granulats. Ces enrobés sont utilisés comme couche de base dans le revêtement (Langlois, 2005).

1.1.2.2 Enrobés de liaison

Les enrobés de liaison sont employés entre les couches de graves-bitumes et d'enrobé de surface. Ils sont constitués avec des granulats allant jusqu'à 14 mm et possèdent une teneur en bitume légèrement supérieure à celle des graves-bitumes (4 à 5,2 %). Ces enrobés sont employés en couche mince d'environ 60 mm. Ces enrobés sont mis en oeuvre à forte compacité pour servir de couche étanche, de protection thermique, pour réduire le potentiel de la remontée des fissures et souvent pour corriger le profil (Langlois, 2005).

1.1.2.3 Enrobés de surface

Les enrobés de surface englobent les chapes d'étanchéité, les enrobés denses, grenus, semi-grenus ainsi que les enrobés drainants. Tous ces types d'enrobés sont définis plus spécifiquement en fonction des matériaux utilisés, de l'épaisseur de pose et de la résistance aux charges totales prévues occasionnées par le passage des véhicules. Cette couche de surface, la couche de roulement, possède des granulats de grosseur maximale de 5 à 14 mm et est utilisée afin d'offrir à l'usager de la route un confort et une sécurité.

De plus, les enrobés de surface protègent et augmentent la durabilité des couches inférieures en bloquant les infiltrations d'eau et les sels de déglaçage, lesquels sont amplement utilisés lors des hivers québécois (Langlois, 2005).

1.2 Les granulats

Le mot granulat signifie un ensemble de particules de formes, de dimensions et de natures différentes provenant de la roche ou d'un matériau recyclé (Aïtcin *et al.* 1992). Tel que vu auparavant, les granulats représentent la majeure partie, en masse et en volume, d'un enrobé ce qui signifie que le choix de leurs dimensions, de la qualité et des autres caractéristiques est une partie très importante de la formulation d'enrobé. Cette étape est donc cruciale afin d'obtenir les caractéristiques et performances désirées de l'enrobé.

1.2.1 Caractéristiques des granulats recherchés pour les enrobés

Au Québec, les granulats employés dans les enrobés sont caractérisés selon divers critères, dépendamment des fins ou des gros granulats. Il existe trois catégories de caractéristiques, soit les caractéristiques intrinsèques, de fabrication et complémentaires.

1.2.1.1 Caractéristiques intrinsèques

Les caractéristiques intrinsèques dépendent des propriétés de la roche, soit la dureté et la ténacité pour le gros granulat et la friabilité pour le granulat fin. Ces caractéristiques sont propres et ne peuvent pas être modifiées.

Au Québec, pour la fabrication des gros granulats, la norme exige des critères de résistance à l'usure et à la fragmentation des particules. L'usure d'un granulat utilisé comme matériau routier se produit par la création de fine lors des passages répétés des véhicules ainsi que par le frottement mutuel des granulats. La méthode d'essai LC 21-070 (Détermination du pourcentage d'usure par attrition du gros granulat au moyen de l'appareil Micro-Deval) permet d'évaluer la résistance à l'usure du granulat. La seconde caractéristique intrinsèque

pour le gros granulat est la résistance aux chocs. L'essai LC 21-400 (Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles) permet d'obtenir la résistance à la fragmentation par chocs ainsi que l'usure provoquée par le frottement réciproque des granulats. Sur les routes, ces chocs peuvent être représentés par le compactage de l'enrobé ainsi que par le trafic pouvant entraîner une fragmentation par fatigue des granulats.

En ce qui concerne les granulats fins, la norme exige des critères de résistance à l'usure et à la friabilité. La méthode d'essai LC 21-101 (Détermination du pourcentage d'usure par attrition du granulat fin au moyen de l'appareil Micro-Deval) permet d'obtenir la résistance à l'usure des granulats fins. Également, un essai de friabilité pour déterminer la résistance à la fragmentation et à l'écrasement du granulat est requis selon la méthode LC 21-080 (Détermination du pourcentage de friabilité des granulats fins). Cet essai est également effectué à l'aide de l'appareil Micro-Deval. Comparativement à l'essai LC 21-101, les charges abrasives de dimensions plus grosses et variées possèdent une action d'écrasement et de fragmentation sur les granulats fins et non une action d'usure.

1.2.1.2 Caractéristiques de fabrication

D'autre part, les caractéristiques de fabrication sont fonction du mode de production des granulats. Dépendamment des méthodes et des équipements utilisés, les particules peuvent avoir des formes angulaires, plates et allongées. Ces critères concernent le gros granulat seulement.

La détermination des particules fragmentées s'effectue selon la méthode LC 21-100 (Détermination du pourcentage de particules fracturées du gros granulat). Tel que discuté dans cette section, les particules fragmentées accentuent la résistance au cisaillement par l'enchevêtrement au sein du squelette granulaire d'un enrobé ainsi que par une augmentation de la friction entre ces mêmes particules. Ceci a pour effet d'améliorer le support des charges et, par le fait même, la résistance à l'orniérage.

D'autre part, les méthodes de fabrication produisent des particules dites plates et allongées. Ces dernières ont tendance à se placer horizontalement dans le mélange diminuant ainsi le volume des vides. La détermination de ces caractéristiques est effectuée selon la méthode LC 21-265 (Détermination du pourcentage de particules plates et de particules allongées). Toutefois, des particules plates possédant une épaisseur trop mince se fracturent plus facilement. Il faut porter une attention particulière à ce point, car une grande quantité de particules fracturées changent la granulométrie et les propriétés de l'enrobé.

1.2.2 Granulométrie

Les caractéristiques de chacune des particules sont importantes, mais les caractéristiques de l'ensemble des particules le sont d'autant plus. Cet ensemble est appelé granulométrie. La granulométrie d'un granulat est la distribution des particules selon leur dimension. Cet essai est déterminé selon la méthode LC 21-040 (Analyse granulométrique) et s'effectue par séparation du granulat sur une série de tamis normalisés de différentes dimensions.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires, comme celles des enrobés, dépendent largement des proportions des différentes dimensions des granulats. Donc, l'optimisation de la granulométrie est une étape importante lors de la formulation des enrobés. Les courbes *b* et *d* de la Figure 1.2 illustre une représentation des résultats d'une analyse granulométrique.

L'abscisse représente la dimension des particules (en millimètre et micromètre) tandis que l'ordonnée indique le pourcentage de tamisat, soit le pourcentage massique du granulat étant plus petit que la grosseur du tamis correspondant. Par exemple, à la Figure 1.2, il y a 84 % de particules plus petites que 2,5 mm pour la courbe *b*. La granulométrie est distinguée sous deux fractions, soit la portion grossière et la portion fine. La portion grossière représente les particules plus grosses que 5 mm et la portion fine correspond aux particules plus petites que 5 mm. En raison de la grande plage de dimensions d'un granulat, l'analyse granulométrique est souvent séparée selon ces deux fractions.

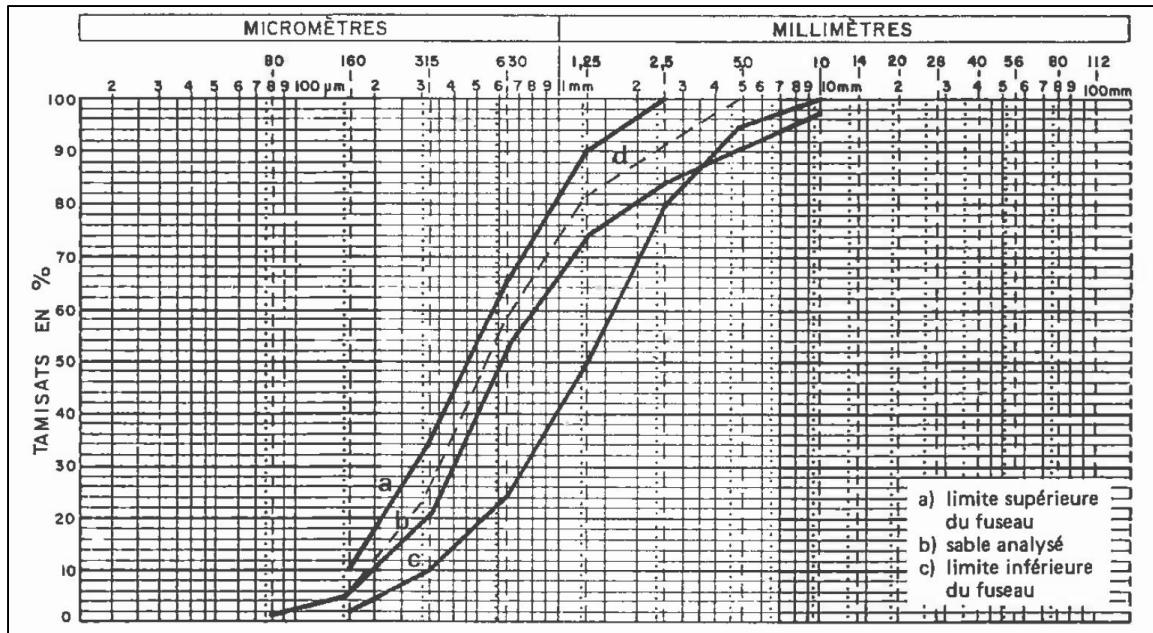


Figure 1.2 Représentation graphique de différentes granulométries

Tirée de Aïtcin *et al.* (1992, p. 35)

1.2.2.1 Fuseau granulométrique

Il est difficile d'obtenir une granulométrie constante en raison des méthodes de production de granulat. Donc, pour la production d'un même granulat, la granulométrie varie légèrement d'un essai à l'autre. Pour un type de granulat précis, les normes désignent des limites inférieures et supérieures de grosseurs de particules à respecter pour différents tamis de contrôles. Ces limites, nommées fuseau granulométrique, correspondent à deux courbes sur le graphique et la granulométrie du granulat doit se situer entre ces deux courbes. Toujours selon la Figure 1.2, les fuseaux granulométriques correspondent aux courbes *a* et *c*. Il est possible de constater que la courbe *d* respecte le fuseau granulométrique tandis que la courbe *b* ne respecte pas le fuseau en partie entre les tamis 10 et 2,5 mm.

1.3 Le bitume et ses dérivés

1.3.1 L'origine du bitume

Le bitume est un matériau organique et est un dérivé du pétrole. Il est possible de le retrouver à l'état naturel ou par procédé mécanique. À l'état naturel, il peut arriver qu'un gisement de pétrole brut se soit retrouvé à la surface de la Terre. Au fil du temps, ce gisement a perdu ses principales composantes volatiles laissant un matériau visqueux noir. Des lacs de bitume ainsi que les sables bitumineux de l'Alberta sont des exemples d'un bitume retrouvé à l'état naturel. L'autre méthode pour obtenir le bitume du pétrole est par procédé mécanique. C'est la portion rejetée lors du procédé d'extraction en raffinerie des différentes composantes du pétrole. De nos jours, cette méthode est la plus utilisée afin d'obtenir du bitume, principalement en raison d'un coût moindre de production (Lelièvre, 1994).

En plus des bitumes, dans la famille des liants hydrocarbonés, il existe également les goudrons. Ces goudrons sont extraits de la houille, une roche sédimentaire produite par la carbonisation d'organismes végétaux. Les goudrons possèdent un comportement semblable aux bitumes, mais leurs compositions diffèrent largement. De nos jours, les goudrons sont de moins en moins utilisés et c'est le bitume qui est le plus utilisé dans les chaussées (Lelièvre, 1994).

1.3.2 Composition du bitume

Le bitume fait partie des liants hydrocarbonés constitués chimiquement de carbone (82 à 85 %) et d'hydrogène (8 à 11%). L'oxygène, le soufre et l'azote compose la fraction restante, soit de l'ordre de 2 à 3 %. Ces molécules forment deux phases distinctes du bitume, soit les asphaltènes et les maltènes (Lelièvre, 1994). D'autre part, les maltènes peuvent être séparées davantage en trois autres groupes d'hydrocarbures, soit les saturés, les aromatiques et les résines. La Figure 1.3 illustre les composantes du bitume.

Les asphaltènes sont la composante insoluble du bitume, soit la partie qui ne se dissout pas et reste sous la forme d'un solide de couleur noire. Elles donnent au bitume sa cohésion et sa rigidité (Young *et al.* 1998). Elles forment une masse noire dure et fragile. Les asphaltènes constituent de 5 à 20 % de la masse du bitume.

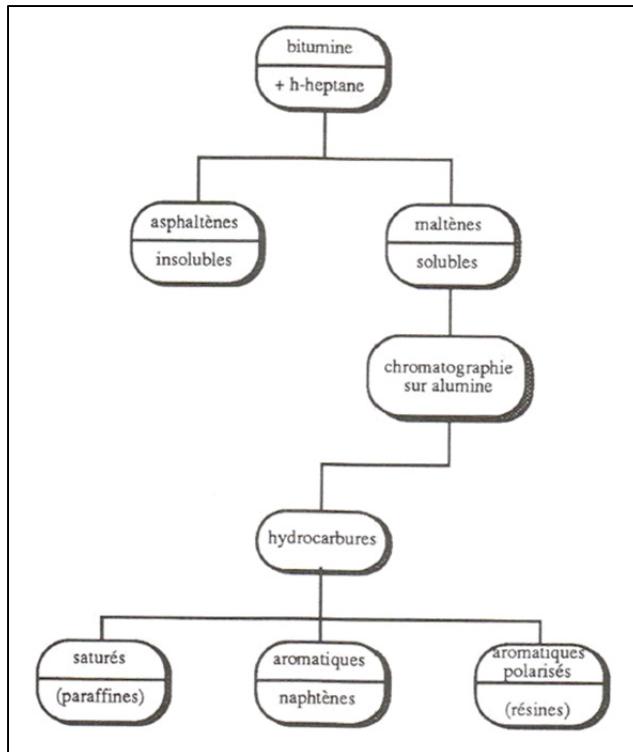


Figure 1.3 Structure des bitumes
Tirée de Lelièvre (1994, p. 25)

D'autre part, les maltènes sont la partie liquide et visqueuse du bitume ressemblant à une huile (Lelièvre, 1994). Les saturés ressemblent à une graisse incolore ou jaunâtre procurant fluidité et viscosité au bitume. Cette portion constitue de 5 à 20 % de la masse totale du bitume (Young *et al.* 1998). Ensuite, les aromatiques, de couleur rougeâtre, forment une huile relativement visqueuse. Elles composent la plus grande partie de la masse du bitume, soit de 40 à 65 %. Enfin, les résines constituent la portion restante du bitume. Elles permettent aux asphaltènes, la partie insoluble du bitume, d'être mélangés aux parties liquides en agissant comme un agent dispersant. Les résines forment des solides noirs comme les asphaltènes en

possédant, toutefois, une température de ramollissement moins élevée que les asphaltènes. Ainsi, elles agissent sur la cohésion du bitume, soit une faible viscosité à haute température et une grande viscosité à basse température (Young *et al.* 2008). Comme les pourcentages des différentes composantes du bitume l'indiquent, la composition chimique des bitumes varie largement en fonction du produit brut employé, soit le pétrole.

1.3.3 Comportement mécanique du bitume

Le bitume est un matériau dont le comportement mécanique est viscoélastique, ce qui signifie qu'il réagit différemment en fonction de la température (susceptibilité thermique), mais aussi de la durée, de la fréquence et de la vitesse d'application d'une charge (susceptibilité cinétique) (Di Benedetto et Corté, 2004 et Di Benedetto *et al.* 2005). La Figure 1.4 illustre le comportement du bitume selon ces différents paramètres. Le bitume est très ferme à basse température se comportant comme un solide vitreux élastique et fragile. La température à laquelle le bitume devient fragile est appelée température de transition vitreuse (T_g). À l'inverse, à haute température (± 80 °C), il devient peu visqueux et se comporte comme un fluide newtonien. Entre cette plage de températures hautes et basses, le bitume traverse les domaines linéaires et non linéaires en fonction du type de déformation imposée (Di Benedetto et Corté, 2004).

Ces caractéristiques du bitume sont employées lors de la fabrication des enrobés afin de permettre de bien enrober les granulats par le bitume liquéfié. C'est pour cette raison que le terme « enrobés à chaud » est employé. Également, il existe des procédés qui permettent de rendre le bitume fluide pour certains usages, mais de façon temporaire. Il y a les bitumes fluidifiés où le bitume est mélangé dans un hydrocarbure. Les émulsions sont des bitumes qu'on ajoute à de l'eau avec l'addition d'un émulsifiant qui permet de produire un mélange homogène d'eau et de bitume. Il y a aussi les liants modifiés qui consistent à l'ajout d'un polymère au bitume modifiant ces propriétés (Di Benedetto *et al.* 2005). Également, il y a les mousses de bitume qui sont introduit en injectant de l'eau dans le bitume chaud.

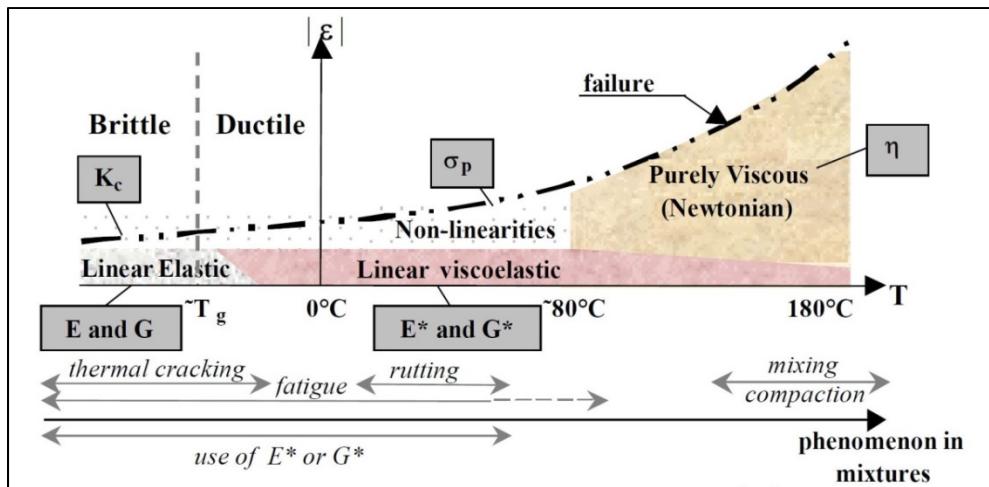


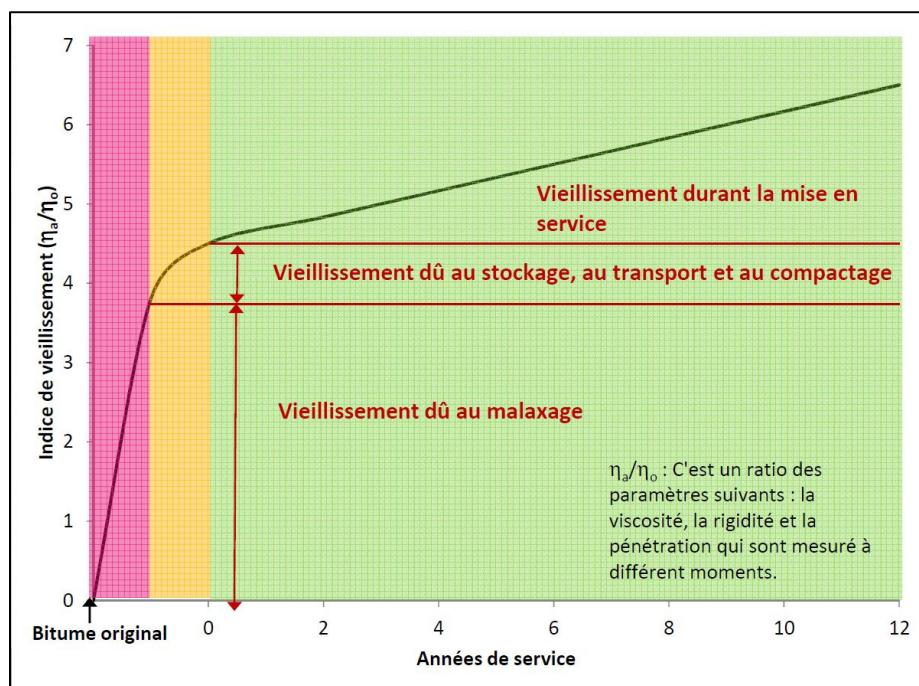
Figure 1.4 Classe de comportement du bitume selon la température (T) et l'amplitude de la déformation ($|\varepsilon|$)
 Tirée de Olard (2003, p. 25)

1.3.4 Vieillissement du bitume

Une courte introduction sur le vieillissement du bitume est nécessaire afin de bien comprendre une des notions des EBE. Le bitume est un matériau qui vieillit. Cela veut dire qu'avec le temps, il durcit. Le bitume perd de sa capacité viscoélastique. Autrement dit, le bitume perd de son élasticité, soit de vouloir revenir à son état initial après avoir subit une déformation. Avec le temps, l'enrobé devient donc plus résistant à l'orniérage, mais plus sensible à la fissuration thermique (Lelièvre, 1994).

Il existe plusieurs facteurs de vieillissement du bitume, soit l'oxydation, l'absorption des huiles par les particules minérales, la restructuration moléculaire ainsi que l'évaporation des composantes volatiles de l'enrobé (Choquet, 1993). Le facteur principal demeure l'oxydation du bitume. Le bitume neuf étant très noir devient plus pâle au cours des années ce qui est un signe que le bitume s'oxyde. Ce phénomène s'accélère avec l'augmentation de la température. Les études ont montré qu'au-delà de 100 °C, l'oxydation double pour chaque tranche de 10 °C. Donc, la réduction de la température de chauffage du bitume pour le malaxage permet de minimiser considérablement le vieillissement prématué du bitume (Choquet, 1993). Généralement, le bitume atteint sa température la plus haute lors du

malaxage de l'enrobé. Donc, c'est durant ce malaxage que le taux de vieillissement du bitume est le plus élevé tel que présenté à la Figure 1.5. Il est possible de constater que le vieillissement du bitume, avant même la mise en service de l'enrobé, peut correspondre à près de 70 % du vieillissement total du bitume pour les 12 premières années de service selon la Figure 1.5.



D'autre part, il est très important de tenir compte du degré de vieillissement du bitume lorsqu'on vise le retraitement de granulats bitumineux. En effet, le bitume contenu dans le GBR est déjà durci et vieillit en fonction de sa durée d'utilisation et des conditions auxquelles le bitume dans l'enrobé a été exposé. En introduisant du GBR dans un nouvel enrobé, le processus de malaxage de l'enrobé accroît rapidement le vieillissement du bitume du GBR, diminuant ainsi sa viscoélasticité. Sachant que l'augmentation de température augmente l'oxydation, une température de malaxage la plus basse possible est souhaitable afin de restreindre l'oxydation du GBR lors du malaxage. De plus, une basse température

permet d'augmenter le pourcentage d'utilisation du GBR, de diminuer l'apport en liant neuf, d'augmenter la qualité de cohésion du mélange ainsi que de procurer une durée de vie plus longue au nouvel enrobé (ARRA, 2001).

1.3.5 Le bitume dans l'enrobé

Le bitume dans l'enrobé joue un rôle de premier plan en procurant une certaine cohésion au mélange. Il agit comme adhésif qui permet de lier les constituants de l'enrobé lui donnant ainsi une certaine résistance sous charges en compression et en tension (Lelièvre, 1994). Les propriétés viscoélastiques du bitume permettent de fournir une résistance en arrachement, en flexibilité et en fatigue sous les diverses charges qu'un enrobé peut supporter. De plus, il assure une imperméabilité à l'eau protégeant ainsi la fondation granulaire de la chaussée.

Il existe plusieurs types de bitume. Afin de les caractériser, certains essais ont été mis sur pied. Au Québec, la classe ou grade de performance (PG H-L) provenant de la méthode SHRP a été introduit en 1996 en remplacement de la caractérisation des bitumes par l'indice de pénétration (Moreux et Leclerc, 1996). Le terme « PG H-L » signifie « *Performance Grade – High – Low* ». La lettre « H » correspond à la température haute qui est la température limite où le bitume possède encore une bonne cohésion pour résister à l'orniérage. Pour ce qui est de la lettre « L », elle est la température basse à laquelle le bitume est apte à résister adéquatement à la fissuration thermique (Langlois, 2005). Donc, pour un bitume de grade de performance PG 58-34, cela signifie que le liant résiste bien à l'orniérage jusqu'à une température de 58 °C et possède une bonne performance contre la fissuration thermique en restant flexible jusqu'à des températures de -34 °C. Les grades de bitume sont séparés par des écarts de 6°C pour les températures hautes et basses. Donc, les températures d'une classe de bitume peuvent présenter une marge de + 6 °C.

La température haute et basse du bitume est déterminée selon deux essais distincts. La température haute est déterminée avec un rhéomètre à cisaillement dynamique, du terme anglais « *Dynamic Shear Rheometer* » (DSR). L'essai consiste à mettre en place une pastille

de bitume entre une plaque fixe et une plaque oscillante selon une fréquence donnée. L'essai est effectué sur le bitume d'origine et sur le bitume artificiellement vieilli par l'essai d'étuvage accéléré en couche mince, soit du terme anglais « *Rolling Thin Film Oven* » (essai RTFO).

En ce qui concerne la température basse, elle est déterminée à l'aide du rhéomètre à flexion de poutre, soit du terme anglais « *Bending Beam Rheometer* » (BBR). L'essai BBR s'effectue sur le bitume vieilli au RTFO et sur un bitume vieilli à l'aide de l'essai de vieillissement sous pression, du terme anglais « *Pressure Aging Vessel* » (PAV). Cela représente le vieillissement à long terme du bitume sur une durée d'environ dix ans. L'essai BBR consiste en une poutre de bitume simplement appuyée à chaque extrémité, sur laquelle une charge est appliquée au centre durant quatre minutes. La théorie des poutres élastiques permet de calculer la rigidité du bitume.

Dans l'enrobé, la température basse du bitume est facilement atteinte, au Québec, durant la saison hivernale. À cette période, compte tenu du gradient thermique existant dans le revêtement, la température du bitume de l'enrobé s'approche sensiblement de la température de l'air. Cependant, concernant la température haute du bitume, la température de l'air durant l'été n'atteint jamais une valeur aussi élevée. Toutefois, la couleur noire du bitume absorbe plus facilement le rayonnement solaire ce qui augmente sa température. De plus, les fondations granulaires créent une masse thermique très importante. De ce fait, les températures hautes du bitume dans l'enrobé peuvent être atteintes.

1.3.6 Bitumes avec polymères

De nos jours, avec les connaissances technologiques croissantes, l'utilisation de bitumes avec ajout de polymères diminue davantage la susceptibilité thermique de ceux-ci (Di Benedetto *et al.*, 2005). Ils sont utilisés sur les chaussées fortement sollicitées telles les autoroutes. Actuellement, ces liants modifiés sont retrouvés dans plus de 50 % des chaussées.

L'ajout de polymères dans le bitume permet d'agir sur les propriétés de celui-ci. Il permet de réduire la susceptibilité thermique du bitume, soit d'augmenter l'écart entre la température basse et haute. Il permet également d'améliorer sa résistance à la fatigue, sa flexibilité, son élasticité ainsi que sa cohésion. De plus, la sensibilité au vieillissement du bitume est diminuée. Le pourcentage d'ajout en polymère varie en fonction des performances désirées du bitume, de la nature et des procédés de fabrication des polymères ajoutés. De façon générale, un pourcentage de 1,0 à 4,5 % est utilisé (Di Benedetto *et al*, 2005).

Habituellement, le bitume de base est de type PG 58-28. Au Québec, les principales classes de bitume avec polymères sont les classes PG 52-40, PG 58-34, PG 58-40, PG 64-34, PG 70-28 et PG 70-34 (MTQ, 2012). Généralement, les bitumes avec les températures hautes plus élevées sont utilisés dans le sud du Québec. Les bitumes avec les températures basses les moins élevées sont utilisés plus au nord.

1.3.7 Mousse de bitume

Tel qu'il sera décrit ultérieurement, le procédé des enrobés à basse énergie utilise principalement une mousse de bitume lors du malaxage des composantes de l'enrobé. De ce fait, il est important de bien comprendre le procédé de moussage du bitume et ses principales caractéristiques.

1.3.7.1 Origine de la mousse de bitume

Le procédé de mousse de bitume a été découvert au milieu des années 1950 lorsqu'un professeur de l'*Iowa State University* reconnu l'utilisation des mousses de bitume comme liant. Par la suite, la chambre d'expansion de moussage du bitume qui avait été construite fut améliorée par la société *Mobil Oil Organisation*. Ce procédé fut très peu utilisé jusqu'au milieu des années 1990, où la compagnie *Wirtgen* produisit son propre système. Depuis, le procédé de moussage du bitume est très utilisé, principalement dans le retraitement en place des chaussées (Wirtgen, 2004).

1.3.7.2 Principe de la mousse de bitume

La notion de mousse de bitume est relativement simple. Elle est basée sur une perte de viscosité du bitume suite à une expansion volumique. De façon plus précise, un bitume chauffé aux environs de 170 à 180 °C, reçoit par pulvérisation de l'eau froide en fine bruine. Le système de moussage doit pouvoir injecter l'eau et le bitume sous pression par des buses très petites, car le bitume et l'eau se dispersent plus facilement en fines gouttelettes. Ces gouttelettes d'eau au contact du bitume chaud, se transforment instantanément en vapeur (1 500 fois le volume du liquide initial) et restent prisonnières d'un mince film de bitume d'environ 0,01 mm d'épaisseur (Jenkins, 1999). Cette vapeur produit une mousse qui augmente le volume du mélange de 15 à 20 fois le volume initial du bitume ce qui diminue sa viscosité (Wirtgen, 2001).

La mousse se compose d'environ 98 % de bitume et 2 % d'eau. Également, divers additifs peuvent être ajoutés (AIPCR, 2003 et Gauvain, 2006). La Figure 1.6 schématise le procédé de moussage du bitume.

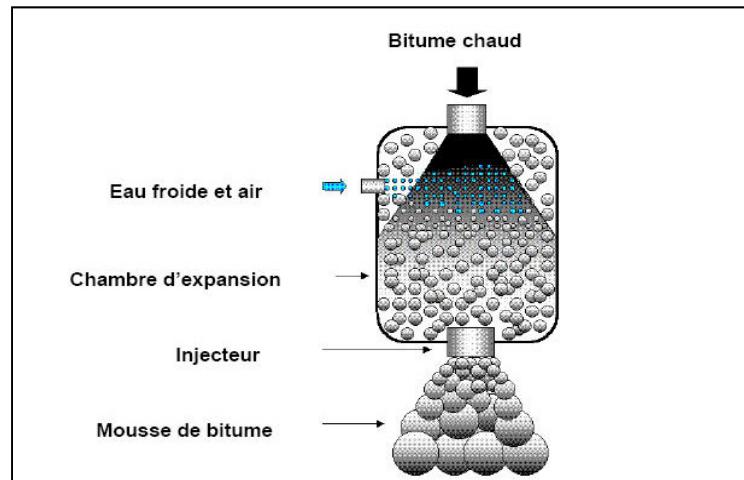


Figure 1.6 Procédé de moussage de bitume
Tirée de l'AIPCR (2003, p. 69)

Toutefois, cette faible viscosité est de courte durée. Avant que les bulles de bitume n'éclatent, les granulats sont injectés à travers cette mousse qui englobe davantage les particules fines. L'eau s'évapore par la suite lors du malaxage. Cette observation est notable visuellement, car ce procédé produit un enrobé de couleur noir et gris (AIPCR, 2003).

1.3.7.3 Caractérisation d'une mousse de bitume

Il n'existe pas d'essais de caractérisation précis sur les mousses de bitume. Actuellement, le coefficient d'expansion ainsi que le temps de demi-vie sont utilisés comme indice de qualité. Le coefficient d'expansion est le rapport entre le volume maximal de la mousse et le volume original du bitume. Il représente la capacité de la mousse à se répandre dans l'enrobé (Wirtgen, 2004). De façon générale, un coefficient d'expansion minimal de 10 est recommandé afin d'obtenir des propriétés suffisantes (AIPCR, 2004, Wirtgen, 2004 et Li, 2011).

En ce qui concerne le temps de demi-vie, il représente le temps entre le moment où le volume maximal (t_0) est atteint et le temps où le volume a diminué de moitié ($t_{1/2}$) (Gaudreault et al. 2007). C'est le critère de stabilité de la mousse de bitume. Le temps de demi-vie est habituellement de l'ordre de 10 à 15 secondes et des valeurs de 20 à 30 secondes peuvent être exigées dépendamment des organismes (AIPCR, 2003). Toutefois, on s'entend pour dire qu'une demi-vie de 8 secondes est un minimum absolu requis (AIPCR, 2004, Wirtgen, 2004 et Li, 2011). La Figure 1.7 illustre le temps d'expansion très rapide du volume et, par la suite, la diminution plus lente de la mousse de bitume.

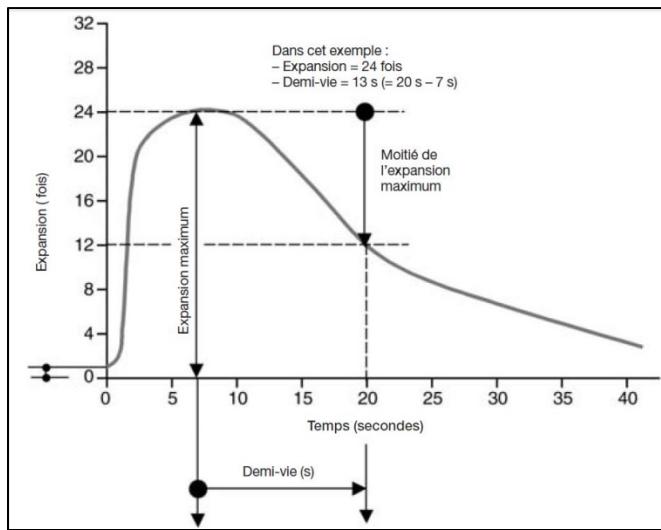


Figure 1.7 Expansion de la mousse de bitume
en fonction du temps
Tirée de Wirtgen (2004, p. 87)

1.3.7.4 Facteurs influençant la qualité d'une mousse de bitume

Le volume (rapport d'expansion) et la stabilité (demi-vie) sont très importants pour une mousse de bitume, car ils déterminent le délai disponible pour un enrobage adéquat des granulats. Les facteurs influençant sur ces caractéristiques sont les suivants (Wirtgen, 2004) :

1. La quantité d'eau ajoutée,
2. La température du bitume,
3. La qualité du bitume,
4. L'origine du bitume,
5. La pression du bitume et de l'eau ajoutée,
6. L'ajout d'adjuvants.

Tout d'abord, la quantité d'eau ajoutée est l'un des deux principaux facteurs influençant sur la qualité et les caractéristiques d'une mousse de bitume. Une trop grande quantité d'eau peut nuire au moussage du bitume en diminuant son temps de vie de façon très rapide. L'augmentation de l'ajout en eau accroît le volume de la mousse et le rapport d'expansion

augmente ce qui est un facteur recherché. Cependant, avec une trop grande quantité d'eau ajoutée, la grosseur des bulles augmente ce qui diminue le film de bitume autour de ces bulles. La mousse devient instable et son temps de demi-vie décroît (Wirtgen, 2004). La Figure 1.8 illustre le phénomène. La teneur en eau de 5 % offre le plus grand coefficient d'expansion (environ 18), mais possède également le plus petit temps de demi-vie, soit environ 5 secondes.

Le second facteur principal est la température du bitume. L'augmentation de la température du bitume diminue sa viscosité et facilite l'enrobage des bulles par un mince film de bitume lors de l'évaporation de l'eau. Il est recommandé que la température du bitume soit supérieure à 160 °C afin de produire une mousse de qualité acceptable (Wirtgen, 2001, AIPCR, 2003 et Wirtgen, 2004). La Figure 1.8 présente l'effet de la température sur le coefficient d'expansion. Pour la teneur en eau de 5 %, une augmentation de température de 20 °C (160 à 180 °C) augmente le coefficient d'expansion d'environ 7 fois (11 à 18). Également, il est possible de constater que plus la teneur en eau est importante, plus la température du bitume a un effet sur la variation du coefficient d'expansion.

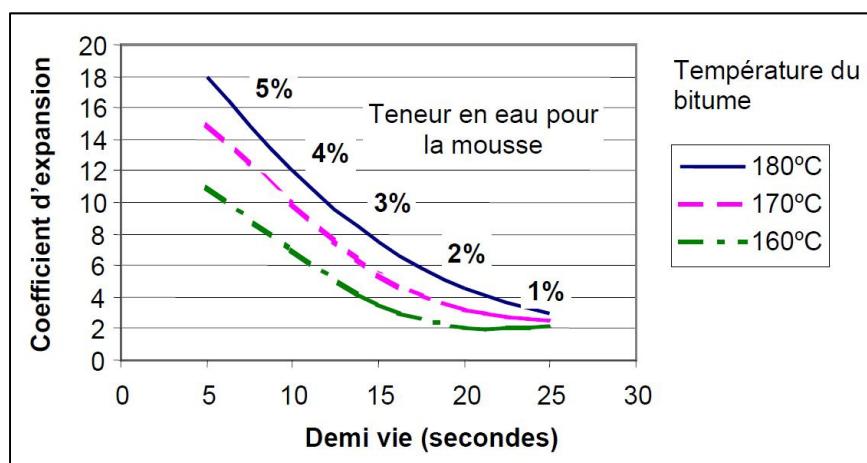


Figure 1.8 Influence de la teneur en eau ajoutée et la température du bitume sur le coefficient d'expansion et le temps de demi-vie de la mousse de bitume

Tirée de AIPCR (2003, p. 80)

Les quatre derniers facteurs ont un effet moins important sur le coefficient d'expansion et la demi-vie que la quantité d'eau ajoutée et la température du bitume. On entend par qualité du bitume, sont degré de pénétration, ou sa classe de PG selon la nomenclature québécoise. On utilise généralement un bitume mou (PG 58-28, PG 58-40) afin d'obtenir une faible viscosité plus facilement et ainsi un meilleur moussage et enrobage, car les bitumes polymères peuvent produire aucune ou une faible mousse. Toutefois, l'utilisation de bitume plus dur fonctionne, soit les bitumes avec l'ajout de polymères. Un bitume plus dur peut aussi apporter un problème de colmatage des buses du système de pulvérisation (AIPCR, 2003). Également, la source géographique du bitume peut avoir une influence. Des bitumes provenant de certaines régions du globe possèdent des propriétés moussantes supérieures à d'autres bitumes tels que les bitumes provenant du Venezuela (Wirtgen, 2004). Lors de la fabrication de la mousse, la pression à laquelle l'eau et le bitume sont ajoutés peut être contrôlée afin d'obtenir une régularité dans la mousse. Une pression d'environ 5 bars permet l'injection de gouttelettes d'eau et de bitume plus fines en plus grand nombre ce qui augmente la surface de contact disponible et une régularité de la mousse de bitume (Wirtgen, 2004).

Dans certaines occasions, des adjuvants peuvent être utilisés pour augmenter l'effet moussant. Il arrive que des agents anti-moussants soient utilisés lors du raffinage du bitume ce qui peut nuire à l'obtention d'une mousse de bitume de bonne qualité. Dans ce cas, des agents moussants doivent être ajoutés au bitume avant son utilisation (AIPCR, 2003 et Wirtgen, 2004).

Afin de déterminer la mousse de bitume optimale, une série d'essais en laboratoire est généralement effectuée en faisant varier les deux principaux facteurs, soit la température du bitume ainsi que la quantité d'eau. De façon générale, une mousse de bitume est de meilleure qualité plus l'expansion et le temps de demi-vie sont grands (Wirtgen Group, 2001). La détermination de la meilleure mousse de bitume est donc la jonction des deux courbes du graphique de la Figure 1.9, soit l'optimisation de la plus grande expansion et la demi-vie la plus longue. Cette valeur doit respecter les valeurs minimales reconnues dans

l'industrie du retraitement des chaussées, soient un rapport d'expansion de 10 ainsi qu'une demi-vie de huit secondes (Wirgten 2004).

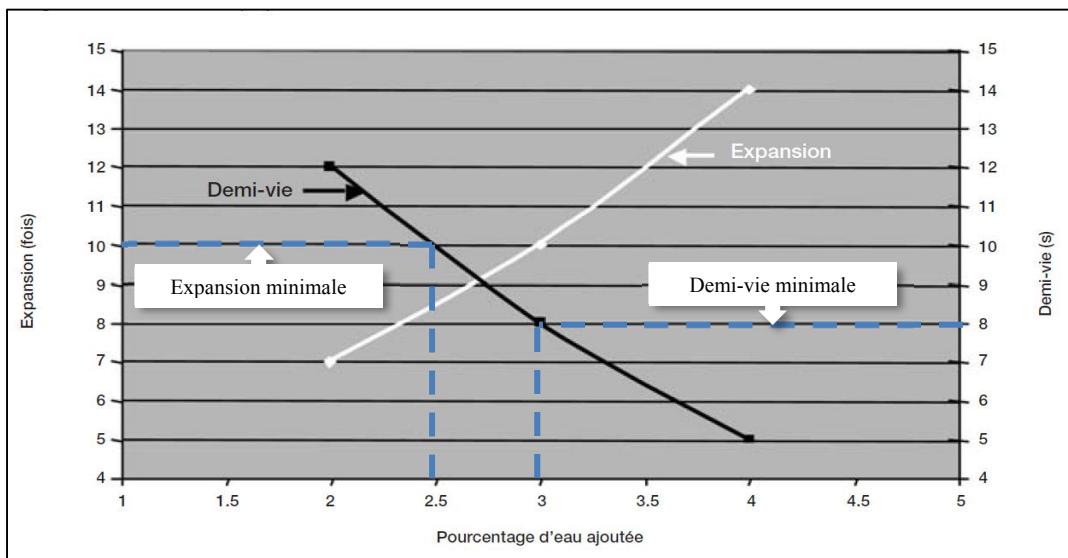


Figure 1.9 Optimisation de l'expansion et de la demi-vie de la mousse de bitume
Adaptée de Wirtgen (2004, p. 88)

Afin de mesurer la combinaison de l'expansion maximal (ER_m) et du temps de demi-vie ($t_{1/2}$) maximale, Jenkins (2000) a développé une valeur d'indice de mousse (FI). Cet indice représente l'aire sous la courbe selon la combinaison ER_m et $t_{1/2}$ étudiée. Il en a conclu qu'une augmentation du FI procurait une amélioration de la qualité de la mousse produite. (Wirgten, 2004). Ce FI a été repris par les travaux de Li (2011) où il a déterminé un indice énergétique de mousse (FE). Cet indice reflète l'énergie emmagasinée de la mousse de bitume en calculant l'aire sous la courbe du volume d'expansion (ER_a) en fonction du temps (t) tel que présenté à la Figure 1.10. Selon Li (2011), l'accroissement du ER_a combiné à l'accroissement du $t_{1/2}$ signifie qu'il y a accumulation d'une plus grande énergie lors du moussage du bitume avec une valeur de FE maximale à ER_m et au temps t_s . Toutefois, la détermination du FI ou du FE est peu efficace en pratique en raison des calculs laborieux. Le ER_m et le $t_{1/2}$ restent les facteurs les plus utilisés pour déterminer la qualité d'une mousse (Li, 2011).

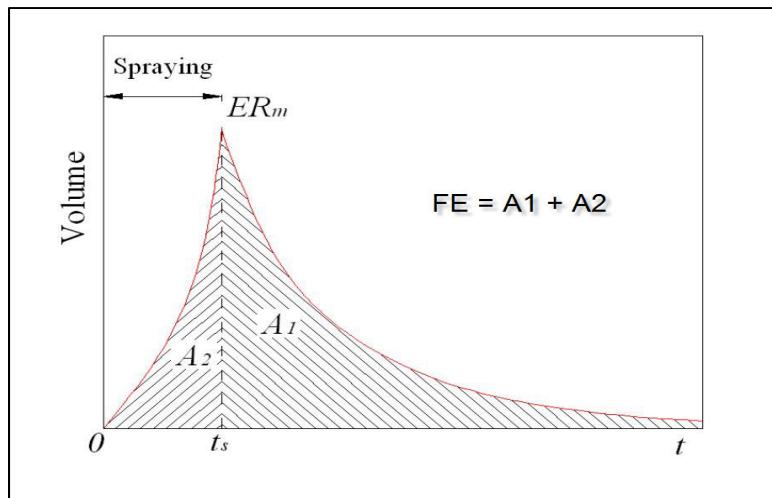


Figure 1.10 Représentation de l'indice énergétique de mousse (FE) en fonction du rapport d'expansion (ER_a) et du temps (t)
 Tirée de Li (2011, p. 3320)

1.3.7.5 Facteurs influençant sur la qualité d'enrobage d'un enrobé à la mousse de bitume

La qualité d'une mousse de bitume a une influence directe sur la qualité d'enrobage et la performance d'un enrobé à la mousse de bitume (Jenkins et al. 1999). Toutefois, la granulométrie de l'enrobé ainsi que la température des matériaux sont deux aspects ayant une influence sur la qualité de l'enrobage (AIPCR, 2003).

La mousse de bitume, lors de la phase du malaxage, se fixe plus particulièrement sur les particules fines inférieures à 0,075 mm, car les gouttelettes de bitume ne possèdent pas une viscosité assez réduite pour englober les grosses particules (Wirtgen, 2004). On obtient alors un mastic bitumineux constitué de bitume et de filler. Ce mastic joue le rôle de mortier dans l'enrobé en collant les grosses particules entre elles. Une granulométrie d'un enrobé possédant un pourcentage passant de particules fines (0,075 mm) inférieur à 5 % est peu adéquate pour le traitement à la mousse de bitume. Le bitume se répartit de façon non homogène et forme des accumulations riches en bitume sur les particules fines apportant un mauvais enrobage et de mauvaises propriétés de l'enrobé. Le problème relié au manque de

particules fines peut être corrigé avec l'ajout de ciment, de chaux ou un matériau fin possédant un pourcentage passant de 100 % au tamis de 0,075 mm. Toutefois, l'utilisation de ces matériaux d'apport doit être validée (AIPCR, 2003 et Wirtgen, 2004). De façon générale, il est recommandé d'utiliser, dans la mesure du possible, une granulométrie respectant le fuseau de la Figure 1.11.

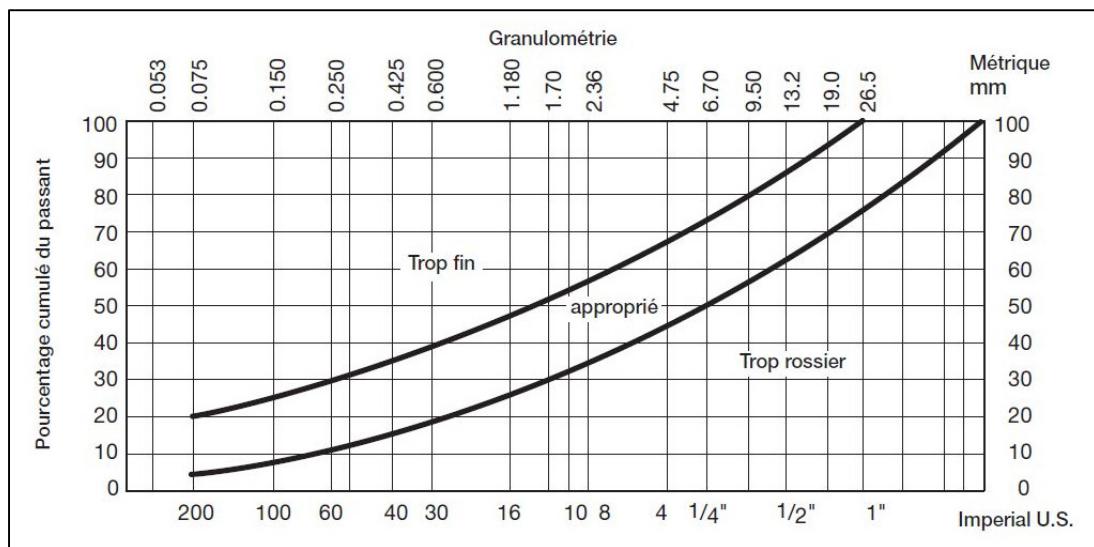


Figure 1.11 Fuseau granulométrique approprié d'un enrobé pour l'enrobage à la mousse de bitume
Tirée de Wirtgen (2004, p. 92)

D'autre part, la température des constituants est un facteur très important pour une bonne répartition de la mousse du bitume afin d'obtenir un enrobage et des propriétés mécaniques adéquats (Wirtgen, 2004). De façon générale, ce facteur n'est pas une problématique pour l'utilisation dans les enrobés à basse énergie (EBE) en raison de leur température de malaxage plus haute, mais est plus critique pour l'utilisation dans le retraitement à froid des enrobés.

Il existe des critères d'utilisation (AIPCR, 2003 et Wirtgen, 2004) présentés au Tableau 1.1 afin de déterminer la capacité de malaxage d'un enrobé à la mousse de bitume en fonction de la température des granulats, de l'indice de mousse (FI) ainsi que du rapport d'expansion. Le

tableau montre qu'une température plus élevée des granulats permet d'obtenir une meilleure capacité d'enrobage de la mousse de bitume, et ce, même avec un faible FI et rapport d'expansion.

Tableau 1.1 Capacité de malaxage d'un enrobé à la mousse de bitume en fonction de l'indice de mousse, du rapport d'expansion et de la température des granulats
Adapté de Wirtgen (2004, p. 94)

Indice de la mousse (FI)	Rapport d'expansion	Température des granulats (°C)		
		< 15 °C	15 à 25 °C	> 25 °C
< 75	< 8	Très mauvaise	Mauvaise	Moyenne
75 à 150	8 à 12	Moyenne	Bonne	Bonne
> 150	> 12	Bonne	Très bonne	Très bonne

Dans le même ordre d'idée, Jenkins *et al.* (1999) ont réalisé des essais, présentés à la Figure 1.12, qui ont déterminé que l'augmentation de température des granulats procurait également un meilleur enrobage à la mousse de bitume. Jenkins (1999) a divisé en trois parties le taux d'enrobage des granulats. L'enrobage complet (zone inférieure) présente 100 % d'enrobage des granulats, l'enrobage partiel (zone intermédiaire) présente de 21 à 99 % d'enrobage des granulats et le faible enrobage (zone supérieure) présente de 0 à 20 % d'enrobage des granulats. Ces résultats montrent que l'augmentation de la température des granulats permet d'obtenir un meilleur enrobage des granulats de plus grandes dimensions. De plus, la température a une faible influence sur l'enrobage des particules fines comparativement aux grosses particules qui nécessitent une température plus élevée pour obtenir un meilleur enrobage à la mousse de bitume. De plus, des essais additionnels effectués par Jenkins (2000) ont montré qu'une température de granulats près de 100 °C permettait d'enrober adéquatement avec la mousse de bitume n'importe quelle grosseur de granulats.

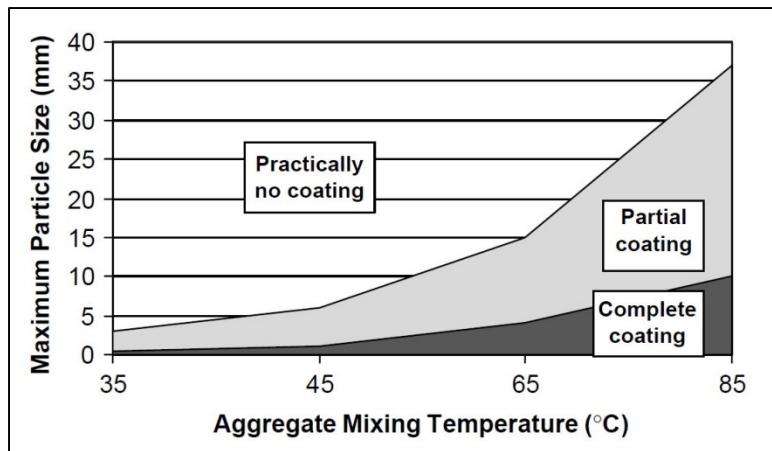


Figure 1.12 Effet de la température et de la dimension des granulats sur l'enrobage à la mousse de bitume
Tirée de Van de Ven (2007, p. 165)

1.4 Les propriétés mécaniques des enrobés à chaud

Les enrobés sur nos routes doivent être en mesure de procurer un confort et une sécurité aux usagers, de supporter les charges produites par le trafic et de les transférer en les répartissant à la fondation. De plus, ils permettent de protéger les couches inférieures de la fondation contre les intempéries. Pour ce faire, le revêtement mis en place doit posséder les principales propriétés mécaniques suivantes (Langlois, 2005) :

1. Résistance à l'orniérage,
2. Résistance à la fissuration par fatigue,
3. Résistance à la fissuration par retrait thermique,
4. Résistance à l'arrachement et au désenrobage,
5. Résistance à l'abrasion et à l'usure (vieillissement),
6. Imperméabilité,
7. Posséder une texture optimisant l'adhérence pneu-chaussée.

Avec ce grand nombre de propriétés devant être respectées, certaines deviennent incompatibles, soit la résistance à l'orniérage et la résistance à la fissuration thermique par

exemple. Il est donc nécessaire de concevoir l'enrobé possédant un bon équilibre entre ces propriétés tout en tenant compte des critères de durée de vie anticipée de l'ouvrage, de l'étude du dimensionnement ainsi que de l'aspect économique. Afin de mieux comprendre l'incompatibilité de certaines propriétés ainsi que les variables les affectant, il est nécessaire de développer sommairement chacune de ces caractéristiques (Langlois, 2005).

1.4.1 Résistance à l'orniérage

La résistance à l'orniérage de l'enrobé est la capacité du squelette granulaire de l'enrobé à reprendre des charges. La charge est reprise par la friction des points de contact des granulats de l'enrobé. Donc, une augmentation des points de contact et des granulats procurant une friction plus grande permet une résistance à l'orniérage supérieure. Un VAM plus petit permet alors d'obtenir un plus grand nombre de contacts entre les particules. (Lamothe, 2004). De façon plus précise, le VAM comprend les vides interstitiels (V_i) et le volume de bitume effectif (V_{be}). Le V_i doit être élevé et ceux comblés par le bitume (VCB) doivent être faibles.

Également, le bitume doit posséder une bonne consistance à haute température et une susceptibilité thermique faible (H-L élevé). Cette résistance est liée à la forte sollicitation du trafic et se produit à haute température (Langlois, 2005).

1.4.2 Résistance à la fissuration (par fatigue et par retrait thermique)

Malgré que la fissuration par fatigue et par retrait thermique soit deux dégradations bien distinctes, les caractéristiques nécessaires de l'enrobé, pour réduire ces phénomènes, sont les mêmes. Pour ce qui est du retrait thermique, l'enrobé tend à se contracter lors des basses températures jusqu'à ce que la contrainte thermique induite dépasse la résistance en tension de l'enrobé. La fissuration par fatigue est produite par de nombreux cycles de sollicitations en petites déformations dues au trafic.

Tout d'abord, la résistance pour ces deux types de fissurations est fonction d'un volume de bitume effectif (V_{be}) et d'un volume comblé par le bitume (VCB) élevé. La teneur en vide (%) d'air) doit être faible et plus précisément, une continuité des vides dans le mélange doit être évitée pour ne pas produire des « failles » dans une section du mélange. Ceci a pour effet de diminuer la surface du bitume résistant aux contraintes. Également, le grade de bitume doit posséder une température basse (L) peu élevée.

1.4.3 Résistance à l'arrachement et au désenrobage

Cette résistance se rapporte à un V_{be} et un VCB élevé. Les vides interstitiels doivent être faibles et le bitume doit posséder une susceptibilité thermique faible (H-L élevé). Ces phénomènes peuvent être produits par des bitumes et des granulats incompatibles qui refusent de se « rapprocher ». Il existe toutefois des produits pouvant annuler ces effets comme la chaux qui peut être utilisée généralement en petite quantité. Des granulats nouvellement concassés peuvent produire cette répulsion en raison de leur charge (positive ou négative) très élevée provoquée par le concassage.

1.4.4 Résistance à l'abrasion, à l'usure et imperméabilité

Ces types de résistances sont obtenus par des taux de bitume et des vides comblés par le bitume (VCB) élevé. Pour ce qui est des V_i , ils doivent être faibles. Une résistance des granulats à la fragmentation, à l'usure et au polissage permet d'augmenter ces résistances.

1.5 Utilisation de granulats bitumineux recyclés (GBR) dans les enrobés

L'utilisation des granulats bitumineux recyclés (GBR), ou connus sous le terme anglais RAP (*Reclaimed asphalt pavement*), est de plus en plus présente tant au niveau du retraitement en place au chantier qu'en centrale d'enrobage. Ces techniques sont le recyclage d'enrobé. Elles utilisent des granulats bitumineux retraités comme matière première afin de produire des enrobés à froid ou à chaud selon les diverses techniques de construction (AIPCR, 2003). Pour

le présent programme expérimental, l'utilisation de GBR en centrale d'enrobage à chaud est la technique utilisée. Cette dernière sera détaillée dans la prochaine section.

Les intérêts influençant l'utilisation du GBR dans les enrobés sont, principalement, les coûts du bitume et des granulats bruts. Une réduction d'énergie est également notable lorsque le GBR est ajouté à froid en centrale d'enrobage. Cette méthode évite de dépenser une énergie supplémentaire pour chauffer cette proportion des granulats et du bitume de l'enrobé confectionné lors du malaxage. De plus, l'utilisation du GBR diminue les quantités de déchets dans l'environnement. Ces aspects sont considérables et peuvent être très avantageux autant pour l'entrepreneur que pour le client (Xinjun *et al.* 2008).

1.5.1 Historique de l'utilisation de GBR dans les enrobés

Les premières techniques d'utilisation de granulats bitumineux recyclés dans la fabrication d'un nouvel enrobé ont vu le jour au début des 1970. Durant ces années, plusieurs pays ont développé des techniques pour l'ajout de GBR froid pour une couche de base. L'ajout de GBR froid et les techniques de l'époque ne permettaient pas de dépasser une quantité d'environ 20 % de GBR dans les enrobés produits en centrales discontinues. Dès le début des années 1980, l'ajout d'un tambour de chauffage aux centrales discontinues a permis de développer les techniques à chaud soit, en chauffant le GBR. Cette méthode a permis l'augmentation d'ajout en GBR jusqu'à 50 %.

1.5.2 Principales utilisations du GBR

Le recyclage de l'enrobé devrait servir à produire un nouvel enrobé de même qualité et de même utilisation qu'un enrobé sans GBR (AIPCR, 2001). En général, on reconnaît deux catégories de recyclage avec GBR, soit le recyclage à faible et fort taux d'ajout en GBR. Ceux-ci représentent respectivement de 10 à 25 % d'ajout et de 25 à 65 % d'ajout. Également, des quantités supérieures à 65 % sont utilisées. Le pourcentage utilisé dépend directement du type de centrale d'enrobage.

L'utilisation de GBR est possible pratiquement dans tous les types d'enrobé et dans toutes les couches de la structure de chaussée. Toutefois, il peut être préférable de restreindre l'emploi de GBR en forte quantité où une haute adhérence pneu-chaussée est nécessaire. Ces endroits sont les zones de freinage, les tracés sinueux, etc. Dans ce cas, il est important de vérifier la qualité d'adhérence des granulats du GBR, soit l'angularité et la microtexture (Serfass, 2007).

Le GBR peut être utilisé également comme matériau granulaire en couche de fondation traitée ou non traitée. Cependant, les études ont montré que l'utilisation de GBR comme matériau granulaire procure une capacité portante légèrement moins élevée qu'un matériau granulaire neuf. Le film de bitume au pourtour des granulats d'enrobé agit comme lubrifiant ce qui amène le squelette granulaire à glisser un contre l'autre (AIPCR, 2001).

De nos jours, les techniques d'utilisation de GBR sont très nombreuses autant du côté des procédés à froid et à chaud. Selon plusieurs conditions économiques, techniques et sociales, le pourcentage de réutilisation de GBR dans les nouveaux enrobés atteint les 100 % dans plusieurs pays d'Europe. À titre informatif, l'Europe utilisait une moyenne de 25 % de GBR dans les enrobés à chaud au début des années 2000 (AIPCR, 2003). Cette proportion fut augmentée à près de 33 % en 2005 (EAPA, 2005).

Les principaux facteurs influençant le pourcentage d'utilisation de GBR sont les limites techniques ou environnementales prescrites dans les normes, règlements et documents d'appel d'offres des municipalités, organismes gouvernementaux et autres. Également, l'utilisation doit être avantageux du côté économique tant pour le client que l'entrepreneur. Enfin, la capacité des centrales d'enrobage à être modifiée pour l'ajout de GBR joue un rôle important (AIPCR, 2003).

1.5.3 Étapes préliminaires d'analyse du GBR

Avant d'introduire le GBR dans un nouvel enrobé, la formulation nécessite de connaître quelques caractéristiques essentielles du GBR. L'enrobé à recycler est récupéré de la route existante soit par enlèvement par morceau ou par fraisage. Ensuite, l'enrobé est concassé pour obtenir un GBR de grosseur maximale en fonction du type d'enrobé désiré dans lequel le GBR sera ajouté. Une analyse granulométrique du GBR doit être effectuée pour permettre de produire une combinaison granulométrique correspondante à l'enrobé à produire. Par la suite, le bitume doit être caractérisé afin d'en connaître la teneur et la classe. Ces deux paramètres vont permettre de choisir le type de bitume d'ajout ainsi que son pourcentage pour obtenir un mélange de bitume final possédant le type de performance (PG) désiré (CFTR, 2004).

La régénération du vieux bitume est un aspect vital. Le choix du bitume d'apport régénérant, de viscosité et de composition adaptée est très important, car il assure la réussite et la bonne performance du nouvel enrobé produit (Serfass, 2007). Toutefois, la caractérisation du bitume n'est pas toujours obligatoire. Certains organismes limitent le pourcentage d'ajout du GBR et la caractérisation du liant d'apport n'est pas obligatoire, mais reste malgré tout une bonne pratique. Il est fréquent de voir une limite d'ajout en GBR de 15 à 20 % sans obligation de caractériser le bitume oxydé du GBR (RAPETG, 2006). Aux États-Unis, des études menées par Al-Quadi *et al.* (2007), précisent trois cas généraux pour la caractérisation du bitume du GBR selon son pourcentage d'ajout dans l'enrobé. Ces trois cas sont :

1. < 15 % de GBR : le bitume d'apport du nouvel enrobé n'est pas modifié,
2. Entre 15 et 25 % de GBR : les températures hautes et basses du bitume d'apport du nouvel enrobé sont réduites d'une classe pour tenir compte de la rigidité du bitume du GBR,
3. > 25 % de GBR : des chartes de mélange doivent être utilisées.

Également, le pourcentage utilisé de GBR peut varier selon la couche d'enrobé ciblé. Au Québec, la limite imposée d'ajout en GBR, dans un nouvel enrobé, est fixée à 20 % et aucune norme ne prescrit la caractérisation du bitume du GBR. Toutefois, il demeure une bonne pratique de caractériser le bitume vieilli du GBR afin d'optimiser la formulation et les caractéristiques du nouvel enrobé.

D'autre part, les caractéristiques intrinsèques et l'angularité du GBR sont analysées. L'étude de tous ces éléments permet d'optimiser l'ajout en GBR afin de rendre le comportement de l'enrobé avec GBR semblable à celui d'un enrobé à chaud standard (Routhier et Bergeron, 2007). Il est à noter que l'homogénéité du GBR est très importante pour obtenir un mélange de bonne qualité. La caractérisation des agrégats et du liant doit être bien représentatif du GBR ajouté à l'enrobé, car ces caractéristiques ont une influence directe sur le pourcentage d'ajout au mélange ainsi que la performance finale de l'enrobé (AIPCR, 2003).

En utilisant les caractéristiques connues du GBR, la formulation s'effectue selon la méthode standard en soustrayant le bitume du GBR au bitume à ajouter au nouveau mélange. La formulation considère tout le bitume du GBR dans le calcul du volume de bitume effectif (V_{be}).

1.5.4 Comportement des enrobés avec GBR

Les performances d'un enrobé contenant du GBR sont directement proportionnelles aux caractéristiques du GBR lui-même, mais également du pourcentage ajouté au mélange. Plusieurs études ont montré que le comportement thermomécanique d'un enrobé possédant des GBR est équivalent ou meilleur qu'un enrobé à chaud traditionnel (AIPCR, 2003). Les performances à long terme sont également semblables. Un suivi d'une section contenant 35 % de GBR a montré après 10 ans que le comportement de l'enrobé au niveau de la capacité structurale, du taux de fissuration ainsi que de l'orniérage était équivalent aux sections témoins en enrobé à chaud traditionnel (Routhier et Bergeron, 2007).

Tel que noté plus tôt, un bitume oxydé est un bitume durci, donc d'une plus grande viscosité. L'ajout de bitume oxydé, comme celui contenu dans les GBR, à un enrobé neuf peut modifier le comportement mécanique de l'enrobé. West *et al.* (2008) ont effectué plusieurs essais sur les effets de l'ajout du GBR avec différentes teneurs de GBR ainsi que différents bitumes. La Figure 1.13 illustre que pour un même bitume, un pourcentage plus élevé de GBR diminue d'au moins 50 % la profondeur des ornières de l'enrobé à 8 000 cycles.

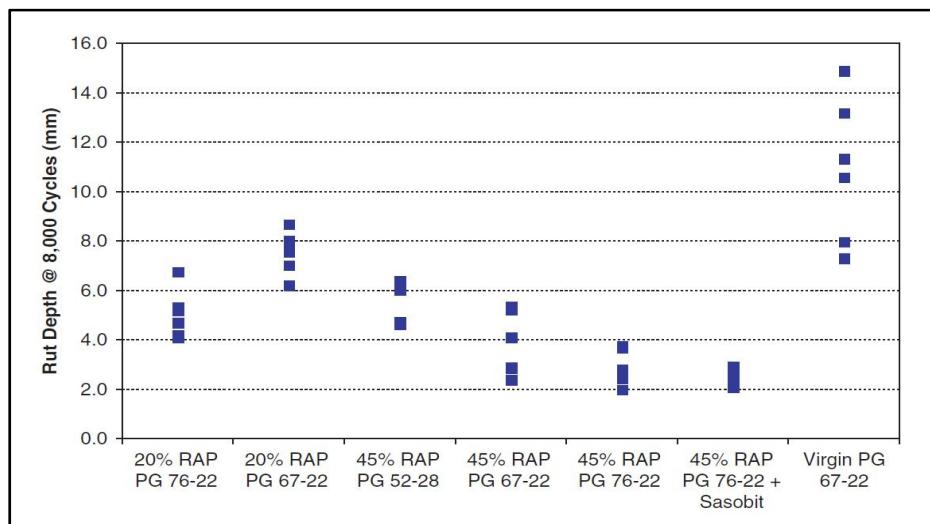


Figure 1.13 Profondeur d'ornières pour différents enrobés
Tirée de West *et al.* (2008, p. 105)

Des résultats à ce jour donnent des modules complexes similaires ou plus élevés qu'un enrobé à chaud traditionnel (West *et al.* 2008). Également, l'ajout de GBR augmente principalement le module complexe d'un enrobé à haute température et a peu d'influence à basse température (Xinjun *et al.* 2008). La Figure 1.14 montre que les enrobés contenant un pourcentage plus élevé de GBR possèdent des modules plus élevés que l'enrobé à chaud, mais que l'écart entre les modules est plus accentué en basse fréquence, soit l'équivalent d'une température élevée selon le principe d'équivalence temps-température. Cela concorde avec les résultats des études effectuées par Xinjun *et al* (2008).

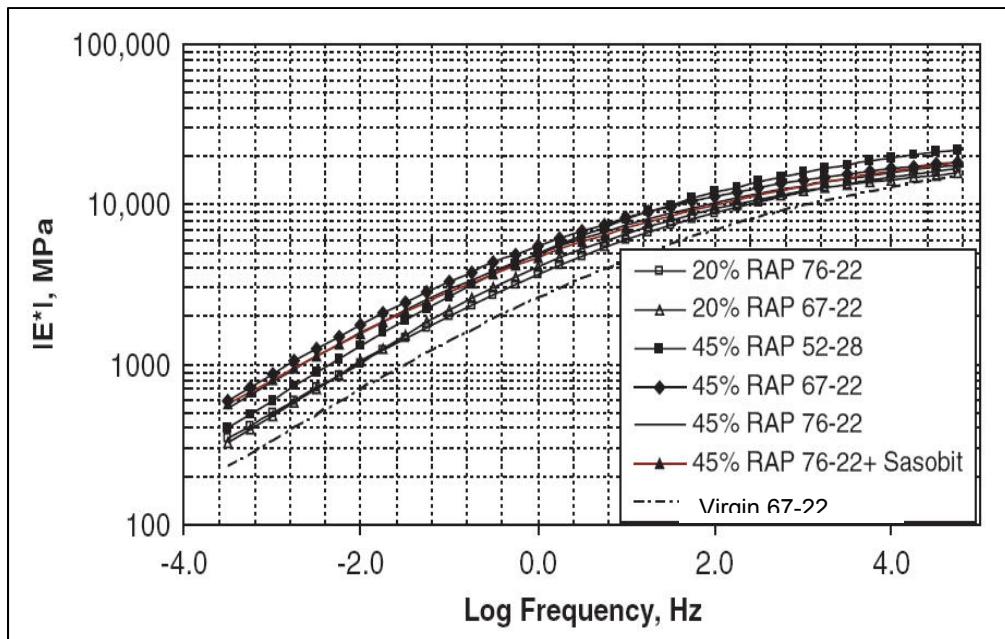


Figure 1.14 Courbes maîtresses du module complexe pour différents enrobés
Adaptée de West *et al.* (2008, p. 106)

1.6 Comportement thermomécanique des enrobés

L'étude de la rhéologie permet de définir le comportement viscoélastique linéaire des enrobés. La rhéologie se définit comme étant l'évolution des déformations sous contraintes selon différentes plages de températures et de fréquence de chargement (Carter et Perraton, 2002). Cette étude mène au module complexe qui permet de représenter le comportement viscoélastique linéaire (VEL).

Le comportement de l'enrobé varie en fonction de la température ainsi que de la durée d'application d'une charge. Afin d'évaluer ce comportement de façon plus précise, l'essai de module complexe permet d'étudier le comportement d'un enrobé en petite déformation dans le domaine linéaire sous différentes températures et fréquences. Afin de mieux comprendre une des parties de ce programme expérimental, une introduction générale de la caractérisation des enrobés par le module complexe (E^*) est requise.

1.6.1 Classe de comportement des enrobés

Les granulats et le bitume dans l'enrobé influencent son comportement. Le bitume, qui procure une cohésion à l'enrobé, est un matériau qui possède une viscosité. Cette dernière caractéristique permet à l'enrobé de posséder des propriétés rhéologiques qui varient en fonction de la température et du temps d'application d'une charge. L'étude de ce comportement particulier permet d'identifier les quatre types de comportement principaux des enrobés en considérant l'amplitude de la déformation ($|\epsilon|$) et le nombre de cycles de chargement appliqué (N) (Olard, 2003) :

1. Le comportement non linéaire,
2. Le comportement viscoélastique linéaire (VEL),
3. La fatigue,
4. Les déformations permanentes (irréversibles).

Le comportement non linéaire se produit lors de « grandes » déformations sous un nombre de cycles restreints. Le comportement VEL est caractéristique de petites déformations ($\epsilon_0 < 10^{-4}$ μdef) avec, au plus, quelques centaines de cycles. En ce qui concerne la fatigue, elle se produit lorsque le matériau atteint plusieurs centaines de milliers de cycles (10^6) sous de petites déformations.

Enfin, les déformations permanentes sont représentatives de l'orniérage et se produit lorsque le chargement provoque une déformation proche de la rupture (la partie plastique du comportement du matériau est atteinte) ce qui produit une déformation irréversible. L'accumulation de ce phénomène produit les ornières (Olard, 2003). La Figure 1.15 permet de représenter ces classes de comportement de façon générale qui varient en fonction des matériaux et du type d'enrobé utilisé.

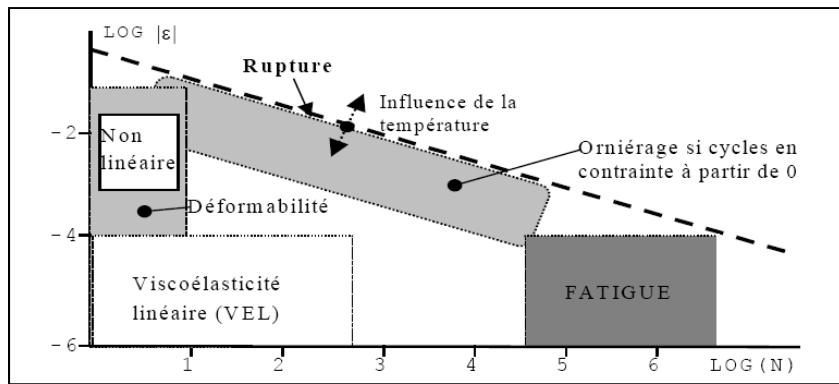


Figure 1.15 Classes de comportement type des enrobés
Tirée de Olard (2003, p. 57)

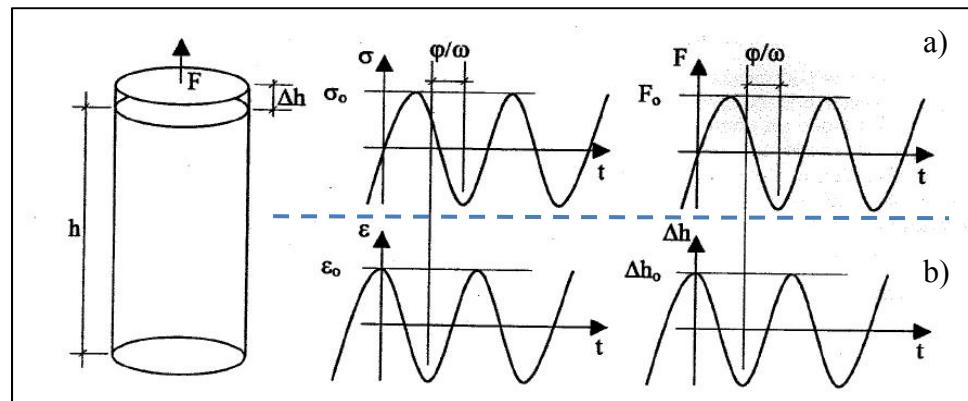
1.6.2 Module complexe

Le principe de l'essai de module complexe est de déterminer la rhéologie en petites déformations des enrobés. Au laboratoire sur les chaussées et les matériaux bitumineux (LCMB), l'essai s'effectue avec une presse MTS (*Materiel testing System*) ou appelée également équipement de traction-compression directe (TCD) où plusieurs cycles de compression et de tension sont réalisés sur un échantillon. La Figure 1.16 présente l'appareil utilisé lors des essais. Avec cet appareil, il est possible de contrôler la force ou la déformation appliquée à un échantillon placé dans une enceinte à température contrôlée.

Deux types d'essai existent afin de déterminer le module complexe. Le premier essai est par contrainte imposée, et le deuxième essai consiste en une déformation imposée. La Figure 1.17 présente les deux types possibles d'essais. Ces essais sont dits homogènes, car ils permettent un champ de contrainte homogène en tout point dans le matériau en raison des sollicitations en compression et tension perpendiculaire à la surface. Ceci permet d'obtenir directement les propriétés rhéologiques du matériau en fonction de sa déformation (Carter et Perraton, 2002). Également, ces types d'essais appartiennent à la catégorie « d'essai de détermination » qui, selon Di Benedetto (1998), « permet d'obtenir l'état de contrainte et de déformation du matériau considéré en suivant directement le schéma de la mécanique des milieux continus ».



Figure 1.16 Presse MTS au LCMB



a) Contraintes contrôlées b) Déformations contrôlées

Figure 1.17 Évolution des contraintes et des déformations d'un matériau viscoélastique linéaire lors d'un essai de module complexe
Adaptée de Carter *et al* (2002, p. 4)

CHAPITRE 2

LES ENROBÉS À BASSE ÉNERGIE

2.1 Fondement et principe des enrobés à basse énergie

Les coûts de l'énergie sont continuellement à la hausse au niveau mondial, ce qui amène des coûts de production plus élevés des enrobés. De plus, les aspects environnementaux sont des enjeux majeurs au sein de notre société. L'industrie de l'enrobé est directement touchée par ces deux aspects. Depuis une dizaine d'années, plusieurs méthodes d'enrobés tièdes ont été créées afin de réduire les émissions polluantes et les coûts. Par la suite, toujours avec le but premier de réduire les coûts de production et diminuer les impacts environnementaux négatifs, l'industrie de l'enrobé a innové en créant des enrobés semi-tièdes ou enrobés à basse énergie (EBE). Également, les termes enrobé à basse température (EBT) et *Low Energy Asphalt* (LEA) sont souvent retrouvés.

Lors de la fabrication d'un enrobé, l'énergie consommée dépend de la température de production du mélange et de la teneur en eau initiale dans les granulats (Sauzéat *et al.* 2008). L'eau nécessite une grande énergie afin d'augmenter sa température, soit environ 4,187 kJ/kg d'eau pour chaque tranche de 1 °C. L'énergie requise pour sécher des granulats à une température donnée (0,835 kJ/kg) est cinq fois moins grande que l'énergie nécessaire pour chauffer une masse équivalente d'eau à la même température. Cependant, la plus grande énergie consommée se situe à la phase d'évaporation de l'eau. La quantité d'énergie nécessaire pour seulement évaporer l'eau, soit le passage du liquide en gaz, nécessite cinq fois plus d'énergie que de chauffer cette eau de 0 °C à 100 °C. Cela représente environ 2 257 kJ/kg d'eau pour chaque degré Celsius. (Olard *et al.* 2008). Un calcul rapide permet de voir qu'une augmentation de 0 °C à 100 °C nécessite 418,7 kJ ce qui est 5,4 fois moins que l'énergie requise pour l'évaporation de l'eau, qui est d'environ 2 257 kJ/kg. Donc, le principe des enrobés à basse énergie est donc de demeurer sous la barre des 100 °C. Toutefois, la

température d'évaporation de l'eau dépend de la pression atmosphérique existante ce qui peut faire légèrement varier la valeur de 100 °C.

La Figure 2.1 illustre où se situe la classe des différents enrobés selon les températures de malaxage. Les enrobés à froid sont de l'ordre de 0 à 20 °C et sont généralement malaxés avec des émulsions. Les enrobés tièdes et à chaud correspondent respectivement à des valeurs entre 120 et 140 °C ainsi que 150 et 180 °C. La température de malaxage des enrobés varie selon le type de bitume utilisé. Pour leur part, les enrobés semi-tièdes se situent entre 60 et 100 °C, soit entre les enrobés à froid et tièdes et juste en dessous de la température d'évaporation de l'eau, soit 100 °C. De plus, la Figure 2.1 illustre la quantité nécessaire d'énergie utilisée au point d'ébullition (100 °C) afin de faire évaporer l'eau, soit la zone de vaporisation. Une grande énergie est consommée seulement pour l'évaporation de l'eau. Durant cette période, il n'y a aucune augmentation de température.

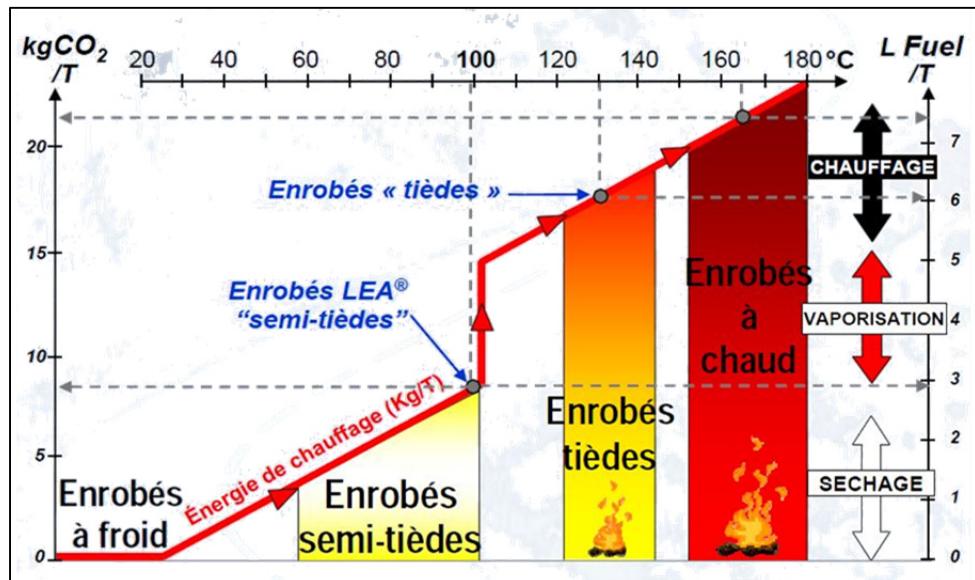


Figure 2.1 Différents types d'enrobé selon les températures de malaxage
Tirée de Olard *et al.* (2008a, p. 2)

Les enrobés à basse énergie, développés par Romier en France (Button *et al.* 2007), utilisent une technique d'enrobage s'effectuant en dessous de 100 °C. Les enrobés EBE se fondent sur

la capacité du bitume chaud à mousser à la surface des granulats chauds et humides et ce, même en dessous du point d'évaporation de l'eau, soit 100 °C. L'expansion spontanée du volume de bitume permet d'abaisser la viscosité du bitume et ainsi créer un film de bitume sur les granulats, ce qui améliore la maniabilité du mélange (Ventura *et al.* 2009). Cet aspect permet de bien mélanger les granulats et le bitume et de fournir un mélange homogène à basse température. Également, ceci facilite la mise en place en chantier.

De façon générale, l'enrobage s'effectue en réchauffant les gros granulats possédant une teneur en eau normale d'environ 1 à 2 % ainsi que le bitume (150 à 180 °C) à une température normal d'enrobé à chaud. Par la suite, les granulats fins possédant plus d'eau (généralement de 3 à 7 %) sont introduits dans le mélange chaud, sans être préalablement chauffés. L'enrobé final permet d'obtenir une température entre 80 et 95 °C (Button *et al.* 2007). L'avantage de cette technique est d'empêcher l'assèchement des granulats humides qui nécessite une quantité énorme d'énergie. En chantier, la température de compaction de ces enrobés se situe généralement entre 60 et 70 °C (Romier *et al.* 2006).

La Figure 2.2 présente la progression et le transfert de chaleur lors du malaxage des divers constituants de l'enrobé pour une des techniques d'enrobage à basse température. Dans le cas présent, les gros granulats et le bitume sont chauffés au-delà de 100 °C. Le sable humide et l'eau sont ajoutés. L'énergie des gros granulats et du bitume est transmise à l'eau et au sable afin d'augmenter leur température. L'évaporation de l'eau se produit formant ainsi la mousse de bitume. Il est possible de constater que la variation de température de l'eau et du bitume est plus accentuée que celle des éléments solides. Les gros granulats, enrobés d'un film de bitume, permettent à l'eau et au bitume d'entrer directement en contact afin de s'échanger leur énergie. L'eau demandant une grande quantité d'énergie afin de s'évaporer, tire son énergie du mince film de bitume autour des granulats qui perd rapidement de sa chaleur.

À la fin du malaxage, un équilibre thermique est atteint, soit environ 60 secondes après le début du malaxage. Bien entendue, cette durée dépend de la température des éléments chauds et froids.

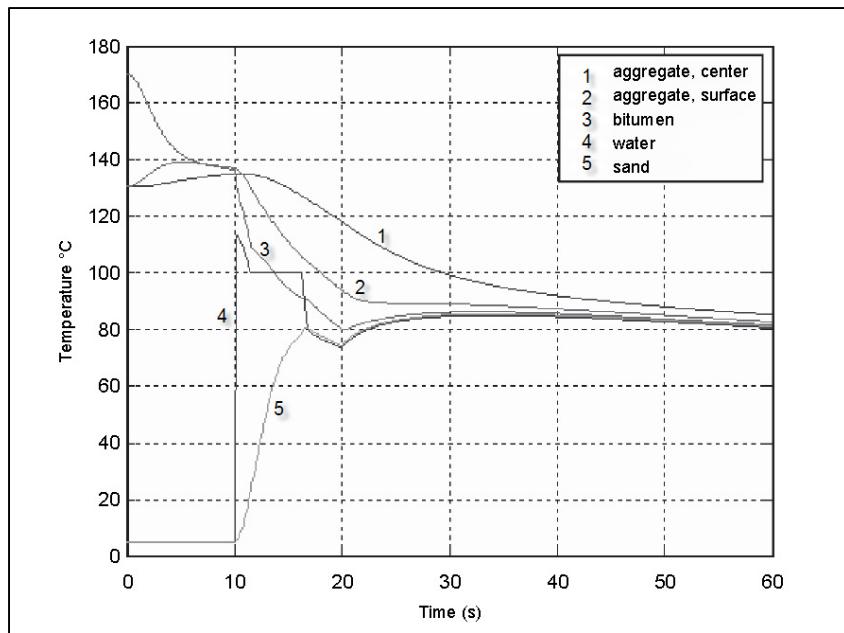


Figure 2.2 Évolution de la température des matériaux durant le malaxage d'un enrobé à basse énergie
Adaptée de Romier *et al.* (2006, p. 107)

2.2 Utilisation d'adjuvants

Dans certains cas, des adjuvants peuvent être utilisés. L'utilisation d'adjuvant sert à aider à la maniabilité de l'enrobé malaxé ou à l'adhésivité du bitume en dessous de 100 °C (Olard *et al.* 2007c). Ces ajouts permettent, entre autres, de modifier la viscosité du bitume. Généralement, une viscosité plus faible est recherchée afin d'avoir une capacité plus grande d'enrobage à basse température. Dépendamment du type de produit ajouté et de sa quantité, des études ont montré que les additifs peuvent changer le grade du bitume. Par exemple, un ajout de 2,5 % massique de Sasobit (additif à base de cire paraffinique) dans un enrobé permet de changer le grade de bitume de PG 58-28 à PG 64-22 (Hurley et Prowell, 2005a) et même jusqu'à un grade PG 64-16. (Carter *et al.* 2009). Avec l'utilisation de GBR, l'additif peut également servir à rajeunir le vieux bitume. Dans ce cas, l'adjuvant est généralement ajouté au bitume immédiatement avant le système de moussage du bitume (Olard *et al.* 2009).

Il existe une multitude d'additifs sur le marché ayant plusieurs influences sur le bitume autre que le Sasobit. Ces additifs sont souvent utilisés pour les enrobés tièdes (100 à 140 °C), mais ils peuvent être incorporés au principe des enrobés à basse énergie, principalement pour aider à réduire la viscosité du bitume. Par exemple, l'Aspha-min qui retient jusqu'à 21 % d'eau dans sa structure cristalline (Hurley et Prowell, 2005b), évacue cette eau lors du malaxage à des températures de 70 à 220 °C (Mansfeld *et al.* 2009). Une mousse de bitume est ainsi produite. Un autre produit à base de cire, appelé Asphaltan B (Button *et al.* 2006 et Kristjansdottir, 2006) ainsi que l'Hypertherm, un liquide non aqueux (Manolis *et al.* 2008), sont d'autres adjuvants réduisant la viscosité du bitume.

D'autre part, les additifs peuvent aider à allonger la vie de la mousse de bitume, donc la maniabilité de l'enrobé. Ces additifs sont souvent employés avec des bitumes durs et des liants polymères (Olard *et al.* 2007c). Également, des procédures de mousse de bitume sont utilisées avec des quantités de 0,5 à 1,0 % de filler hydrophile ce qui aide à contrôler et maintenir l'humidité latente de la mousse (Angelo *et al.* 2008).

Enfin, l'ajout d'un filler actif en petites quantités comme du ciment ou de la chaux est parfois préférable. Ceci augmente, après le contact avec l'eau, les forces d'adhésion entre les granulats et le bitume. Également, ces granulats très fins, inférieurs à 0,075 mm, permettent une meilleure répartition du bitume et une diminution de sa plasticité. Le bitume avec le filler agit comme mortier et procure un meilleur enrobage des gros granulats (Wirgten, 2004).

2.3 Méthodes d'enrobage des enrobés à basse énergie

Il existe quatre principales méthodes d'enrobage en centrale pour produire un EBE. Les méthodes d'enrobage dépendent principalement de la formulation de l'enrobé ainsi que de la configuration de la centrale d'enrobage (Olard *et al.* 2007). La Figure 2.3 présente les principales méthodes et les quatre étapes de malaxage. Les températures indiquées sont à titres informatifs seulement pour indiquer l'équilibre thermique se créant dans le mélange. La température de chauffage des granulats et du bitume dépend des normes de formulation

utilisées. Également, pour le bitume, le type de bitume influe sur la température de chauffage avant malaxage.

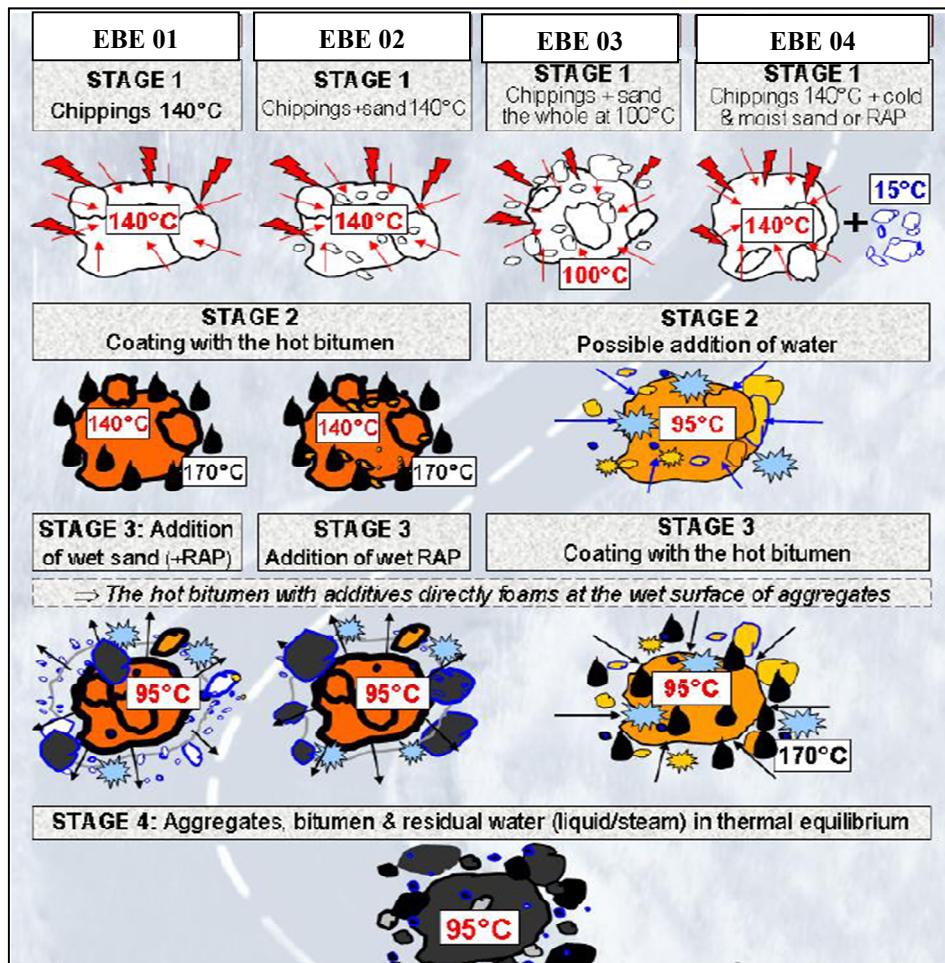


Figure 2.3 Quatre principales méthodes et d'étapes de malaxage d'EBE
Adaptée de Olard *et al.* (2007a, p. 6)

2.3.1 Méthode d'enrobage EBE 01

La première méthode d'enrobage d'EBE consiste au séchage au-dessus de 100°C des gros granulats seulement afin d'enlever complètement l'humidité contenue. Par la suite, le bitume chaud est ajouté afin d'enrobé ces gros granulats. L'enrobage complété, les granulats fins humides et/ou le GBR humide sont ajoutés à froid. Au contact du bitume, l'eau contenue dans les granulats fins s'évapore ce qui produit le moussage du bitume. Cette mousse permet

de bien enrober les particules fines et produire un enrobage homogène de l'enrobé en dessous de 100 °C.

2.3.2 Méthode d'enrobage EBE 02

La deuxième séquence d'enrobage consiste au chauffage au-dessus de 100°C des gros granulats ainsi que des fins. Donc, l'humidité des granulats est complètement enlevée pour cette méthode. Par la suite, le bitume chaud est ajouté au granulat. Le malaxage effectué, le GBR est introduit froid et humide. Encore une fois, l'eau présente s'évapore et produit une mousse de bitume qui rend l'enrobage homogène de l'enrobé en dessous de 100 °C.

2.3.3 Méthode d'enrobage EBE 03

La troisième méthode consiste, cette fois-ci, à chauffer tous les granulats près de la température d'évaporation de 100°C sans toutefois l'atteindre. Si l'eau contenue dans les granulats est insuffisante, un apport en eau peut être prévu avant l'ajout du bitume. Le bitume chaud est par la suite ajouté au mélange des granulats possédant la teneur en eau adéquate. La mousse de bitume enrobe de façon adéquate les granulats et la température finale de l'enrobé se situe en dessous de 100 °C.

2.3.4 Méthode d'enrobage EBE 04

La quatrième méthode débute par chauffer les gros granulats auxquels ont incorpore les granulats fins et/ou le GBR froid et humide. La température de l'enrobé se stabilise en dessous de 100 °C avec une quantité d'eau résiduelle. Si la teneur en eau est trop basse, une quantité additionnelle pour être ajoutée à ce moment. Comme toujours, le bitume chaud est ajouté afin de produire une mousse au contact de l'eau amenant la température de l'enrobé en dessous de 100 °C.

2.4 Production en centrale

La production en centrale d'un EBE peut s'effectuer de différentes manières selon la méthode d'enrobage désirée et selon la nature de l'usine d'enrobage (continue ou discontinue). Toutes les usines peuvent s'adapter afin de produire des EBE. Par exemple, certaines centrales d'enrobage peuvent nécessiter des systèmes d'ajout d'eau automatiques afin d'assurer un meilleur contrôle de l'eau (Ventura *et al.* 2008).

Les granulats humides sont habituellement ajoutés par le même système d'ajout de GBR. Si une portion des granulats est trop humide, il peut être préalablement séché partiellement. Il arrive que l'humidité contenue dans les particules fines rejetées (environ 2 %) dans le dé poussiére à sec soit trop élevée, ce qui peut bloquer prématurément ce dernier. Pour résoudre cet inconvénient, il est possible d'ajouter un petit brûleur après le tambour pour sécher les fines avant qu'elles soient acheminées dans le dé poussiére. Cependant, ceci augmente les coûts de production (Ventura *et al.* 2008).

Les coûts de modifications de l'usine pour permettre la fabrication d'EBE sont également un élément important à considérer. Romier *et al.* (2006) ont développé des équipements spécialement conçus pour la production des EBE et pouvant se joindre à une centrale existante. Ces équipements sont un dispositif contrôlant les granulats fins humides et un réservoir pour l'ajout d'eau au besoin. Le processus a été modifié afin de malaxer les matériaux dans l'ordre correspondant et celui-ci permet l'ajout de GBR directement dans le mélangeur (Button *et al.* 2007). La Figure 2.4 schématise le fonctionnement d'une centrale d'enrobage discontinue et adaptée aux EBE.

Selon les développeurs (Romier *et al.* 2006), les modifications apportées aux centrales sont mineures et permettent un enrobé possédant des performances équivalentes aux enrobés à chaud. De plus, selon différentes observations, cette technique réduit l'encrassement des équipements et permet ainsi d'en réduire les opérations d'entretien (Button *et al.* 2007).

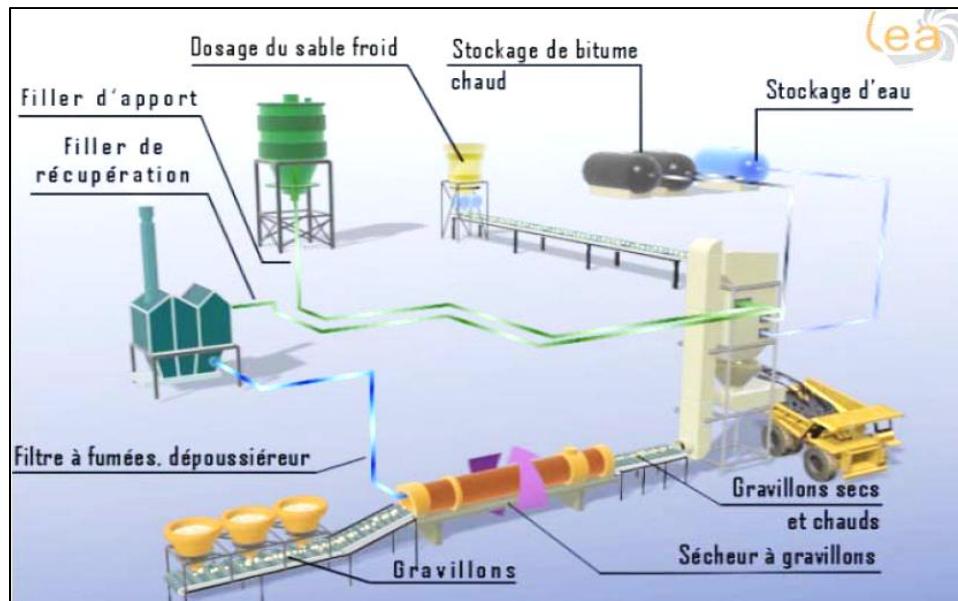


Figure 2.4 Installation d'une usine pour la fabrication d'un enrobé EBE
Tirée de Romier *et al.* (2006, p. 110)

2.5 Performance en chantier

Les matériaux utilisés et les techniques de mise en œuvre en chantier des EBE sont exactement les mêmes que pour un enrobé à chaud. (Romier *et al.* 2006).

Tel que mentionné auparavant, Romier *et al.* (2006) précise que les enrobés EBE présentent des performances équivalentes à celles des enrobés à chaud. C'est en 2003, en France, que le premier essai en chantier d'EBE de 150 tonnes avec une température finale de 80 °C a été réalisé. Un pourcentage d'eau résiduelle de 0,5 % dans l'enrobé a permis d'assurer une bonne maniabilité. De cette étude, les points suivants ont été observés :

1. Tous les types d'enrobés peuvent être malaxés selon le principe des EBE,
2. La méthode utilisée pour la fabrication des EBE n'utilise pas un surplus de bitume,
3. Les EBE peuvent être entreposés dans les mêmes conditions qu'un enrobé à chaud,
4. Le temps de transport peut être considérablement allongé,

5. La mise en œuvre et la compaction des EBE à 70 °C sont possibles avec les équipements traditionnels sans surplus d'énergie,
6. Les EBE possèdent des textures de surface semblable à celle d'un enrobé à chaud.

Enfin, l'avantage et l'un des principaux buts des EBE est la réduction de l'énergie utilisée. La Figure 2.5 présente le bilan de l'énergie nécessaire pour la production d'un enrobé à chaud standard et celui d'un EBE lors des essais effectués en 2003. On constate que les EBE permettent d'être deux fois plus économique au niveau de la quantité d'énergie utilisée, ce qui correspond à une diminution importante des coûts de production (Romier *et al.*, 2006). Cette économie d'énergie entraîne une économie importante au niveau des coûts énergétiques associés à la production des enrobés qui est un avantage majeur.

Mixture	M (kg)		Temperature °C		Heat Energy: Q (MJ)		
	Dry Matter	Water	Ti	Tf	Dry Matter	Eau	Total (dry matter + water)
HMA							
Wet chippings	618.3	6.2	10	160	77.6	17.1	94.8
Wet sand	322.9	13.5	10	160	40.5	36.9	77.4
Bitumen	53.8		130	170	4.5		4.5
Total							177.0
LEA							
Wet chippings	618.3	6.2	10	130	62.1	16.8	78.9
Wet sand	322.9	13.5	10	10	0	0	0
Bitumen	53.8		130	170	4.5		4.5
Total							83.0

Figure 2.5 Comparaison des énergies requise pour la production d'un enrobé à chaud et d'un EBE
Tirée de Romier *et al.* (2006, p. 105)

2.6 Comportement thermomécanique des EBE

2.6.1 Impact de la teneur en eau dans le mélange

Le pourcentage d'humidité initial des granulats a une influence significative et directe sur la qualité d'enrobage d'un EBE. En effet, l'eau permet de disperser le bitume dans le mélange et agit comme lubrifiant dû à la nature hydrophobe du bitume. L'eau limite le nombre de

contacts entre le bitume et les granulats. Donc, une quantité d'eau minimale est nécessaire pour produire un effet de lubrification. Toutefois, trop d'eau empêche le bitume d'avoir une cohésion suffisante pour adhérer à la surface des granulats et diminue cette adhésion à long terme (Gaudefroy *et al.* 2007).

Une grande force de liaison entre le bitume et les granulats est importante afin d'augmenter la durabilité de l'enrobé. En présence d'eau, cette force est diminuée. Donc, une teneur en eau trop élevée apporte un dommage à l'enrobé (Kassem *et al.* 2006). L'humidité trop élevée dans un enrobé diminue sa résistance initiale à l'orniérage et à la fatigue et accélère les dommages à l'enrobé sous l'effet de sollicitations. Cette diminution de résistance est accrue sous de fortes charges (Kim *et al.* 2004).

L'absorption en eau de l'enrobé varie considérablement en fonction du type de bitume utilisé. Le taux d'absorption peut significativement altérer le comportement du mastic dans l'enrobé. De plus, Kim *et al.* (2004) ont montré que la performance d'un mastic est fortement influencée par la nature du filler ajouté au mélange. D'autre part, l'absorptivité d'un granulat varie également en fonction de la grosseur et de la distribution des vides (Fredlund *et al.* 1993). Le même principe s'applique à l'enrobé. La grosseur, la distribution et la connectivité du réseau des vides dans l'enrobé influence la capacité de l'eau à être absorbée et évaporée de l'enrobé (Masad *et al.* 2006). Ceci est un facteur important dans les dommages liés à l'humidité dans l'enrobé. Par exemple, un mélange procurant une évaporation lente de l'eau produit plus de dommage causé par cette eau en raison d'une présence plus longue au sein de l'enrobé. De façon générale, des vides de grandes dimensions permettent l'absorption de plus d'eau, mais en relâchent une grande quantité, et ce, beaucoup plus facilement (Kassem *et al.* 2006).

Il a été montré que l'enrobage en dessous du point d'évaporation (± 100 °C) nécessite un pourcentage d'eau résiduelle dans l'enrobé d'environ 0,5 à 0,7 % afin d'offrir une bonne maniabilité. Lors de la mise en place, l'eau sort de l'enrobé pour obtenir une teneur en eau

finale d'environ 0,5 %, soit la teneur en eau présente dans un enrobé à chaud traditionnel (Ventura *et al.* 2008).

2.6.2 Ouvrabilité

Il a été vu que plusieurs facteurs influencent l'ouvrabilité d'un EBE. Ces facteurs sont la température de malaxage, la nature du liant, le pourcentage d'ajout en GBR et le pourcentage initial en eau du granulat.

Tout d'abord, la température de malaxage agit sur la viscosité du bitume en le rendant plus ou moins visqueux. De façon générale, une température plus haute permet au bitume d'être moins visqueux et plus maniable. La Figure 2.6 présente l'effet de différentes températures de granulat pour l'enrobage au bitume mousse sur l'évolution des vides d'un enrobé à froid avec des granulats à 20 °C et d'un EBE avec des granulats à 70 et 90 °C en fonction du nombre de girations. Pour un même type et une même teneur en bitume de 5,6 % et une quantité initiale d'eau dans le granulat de 5 %, l'enrobé est plus maniable avec des températures des granulats de 70 et 90 °C comparativement à des granulats à 20 °C (Gaudefroy *et al.* 2007). Les EBE à 70 et 90 °C respectent les critères de vides contrairement à l'enrobé à froid à 20 °C qui possède 4 % de plus de vides que la limite à 60 girations. Même avec une teneur en eau de 5 % dans les granulats, il est impossible d'obtenir une maniabilité adéquate à très basse température. L'enrobé nécessite une trop grande énergie de compactage. Ces résultats concordent avec ceux de Jenkins (2000), ou ces résultats ont montré que le chauffage des granulats permettait d'obtenir une meilleure dispersion de la mousse sur les granulats et produire un meilleur enrobage.

Également, il est intéressant de remarquer que les vides sont presque identiques pour les deux EBE compactés à haute température. Par la suite, une diminution d'environ 50 % de vides est présente entre les essais à 70 et 20 °C. De plus, Van de Ven *et al.* (2007) ont obtenu des résultats similaires avec une diminution des vides de 30 % lorsque la température des

granulats, contenant 3 % d'eau, augmentait de 45 à 90 °C. Cela montre que la maniabilité de l'enrobé diminue de façon non linéaire lorsque la température diminue.

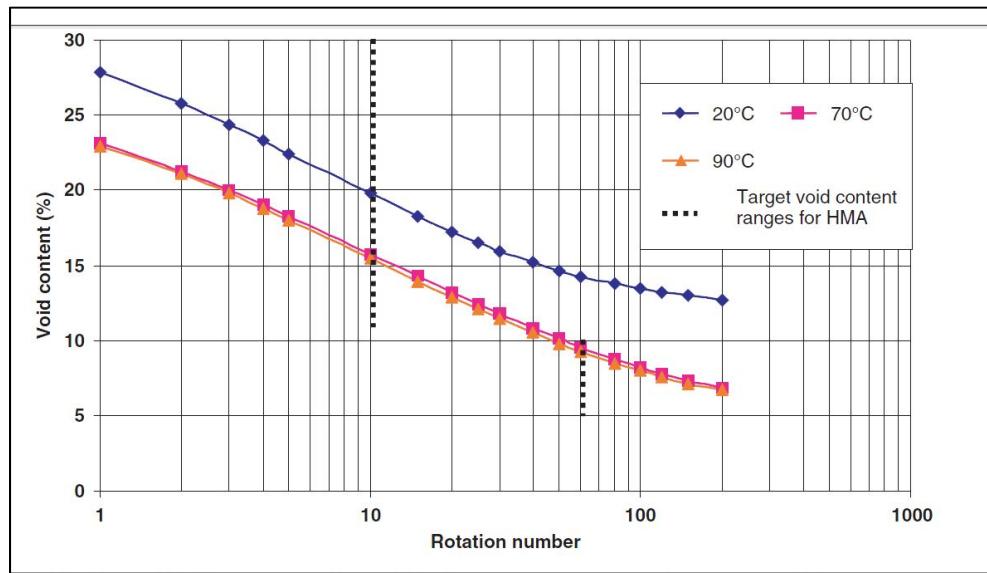


Figure 2.6 Pourcentage de vides selon le nombre de girations pour trois températures de malaxage d'EBE (70 et 90 °C) et d'un enrobé à froid (20 °C) avec une teneur initiale en eau des granulats de 5 %

Tirée de Gaudefroy *et al.* (2007, p. 93)

D'autre part, des essais effectués par Marcotte *et al.* (2010) ont montré, qu'avec l'utilisation de 15 % massique de GBR possédant une teneur en eau initiale de 5 %, la maniabilité de l'EBE était semblable à celui d'un enrobé à chaud traditionnel. Donc, l'ajout en GBR, qui amène généralement un enrobé plus difficile à compacter en raison du bitume vieilli, peut être incorporé dans un EBE sans changer la teneur en eau initiale du granulat et obtenir une maniabilité semblable à un enrobé à chaud. Ces résultats, présentés à la Figure 2.7, illustrent le pourcentage de vides d'un EBE avec 15 % de GBR et de deux enrobés à chaud, dont l'un possède également 15 % de GBR. L'EBE possède des vides légèrement plus faibles à 10 girations comparativement aux enrobés à chaud. Par la suite, les vides des enrobés à chaud diminuent plus rapidement que l'enrobé EBE pour obtenir, à 200 girations, un plus grand écart entre les vides des enrobés à chaud et de l'EBE. De plus, d'autres essais (Olard *et al.* 2007c) ont montré qu'à un petit nombre de girations, les EBE obtenaient des vides plus petits

que l'enrobés à chaud. Ces essais ont montré qu'un EBE peut obtenir une teneur en vide de l'ordre de 15,7 % à 25 girations comparativement à 18,6 % pour l'enrobé à chaud. Par conséquent, l'aptitude au compactage d'un EBE est semblable à l'enrobé à chaud. De plus, l'utilisation de 15 % de GBR diminue légèrement l'aptitude au compactage d'un EBE à long terme (200 girations), soit environ 1 % de plus de vide, comparativement à l'enrobé à chaud avec 15 % de GBR.

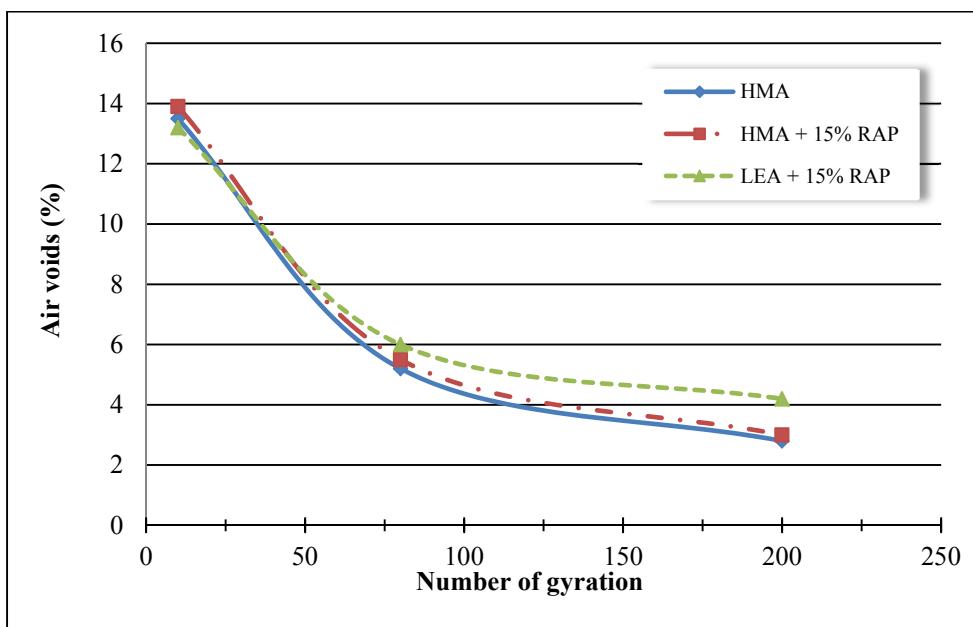


Figure 2.7 Évolution du pourcentage de vides selon le nombre de girations à la PCG pour un EBE (LEA) avec une teneur en eau initiale de 5 % et deux enrobés à chaud (HMA)
Tirée de Marcotte *et al.* (2010, p. 14)

Tel que vu précédemment, l'eau contenue dans l'enrobé lubrifie les granulats. Donc, au début du compactage, l'agencement du squelette granulaire semble se modifier plus rapidement que l'enrobé à chaud. Par la suite, l'enrobé devient plus stable, car la diminution des vides s'effectue plus lentement. La diminution de température durant l'essai augmente également la viscosité de l'enrobé, ce qui rend ce dernier plus difficile à compacter, tel qu'illustré et discuté à la Figure 2.6. Un autre facteur possible est l'évacuation de l'eau contenue dans l'enrobé par l'énergie de compactage. La perte d'eau rapide dans l'enrobé explique bien le

taux de diminution des vides de l'EBE qui décroît rapidement à petit nombre de girations. Avec le compactage, les vides interstitiels deviennent plus faibles ce qui diminue l'espace disponible pour l'eau. Étant incompressible, l'eau s'évacue de l'enrobé plus ou moins rapidement, dépendamment de la grosseur et la distribution des vides.

2.6.3 Orniérage

Les EBE sont malaxés et compactés à plus basse température ($< 100^{\circ}\text{C}$). L'eau joue le rôle majeur pour atteindre un bon enrobage et une facilité de mise en œuvre. Toutefois, étant donné que la technique est relativement récente, le comportement à long terme des EBE en chantier n'est pas encore bien connu. L'orniérage est un comportement thermomécanique à long terme des enrobés pouvant être mesuré en laboratoire. Le comportement à l'orniérage d'un enrobé permet de quantifier ses déformations permanentes dans le temps sous le passage répété d'une charge roulante.

Des essais effectués par Olard *et al.* (2007a et 2008) ont montré qu'à 30 000 cycles, le pourcentage d'ornière des EBE était très similaire à un enrobé à chaud, soit 6,5 % contre 6,4 %. Pour 10 000 cycles, des déformations de 4,0 % pour l'EBE ont été obtenues comparativement à 4,7 % pour l'enrobé à chaud. Également, Romier *et al* (2006) ont obtenu des résultats similaires à l'essai d'orniérage. Pour un enrobé équivalent à un ESG-10, des déformations de 5,6 % pour l'enrobé à chaud et 6,2 % pour l'EBE ont été obtenus à 30 000 cycles. Pour un enrobé équivalent à un ESG-14, des déformations de 6 % pour l'enrobé à chaud et de 5,4 % pour l'EBE ont été recueillies. Pour les deux mélanges, le sable ajouté froid et humide possédait une teneur en eau initiale de 4 %.

D'autre part, Marcotte *et al.* (2010) ont également obtenu des résultats équivalents à l'essai d'orniérage entre l'enrobé à chaud et l'EBE. Les résultats à l'orniérage pour un enrobé à chaud et EBE incluant 15 % de GBR avec une teneur en eau initiale de 5 % sont présentés à la Figure 2.8.

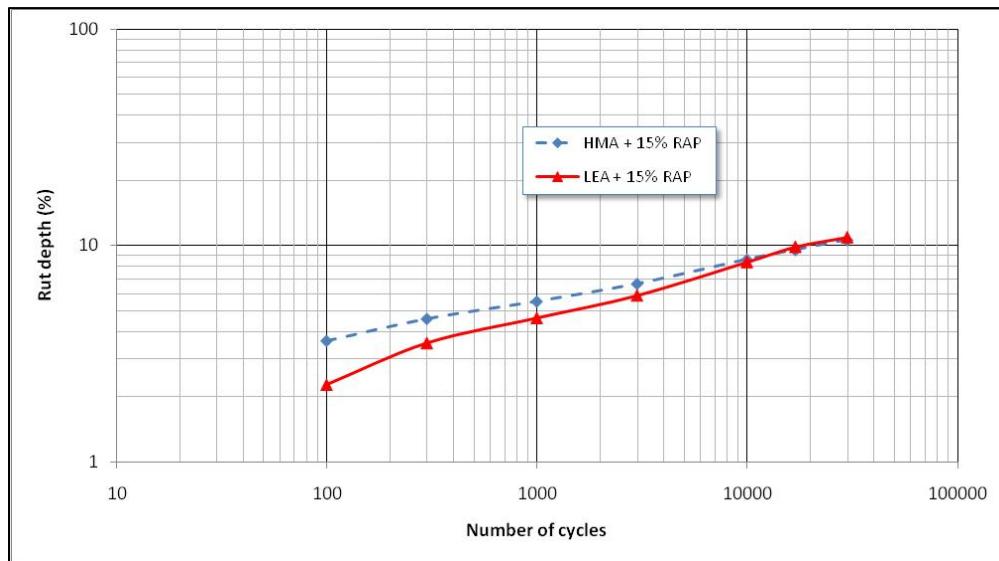


Figure 2.8 Pourcentage de déformation d'un essai à l'orniéreur d'un enrobé à chaud (HMA) et d'un EBE (LEA) avec une teneur en eau initiale du GBR ajouté à froid de 5 %

Tirée de Marcotte *et al.* (2010, p. 15)

À 10 000 cycles, la déformation de l'EBE est légèrement plus petite que pour l'enrobé à chaud, soit 8,2 % contre 8,7 %. Par la suite, les valeurs des déformations se rapprochent pour atteindre une égalité aux environs de 16 000 cycles. À 30 000 cycles, pour l'enrobé à chaud et EBE, les essais effectués ont donné des valeurs respectives de 10,2 et 10,1 %. Les déformations des EBE à l'orniérage, comparativement aux enrobés à chaud, semblent être légèrement plus bas jusqu'aux environs de 10 000 cycles et sont très semblables à long terme, soit 30 000 cycles. Par conséquent, les EBE possèdent des déformations très semblables aux enrobés à chaud avec des déformations plus petites que 1 % à 30 000 cycles.

2.6.4 Module complexe

Du côté du module complexe des EBE, Olard *et al.* (2007a) ont effectués des essais sur deux types d'enrobé présentés à la figure 2.9. Dans la plupart des cas, les EBE possèdent des modules complexes très proches des enrobés à chaud ou avec une différence maximale d'environ 40 % dans un cas. Selon le type d'enrobé, les modules complexes sont plus élevés

et parfois plus faibles que l'enrobés à chaud. Pour le graphique de gauche, les modules complexes des EBE et de l'enrobé à chaud deviennent plus similaires à haute fréquence comparativement aux basses fréquences.

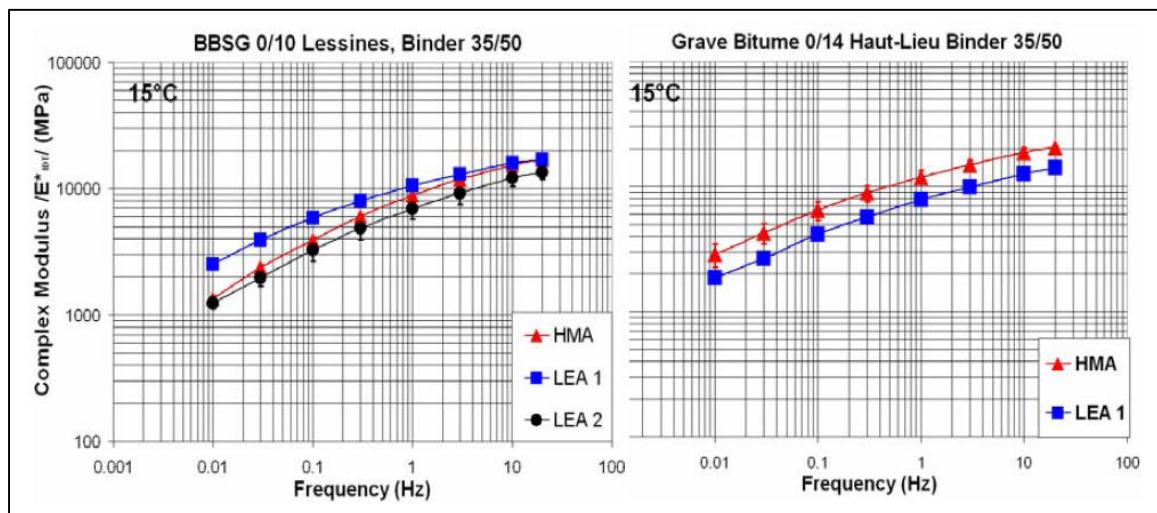


Figure 2.9 Courbes maîtresses à 15 °C du module complexe pour deux types d'EBE (LEA) et d'enrobé à chaud (HMA) avec une teneur en eau initiale des granulats fins ajoutés à froid de 4 %

Tirée de Olard *et al.* (2007a, p. 7)

D'autres études, menées par Marcotte *et al.* (2010) ont montré que les EBE, possédant une teneur en eau initiale de 5 % dans le GBR, obtenaient des valeurs plus élevées du module complexe pour presque toutes les températures et les fréquences que pour un enrobé à chaud standard. Les résultats montrent que les EBE donnent un enrobé plus rigide que les enrobés à chaud. La Figure 2.10 illustre les résultats de cette étude. De plus, comme pour les résultats de Olard (2007a), le module complexe de l'EBE est plus près de celui de l'enrobé à chaud à haute fréquence.

Donc, le module complexe des EBE semble être semblable aux enrobés à chaud. Cette similitude correspond à des granulats ajoutés à froid possédant une teneur en eau initiale d'environ 4 à 5 %. Des teneurs en eau différentes pourraient procurer des différences plus marquées entre les modules des EBE et de l'enrobé à chaud.

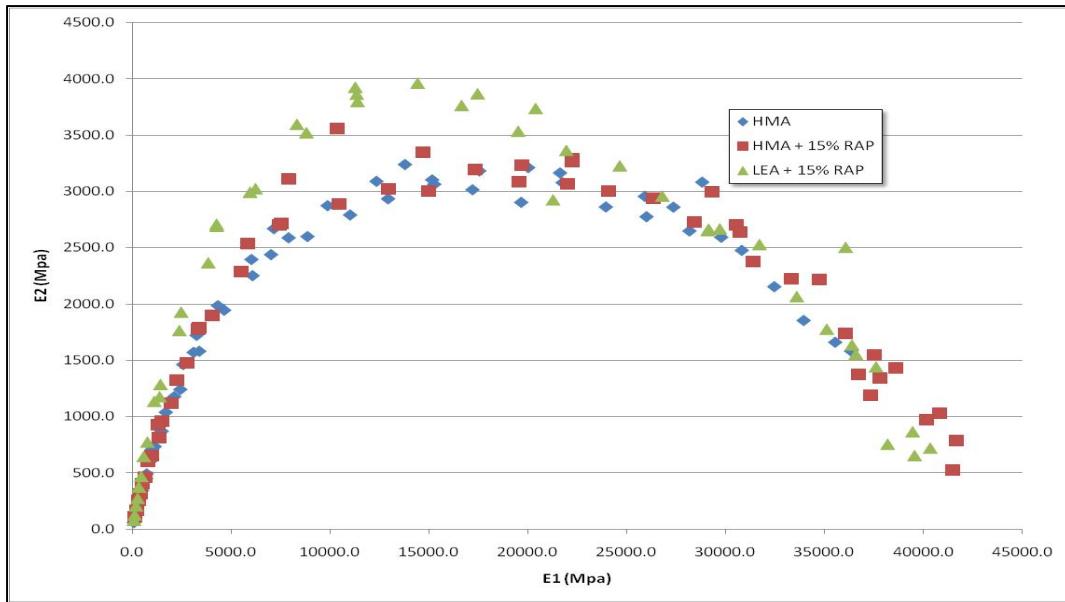


Figure 2.10 Modules complexes représentés dans le plan Cole-Cole pour deux enrobés à chaud (HMA) et un EBE (LEA) avec une teneur en eau du GBR ajouté à froid de 5 %
 Tirée de Marcotte *et al.* (2010, p. 16)

2.7 Avantages et désavantages des enrobés à basse température

L'utilisation des EBE présente également de nombreux avantages étant intéressants à mentionnés. Ceux-ci sont généralement semblables pour chacune des techniques d'enrobage à quelques spécificités près. Comparativement aux enrobés à chaud, les EBE procurent (Button *et al.* 2007) :

1. Une diminution significative de la température de production et de mise en œuvre,
2. Un vieillissement moindre du bitume lors du malaxage et de la mise en place,
3. Une réduction de la ségrégation thermique dans l'enrobé,
4. Une diminution des coûts énergétiques. Selon Kristjansdottir *et al* (2007), une économie pouvant aller jusqu'à 75 % en énergie et une réduction d'émission atteignant les 98 % sont possibles avec les EBE,
5. Une diminution des émissions, des odeurs et des fumés,
6. Un prolongement de la saison de pavage (mise en œuvre par temps froid),

7. Une augmentation de la distance de transport,
8. Une augmentation de la maniabilité pouvant être avantageuse pour l'ajout de GBR, et l'utilisation d'enrobés grenus,
9. Une ouverture rapide de la chaussée après la mise en œuvre,
10. Une amélioration des conditions de travail et de la capacité des travailleurs.

CHAPITRE 3

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Objectif du programme expérimental

Ce chapitre présente la procédure expérimentale effectuée afin de déterminer l'influence de la teneur en eau sur la résistance à l'orniérage et sur le module complexe des enrobés semi-tièdes (enrobés à basse énergie) contenant des granulats bitumineux recyclés (GBR). L'étude permettra de vérifier si le procédé d'enrobage des enrobés à basse énergie contenant des granulats bitumineux recyclés procure des caractéristiques semblables à un enrobé à chaud.

3.2 Critères de formulation d'un enrobé

Au Québec, le chapitre 4 de la norme 4202 (Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des Chaussées) prescrit les critères de formulation des enrobés. Toutes les composantes de l'enrobé, soient les granulats et le bitume, doivent respecter plusieurs critères. La Figure 3.1 montre les différents critères requis par la norme pour les enrobés.

3.3 Enrobé ciblé

Le Ministère des Transports du Québec utilise une grande famille d'enrobés. Ces enrobés ont les fonctions de couche de base, couche de surface, couche de correction et couche antifissure. L'usage de chaque type d'enrobé est spécifié à la Figure 3.1. Le but premier de cette étude est d'optimiser la méthode d'enrobage en reproduisant un enrobé typique et non de développer ou d'améliorer un enrobé existant. Pour ces raisons, des informations ont été recueillies sur la formulation des enrobés (classe et pourcentage massique des granulats), l'ajout en GBR autorisé au Québec et sur des données statistiques d'études antérieures qui ont permis de déterminer les variables de fabrication des enrobés.

Types d'enrobés	GB-20	ESG-14	ESG-10	EG-10	EGA-10	EC-10	SMA-10	ESG-5	EGM-10	EC-5	Méthodes d'essai
Usages	Couche de base	Couche unique, couche de surface ou couche de base	Couche de surface	Couche de surface	Couche de surface	Couche de correction	Couche de surface	Couche antifissure	Couche de surface (intervention palliative)	Rapiéçage manuel ou couche de correction	
Nombre minimal de classes granulaires distinctes à utiliser ⁽¹⁾	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	
Tamis				(% passant)							
28 mm	100										
20 mm	95-100	100									
14 mm	67-90	95-100	100	100	100	100	100		100		
10 mm	52-75	70-90	92-100	90-100	90-100	94-100	90-100	100	90-100	100	
5 mm	35-50	40-60	52-65	40-48	40-50	66-78	25-35	85-100	35-45	90-100	
2,5 mm	—	—	—	—	—	45-65	18-28	50-70	20-30	65-90	
80 µm	4,0-8,0	3,0-8,0	4,0-10,0	4,0-10,0	4,0-10,0	4,0-10,0	8,0-11,0	4,0-12,0	5-11	4-12	
2,5 mm ⁽²⁾	—	39,2	46,1	46,1	46,1	—	—	—	—	—	
1,25 mm ⁽²⁾	—	25,7-31,7	30,7-36,7	30,7-36,7	30,7-36,7	—	—	—	—	—	
630 µm ⁽²⁾	—	19,1-23,1	22,8-26,8	22,8-26,8	22,8-26,8	—	—	—	—	—	
315 µm ⁽²⁾	—	15,4	18,1	18,1	18,1	—	—	—	—	—	
Pourcentage de fibres (%) ⁽²⁾					1,3		1,0		—	—	
V _{de} (%) ⁽³⁾	10,2	11,4	12,2	12,4	14,6	12,6	14,8	14,0	11,3	13,3	
Vides à 10 girations (%)	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	(6 g) ≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	LC 26-003
Vides à 80 girations (%)	—	4,0-7,0	4,0-7,0	4,0-7,0	4,0-7,0	4,0-7,0	(60 g) 4,0-7,0	(50 g) 4,0-7,0	4,0-7,0	4,0-7,0	LC 26-003
Vides à 100 girations (%)	4,0-7,0	—	—	—					—	—	LC 26-003
Vides à 120 girations (%)	4,0-7,0								—	—	
Vides à 200 girations (%) ⁽⁴⁾	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	(75 g) ≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	LC 26-003
Compacité (% min.)	93,0	93,0	93,0	93,0	93,0	93,0	93,0	93,0	93,0	93,0	LC 26-320
Résistance à l'oméïrage sur plaques de 100 mm à 52, 58 ou 60 °C (selon la classe de bitume) à 30 000 cycles (% max. de déformation) ^(4, 5, 6)	10,0	10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	
Résistance à l'oméïrage sur plaques de 50 mm à 52, 58 ou 60 °C (selon la classe de bitume) à 1 000 cycles à 3 000 cycles (% max. de déformation) ^(4, 5)	—	—	10,0 20,0	10,0 20,0	10,0 20,0	10,0 20,0	—	—	10,0 20,0	—	
Tenue à l'eau (% min.) ⁽⁷⁾	70	70	70	—	70	70	70	70	70	—	LC 26-001

Figure 3.1 Critères de formulation des enrobés au MTQ
Tirée de MTQ (2008)

Critères de l'enrobé ciblé

Avec l'ajout de GBR, il a été vu que le bitume oxydé possède une viscoélasticité moindre qu'un bitume à l'état neuf. Donc, le GBR est plus sensible au retrait thermique lors de diminution de la température. Considérant qu'un enrobé de surface subira des variations de température supérieure aux enrobés sous-jacents, il a été décidé d'étudier un enrobé pour couche de surface.

Le recyclage des chaussées est actuellement prédominant dans la réfection et la réhabilitation des structures routières au Québec. Plusieurs de ces techniques permettent d'intégrer un vieil enrobé de la route existante dans le nouvel enrobé afin d'économiser des granulats et en bitume. Donc, il a été décidé d'utiliser du GBR dans la formulation de l'enrobé. Au Québec, en 2009, le pourcentage maximal de GBR permis dans un nouvel enrobé était de 15 % pour les enrobés en couche de surface. Cette valeur a été choisie afin de mieux identifier l'effet de l'ajout du GBR. Il est à noter que la limite a été haussée à 20 % en 2010. Avec ce pourcentage de GBR ajouté, cela équivaut à un matériau recyclé de type MR-1 ou MR-2.

Enfin, considérant l'utilisation d'un enrobé de surface avec ajout de GBR avec les techniques de réhabilitation actuelles, un enrobé ESG-10 a été choisis afin de représenter une grande majorité des enrobés de surfaces utilisées en construction neuve et en réhabilitation au Québec.

3.3.1 Caractéristiques de l'enrobé ciblé

L'enrobé ESG-10, selon la formulation du Laboratoire des Chaussées, possède les principales caractéristiques présentées dans l'encadré de la Figure 3.1, tiré de la norme 4202 du MTQ. Il est utilisé avec tous les types de bitumes existants au Québec en fonction de la zone géographique, la classe de route ainsi que le débit et le type de circulation. L'enrobé ESG-10 possède des bons à très bons comportements au niveau de l'ornièrage, de l'arrachement, de la fatigue, de la dégradation des fissures et de la capacité de support. Son épaisseur de pose varie de 40 mm à 70 mm.

Les principaux critères de formulation est d'obtenir un pourcentage de vides entre 4 et 7 % à 80 girations (N_{design}) en plus de respecter les critères de vides à 10 et à 200 girations. Également, il doit avoir une déformation maximale de 10 et 20 % à 1 000 et 3 000 cycles à l'essai d'orniéreur. Il possède des points de contrôle du fuseau granulométrique sur les tamis de 80 μm , 5 mm, 10 mm et 14 mm. Une zone de restriction est comprise entre les tamis de

315 μm et 2,5 mm. La Figure 3.2 montre la courbe de masse volumique maximale (CMVM), les tamis de contrôle ainsi que la zone de restriction de l'enrobé ESG-10.

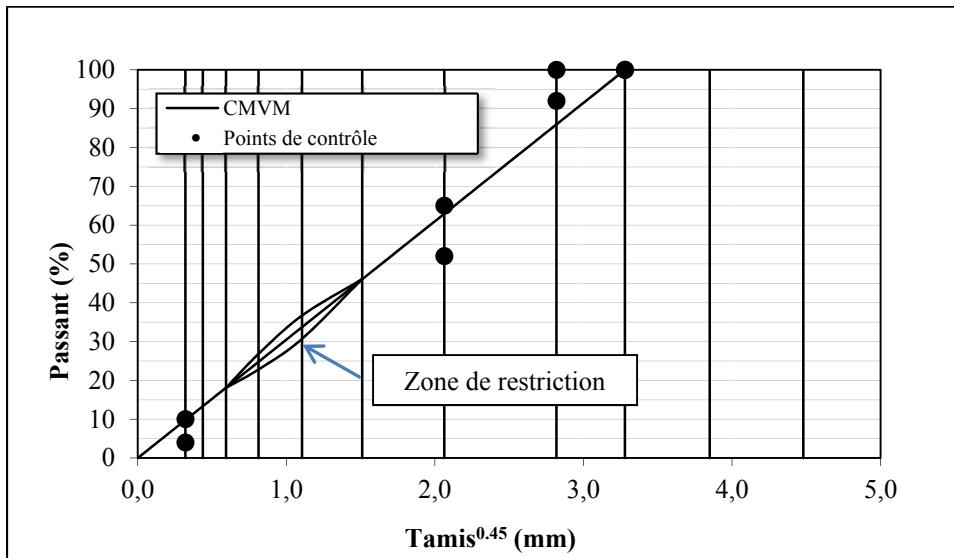


Figure 3.2 Courbe de masse volumique maximale et limites du fuseau granulométrique de l'enrobé ESG-10

3.4 Variables de formulation

Le chapitre 2 sur les EBE a montré que ce type d'enrobé utilise essentiellement le moussage du bitume pour l'enrobage d'une partie des granulats. Le détail du procédé de moussage du bitume a été expliqué au chapitre 1 (section 1.3.7). Ces deux sections ont fait ressortir certains éléments principaux pour la fabrication d'un enrobé à la mousse de bitume ainsi que la fabrication d'un EBE.

Les facteurs pouvant influencer la qualité d'enrobage et les propriétés thermomécaniques des enrobés ont été synthétisés dans le Tableau 3.1 afin de faire ressortir les éléments importants à considérer. Cette synthèse a permis, par la suite, de déterminer les variables retenues du programme expérimental.

Tableau 3.1 Synthèse des facteurs d'influences relatifs aux propriétés de la mousse de bitume et des propriétés thermomécaniques des EBE

Éléments pouvant influencer les propriétés	Mousse de bitume	EBE
Teneur en eau	X	X
Température du bitume	X	X
Qualité et origine du bitume	X	X
Type de bitume	X	X
Pression	X	
Ajout d'adjuvant	X	X
Granulométrie (particules fines < 0,075 mm)		X
Température des granulats		X
GBR		X
X : Indique que l'élément a une influence		

3.4.1 Choix de la méthode d'enrobage des EBE

Plusieurs techniques d'enrobage à basse température sont possibles. Cependant, pour la présente expérimentation, la méthode d'enrobage EBE 02 modifiée, vu au chapitre 2, est retenue. Cette méthode, illustrée à la Figure 3.3, utilise l'eau contenue dans le GBR, ajoutés à froid, afin de faire mousser le bitume. Cette technique est celle la plus utilisée et nécessite le moins de modifications à la centrale d'enrobage.

Pour les essais en laboratoire, il est important de noter que le GBR a été complètement séché à l'étuve à une température de 105 °C afin d'éliminer toute l'eau contenue dans le GBR. Après refroidissement du GBR à la température ambiante et durant le malaxage, l'eau a été ajoutée au GBR afin d'avoir un meilleur contrôle sur la teneur en eau désirée et ainsi éliminer une incertitude dans l'expérimentation.

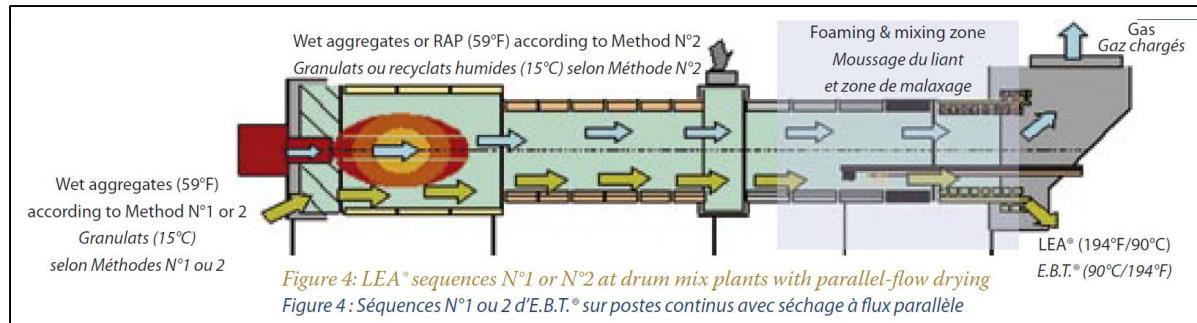


Figure 3.3 Exemple d'une méthode d'enrobage en centrale continue
d'un EBE avec ajout de GBR humide
Tirée de Olard *et al.* (2008b, p. 18)

3.4.2 Choix des teneurs en eau

La revue de la littérature à mise en relief que la présence d'eau est un élément important agissant sur les propriétés de la mousse de bitume et des EBE. Afin d'évaluer l'effet de la teneur en eau sur ces éléments, diverses teneurs en eau, représentatives de celles qui prévalent dans des réserves de GBR exposée aux intempéries, ont été utilisées.

Tout d'abord, dans des réserves de granulats vierges, il est souvent possible de retrouver des teneurs en eau de 1 à 2 % pour les gros granulats (> 5 mm) et d'environ 5 à 6 % pour des granulats fins (< 5 mm). Pour le GBR utilisé, il a été décidé de partir avec une valeur de teneur en eau de 5 % (pourcentage massique). Cette valeur représente une valeur moyenne généralement retrouvée dans les réserves extérieures de GBR, pouvant augmenter à 8 % lors de grande période de précipitation (Decker *et al.* 1996). Également, certaines études sur les EBE ont montré qu'une teneur en eau de 5 % offrait le meilleur enrobage des granulats par le bitume (Gaudefroy *et al.* 2007).

À partir de ces informations, quatre teneurs en eau supplémentaires, de part et d'autre de la valeur médiane cible de 5 % ont été choisies, soit 1, 3, 7 et 9 % d'eau par rapport à la masse du GBR ajouté. Trois enrobés ont été confectionnés pour chaque teneur en eau afin d'en vérifier l'aptitude au compactage avec l'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG). À

partir des résultats obtenus à la PCG, trois teneurs en eau ont été ciblées afin de confectionner les enrobés pour les essais à l'orniére et de module complexe.

3.4.3 Type de bitume

Nous avons vu que le type de bitume agit sur la qualité d'une mousse de bitume et influence également le comportement des EBE en retenant plus ou moins d'eau. Dans l'optique de représenter l'effet du type de bitume sur la capacité de moussage, sur l'absorption en eau et sur les températures de malaxage spécifiques associées aux bitumes, deux types de bitume ont été utilisés. Le premier bitume, un PG 58-28, est un bitume sans polymère, soit un bitume pur. Le second bitume, un PG 64-34, est un bitume contenant des polymères et possédant une meilleure résistance aux variations de température, c'est-à-dire une moins grande susceptibilité thermique. L'utilisation de deux types de bitume permet de voir l'influence du type de bitume sur l'absorption en eau. De plus, ces deux bitumes représentent assez bien la gamme des bitumes utilisés actuellement au Québec.

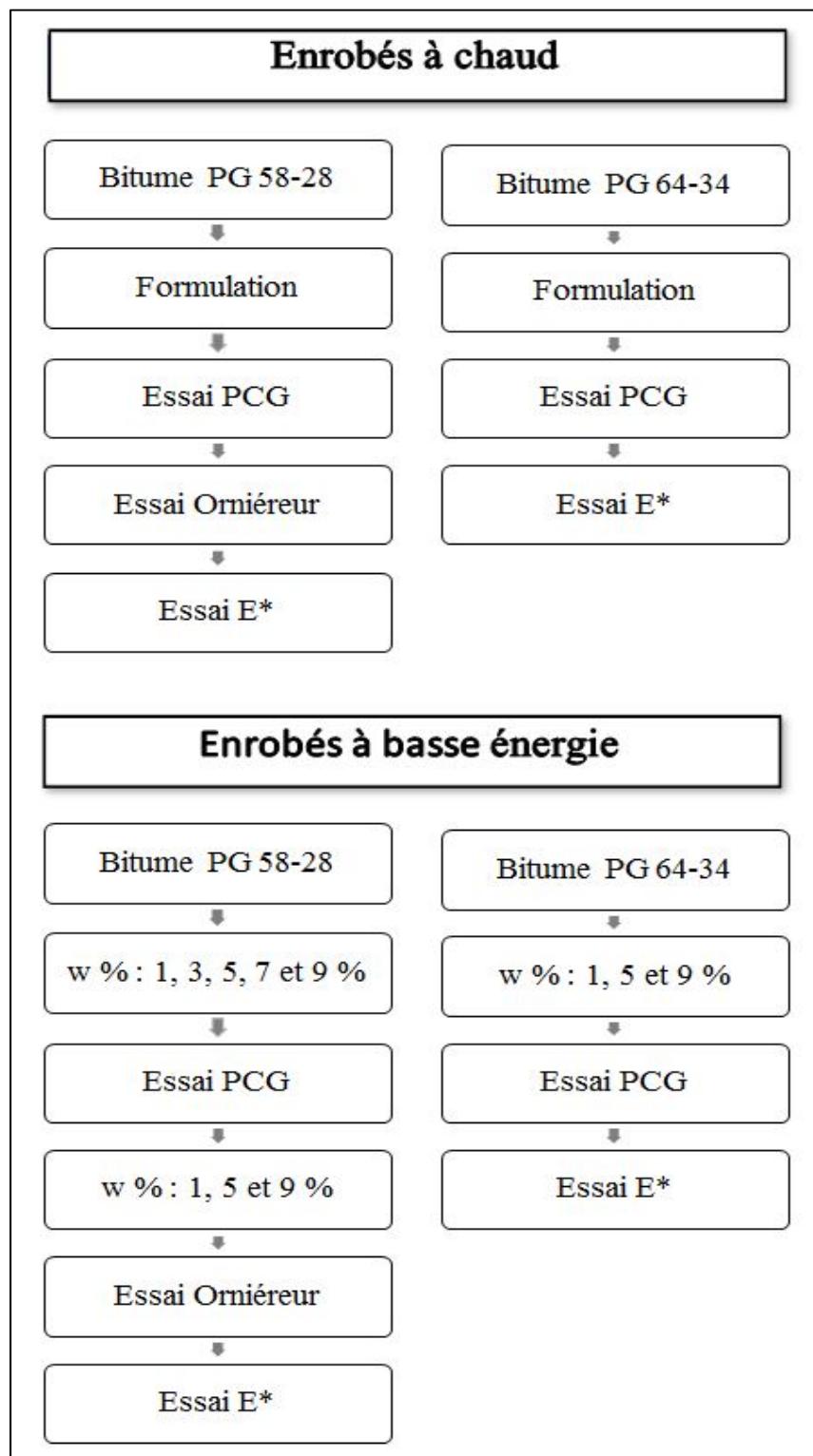
D'autre part, en choisissant deux types de bitumes différents, les températures de malaxage et de compactage varient puisque les températures sont dépendantes du type de bitume utilisé. Par conséquent, la variable concernant la température des granulats et du bitume est considérée.

3.5 Plan expérimental

Afin de bien encadrer cette recherche, un programme expérimental a été élaboré de façon à optimiser les essais en laboratoires ainsi que leur rapidité d'exécution. Le Tableau 3.2 représente en détail le processus expérimental effectué.

En résumé, le programme se divise en trois grandes étapes qui consistent à : 1) la formulation des enrobés, 2) la détermination de l'aptitude au compactage et finalement, 3) la détermination de la résistance à l'orniérage et la détermination du comportement thermomécanique en petites déformations à partir de l'essai de module complexe (E*).

Tableau 3.2 Principales étapes du programme expérimental



3.6 Caractérisation des granulats

Tous les granulats ont été caractérisés selon les normes du Ministère des Transports du Québec, soit les normes LC (Laboratoire des chaussées) et BNQ (Bureau de normalisation du Québec). Chaque granulat a été préalablement séparé mécaniquement afin d'obtenir la classe granulaire désirée. Les normes suivantes ont été utilisées afin de connaître les caractéristiques essentielles pour chaque granulat avant la formulation de l'enrobé :

1. LC 21-040 Analyse granulométrique,
2. LC 21-065 Détermination de la densité et de l'absorption du granulat fin,
3. LC 21-067 Détermination de la densité et de l'absorption du gros granulat.

Malgré le fait que ces valeurs soient déjà connues lors de l'échantillonnage des granulats chez le fournisseur, certains essais ont été répétés afin de valider les informations. Cependant, il est important que les granulats respectent également les normes suivantes :

1. Filler : ASTM D 242, « *Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures* »,
2. Granularité : NQ 2560-114 « Travaux de génie civil – Granulats », Partie I,
3. Caractérisation intrinsèque et de fabrication : NQ 2560-114 « Travaux de génie civil – Granulats », Partie V.

3.7 Formulation de l'enrobé

3.7.1 Choix des proportions granulaires

En fonction des granulométries de chacun des granulats, cinq classes différentes de granulats ont été utilisées afin d'optimiser les critères de formulation de l'enrobé ESG-10 étudié. En se basant sur des formulations antérieures d'enrobé ESG-10 du LCMB et avec l'aide d'un chiffrier électronique, une combinaison granulaire optimale a été choisie. Comme il a été vu à la section 1.3.7.5 et reporté au Tableau 3.1, des particules inférieures à 0,075 mm favorisent

le moussage du bitume ainsi que ces propriétés. Par conséquent, un filler a été utilisé lors de la formulation.

3.7.2 Calculs et ajustement des paramètres de formulation

La Figure 3.4 illustre le cheminement à effectuer selon les normes correspondantes pour la formulation d'un enrobé typique selon la méthode du Laboratoire des Chaussées (LC). La formulation de l'enrobé, suivant la méthode LC, se base sur une méthode volumétrique des constituants en les juxtaposant, par la suite, sur une base massique afin de faciliter la proportion de chacun.

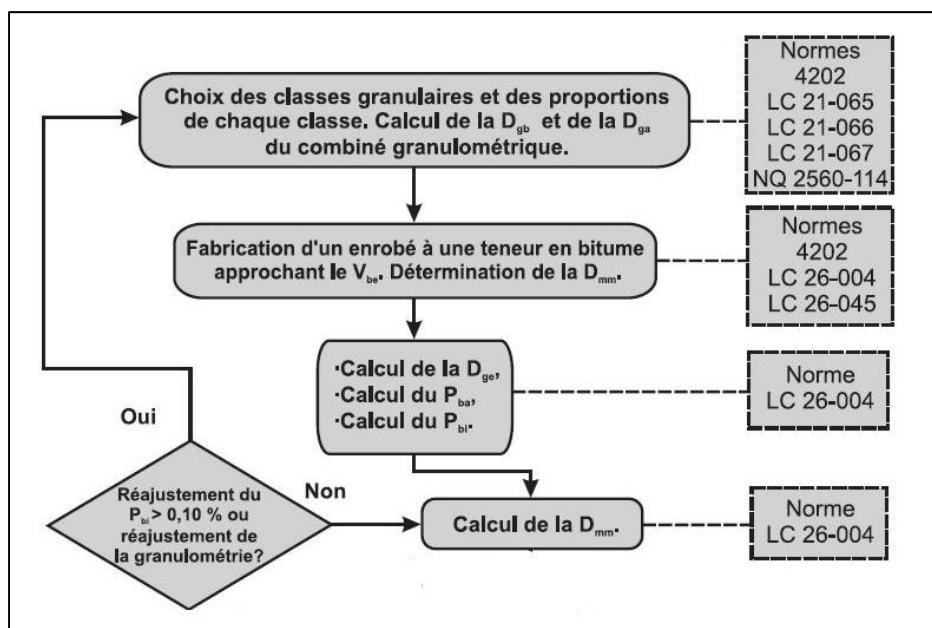


Figure 3.4 Étape de calcul pour la formulation d'un enrobé
Tirée de Langlois (2005, p. 50)

3.8 Procédure d'essai à la PCG

3.8.1 Principe de l'essai

L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) s'inspire de la méthode de formulation française. Il consiste à quantifier l'évolution des vides en cours de compaction de l'enrobé d'une masse prédefinie correspondante à des vides nuls dans l'enrobé à une hauteur exacte de 115 mm.

L'éprouvette, de 150 mm de diamètre, est compactée à un angle de 1,25 degré et avec une pression de 600 kPa tel que montré à la Figure 3.5. De plus, cette compaction se produit en effectuant une rotation de 30 girations par minute.

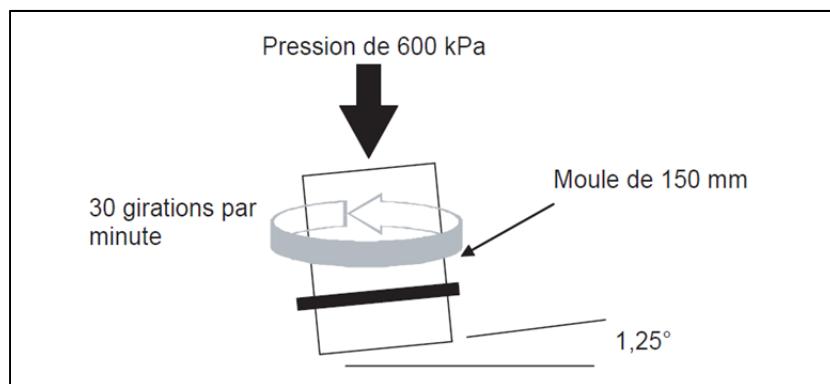


Figure 3.5 Principe de compaction de l'essai PCG
Tirée de Langlois (2005, p. 52)

L'appareil reproduit ainsi l'effort de compaction en chantier et permet d'apprécier l'aptitude au compactage de l'enrobé en indiquant de façon continue la hauteur de l'éprouvette lors de la compaction. De ce fait, la teneur en vides dans l'enrobé peut être calculée après chaque giration selon la formule présente dans la méthode normalisée.

L'essai à la PCG est la première étape d'acceptation ou de refus de l'enrobé et doit être effectué pour chaque enrobé. Pour le présent programme expérimental, une presse de marque

Troxler a été utilisée telle qu'illustrée à la Figure 3.6. L'étalonnage de l'appareil fût effectué par une firme spécialisée un mois avant les essais. De plus, avant chaque journée d'essai, une vérification de la calibration à l'aide d'un moule, fourni avec l'appareil, a été réalisée pour s'assurer de la précision des résultats. Le moule, d'une hauteur précise, est placé dans l'appareil et le vérin hydraulique est abaissé jusqu'au moule. Avec la hauteur connue du moule, le vérin calibre automatiquement sa hauteur.



Figure 3.6 Presse à cisaillement giratoire utilisée de marque Troxler

3.8.2 Détermination des températures de malaxage et de compactage

Le bitume doit avoir une viscosité suffisante afin d'être pompé facilement à la centrale d'enrobage. Cette viscosité est fonction de la température et varie selon le type de bitume. La norme LC 25-007 (Bitume – Évaluation de la température associée à une viscosité) spécifie une viscosité pour le malaxage et le compactage de $0,17 \pm 0,02$ Pa·s et $0,28 \pm 0,02$ Pa·s respectivement. Pour trouver les valeurs de température correspondante à ces viscosités, la norme LC 25-007 propose une méthode graphique. À l'aide de deux mesures de viscosités

établies à l'aide du viscomètre Brookfield à une température donnée, une relation linéaire est tracée sur un graphique avec la température en abscisse et la viscosité en ordonnée. Ensuite, les températures de malaxage et de compactage (viscosité donnée) sont simplement lues sur la figure présente dans la norme.

3.8.2.1 Enrobés à chaud

Pour les enrobés à chaud, la température du bitume PG 58-28 pour le malaxage et le compactage sont respectivement de 147 et 136 °C. Pour le bitume PG 64-34, les températures sont de 168 et 160 °C. Pour leur part, les granulats vierges ont été chauffés à 15 °C de plus que la température de malaxage des bitumes, soit 162 et 183 °C.

Enfin, le GBR a été chauffé couvert à l'étuve à 105 °C afin d'évaporer toute présence d'eau et minimiser l'oxydation du bitume. Les enrobés à chaud ont été mis à l'étuve et couvert durant 45 minutes à une température de 136 °C pour le bitume PG 58-28 et 162 °C pour le bitume PG 64-34 avant l'essai à la PCG.

3.8.2.2 Enrobés à basse énergie (EBE)

Pour les EBE, les températures de chauffage des bitumes PG 58-28 et PG 64-34 ainsi que la température de chauffage des granulats sont les mêmes que pour l'enrobé à chaud. Pour le GBR, il a été introduit à la température de la pièce durant le malaxage, soit 22°C.

Après malaxage, les EBE ont été mis à l'étuve à une température de 95 °C pour tous les enrobés. La température de 95 °C correspond à la température moyenne après malaxage des EBE retrouvée dans la littérature. Le Tableau 3.3 présente un résumé des différentes températures utilisées.

Tableau 3.3 Température de chauffage et de malaxage des matériaux et des enrobés confectionnés

ÉLÉMENTS	TEMPÉRATURE (°C)			
	Enrobé à chaud		EBE	
	PG 58-28	PG 64-34	PG 58-28	PG 64-34
Température des granulats	162	183	162	183
Température du GBR	105	105	22	22
Température du bitume	148	168	147	168
Température de l'eau ajoutée	n/a	n/a	22	22
Température de malaxage	148	168	148	168
Température de cure (entre malaxage et PCG)	136	162	95	95
Température de compactage	136	162	95	95
n/a : non applicable				

3.8.3 Fabrication des enrobés pour l'essai à la PCG

Une fois la formulation atteinte, trois essais à la PCG ont été effectués pour chaque type d'enrobé afin d'obtenir une moyenne plus représentative des résultats. La préparation des éprouvettes s'effectue selon la méthode normalisée LC 26-003 (Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire). Deux méthodes ont été utilisées lors des essais à la PCG, soit une méthode pour l'enrobé à chaud ainsi qu'une seconde méthode pour les EBE.

3.8.3.1 Enrobés à chaud

Pour les enrobés à chaud, les granulats et les bitumes ont été chauffés en respectant les températures du Tableau 3.3 et le GBR a été chauffé à une température de 105 °C. Afin d'éviter toute perte de chaleur, tous les outils utilisés ont été préalablement chauffés pour une durée minimale de 30 minutes à la température de malaxage. Les masses calculées du GBR et des granulats ont été ajoutées simultanément dans le malaxeur en arrêt. Ensuite, le bitume chaud a été ajouté aux granulats et les constituants ont été mélangés durant 30 secondes. Par la suite, une cure de 45 minutes à l'étuve selon la température de compactage du Tableau 3.3

a été choisie avant l'essai à la PCG. Le temps de cure choisi de 45 minutes respecte la norme qui précise une durée entre 30 et 120 minutes. L'enrobé, placé à l'étuve, a été couvert dans tous les cas pour diminuer le risque d'oxydation de l'enrobé par le contact de l'air durant la cure.

3.8.3.2 Enrobés à basse énergie

Pour ce qui des EBE, les granulats et les bitumes ont été chauffés à la même température que l'enrobé à chaud. Cependant, une journée avant les essais, le GBR a été séché préalablement à l'étuve à une température de 105 °C pour enlever toute humidité possible et refroidi à la température de la pièce. Par la suite, le GBR refroidi et l'eau ont été conservés à la température de la pièce avant d'être ajoutés au mélange. Une première étape de malaxage a été effectuée avec les granulats chauds et le bitume durant 30 secondes. Par la suite, le GBR ainsi que l'eau ont été ajoutés en même temps dans le malaxeur en arrêt et un second malaxage de 15 secondes a été effectué. Pour chaque essai, une mesure de température a été prise après le malaxage avec le thermomètre infrarouge à pointeur laser. Ces températures sont présentées au chapitre 5. Enfin, une cure de 45 minutes dans une étuve à 95 °C a été respectée.

Cette méthode pour l'enrobé EBE a été utilisée pour représenter la méthode d'enrobage EBE 02 avec ajout de granulats bitumineux recyclés tel que présenté à la Figure 2.3.

3.8.4 Compaction des éprouvettes

L'essai à la presse à cisaillement giratoire s'effectue conformément à la norme LC 26-003 (Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire). Lors de la préparation des éprouvettes pour l'essai à la PCG ainsi qu'après l'essai, différentes températures en surface de l'enrobé ont été prises à l'aide d'un thermomètre infrarouge à pointeur laser afin de voir l'évolution de température. La température initiale de chaque constituant a été notée. Par la suite, les températures de l'enrobé après malaxage et

après l'essai à la PCG ont également été notées. Ces températures sont présentées au chapitre 5.

3.9 Procédure d'essai à l'orniére

3.9.1 Principe de l'essai

L'essai d'orniérage permet d'apprécier la capacité de l'enrobé à résister aux déformations permanentes de type orniérage-fluage produit par le passage répété de véhicule. Cet essai est divisé en deux parties, soit la fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC selon la méthode LC 26-400 (Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC) ainsi que la mesure de la résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage de la méthode LC 26-410 (Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage). La Figure 3.7 présente l'appareil utilisé pour effectuer les essais d'orniére.



Figure 3.7 Orniére LCPC
utilisé pour les essais
Tirée de Lacroix (2009, p. 30)

3.9.2 Fabrication et compactage des plaques

La préparation des plaques d'enrobé a été réalisée selon la norme LC 26-400 (Préparation des enrobés - Compactage de plaques d'enrobés) du MTQ. La fabrication de l'enrobé a été effectuée pour avoir suffisamment d'enrobé pour produire deux plaques. Pour l'enrobé ESG-10, les dimensions des plaques requises sont de 500 mm x 180 mm x 50 mm. La quantité nécessaire d'enrobé a été calculée en multipliant le volume du moule par la densité de l'enrobé, préalablement déterminée, ainsi que par le degré de compaction désiré, soit 95 %.

Cependant, après le malaxage, et contrairement aux exigences de la norme LC 26-400, l'enrobé a été couvert et a été remis à l'étuve pour une cure de 45 minutes selon la même procédure que l'essai à la PCG. Également, la procédure de malaxage pour l'enrobé à chaud et EBE a été la même que celle utilisée pour l'essai à la PCG. Cette procédure a été respectée afin de limiter les variables. Après la cure, l'enrobé a été déversé dans le moule en évitant la ségrégation et le compactage s'est effectué avec le compacteur de type MLPC de la méthode française, illustré à la Figure 3.8.



Figure 3.8 Compacteur de plaque
LCPC
Tirée de Lacroix (2009, p. 15)

La compaction se déroule selon un plan de compactage défini selon la hauteur du moule et qu'il est possible de retrouver à l'annexe B de la norme LC 26-400. Enfin, les plaques ont été entreposées durant 48 heures à la température ambiante avant d'effectuer l'essai à l'orniére.

3.9.3 Réalisation de l'essai à l'orniére

L'essai à l'orniére est réalisé en conformité à la méthode LC 26-410 (Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage). L'essai consiste au passage d'une charge roulante à une pression de $0,6 \text{ MPa} \pm 0,03 \text{ MPa}$ et sous une charge de $5 \text{ kN} \pm 0,05 \text{ kN}$. L'essai se déroule à une température constante, soit $58 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'enrobé confectionné avec le bitume PG 58-28 et $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'enrobé confectionné avec le bitume PG 64-34. Une première série de lecture de la hauteur réelle de la plaque est prise avant le démarrage de l'essai. Les lectures sont prises à 15 endroits réparties sur la surface de la plaque comme représentée à la Figure 3.9. Par la suite, une moyenne est calculée avec les données mesurées. Ces valeurs sont transférées en pourcentage de déformation totale par rapport à l'épaisseur initiale de la plaque pour chaque étape de prise de mesure.

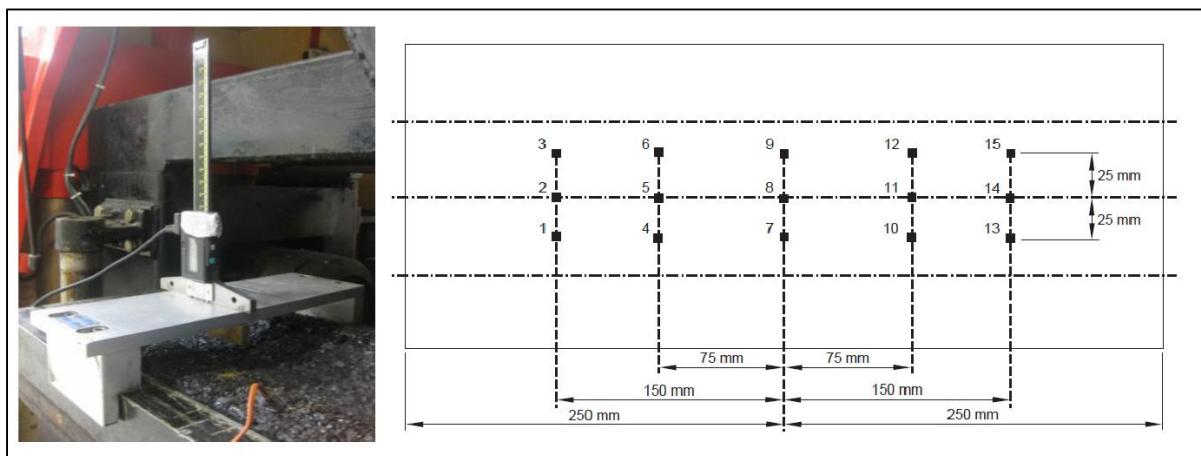


Figure 3.9 Gabarit pour les prises de mesures de la profondeur d'ornières
Tirée de Duveau (2009, p. 25)

Pour chaque enrobé, deux plaques ont été réalisées. L'essai débute par 1 000 cycles à froid, un cycle étant un aller et retour du pneumatique en surface de la plaque. Cette étape permet de terminer le processus de compaction et de mise en place de l'enrobé dans le moule. À la suite de cette étape, une prise de mesures est effectuée et ces valeurs servent de références pour déterminer le pourcentage d'orniérage.

La profondeur des ornières a été mesurée après 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 cycles, malgré que la norme exige des lectures à 1 000 et 3 000 cycles seulement. Ces lectures supplémentaires permettent de mieux apprécier l'évolution de l'orniérage. Les résultats sont présentés au chapitre 5.

3.10 Essai de module complexe (mesure de E^*)

3.10.1 Principe de l'essai

Comme discuté à la section 1.6 du chapitre 1, le module complexe (E^*) d'un enrobé représente le comportement viscoélastique linéaire en petites déformations de l'enrobé. Il exprime la rigidité du matériau sous diverses fréquences de chargement et de température afin de connaître le comportement de l'enrobé sous des faible déformations. Dans des conditions isothermes, une éprouvette d'enrobé est soumise à des sollicitations cycliques de formes sinusoïdales en tension-compression selon l'axe longitudinal et de fréquence variées pour différentes températures. Cet essai, non destructif, s'effectue selon la méthode normalisée LC 26-700 (Détermination du module complexe des enrobés). Toutefois, les manipulations effectuées au LCMB divergent quelque peu de celles spécifiées dans la norme LC 26-700. Les principales divergences par rapport à la norme sont présentés dans les prochaines sections.

3.10.2 Préparation des éprouvettes

Des éprouvettes de 80 mm de diamètre et d'une hauteur de 120 mm ont été utilisées pour les essais contrairement à la norme qui spécifie des éprouvettes de 80 mm de diamètre et de 150

mm de hauteur. Une plaque d'enrobé de 500 mm x 180 mm x 100 mm est fabriquée et compactée à l'aide du compacteur de plaques LCPC en suivant la même procédure de compactage que pour l'essai à l'orniére. Après compaction, la plaque subit une cure de 2 semaines à température ambiante. Par la suite, un carottage est effectué sur la plaque afin d'extraire les éprouvettes pour les mesures des E^* . Le plan de carottage de la plaque est illustré à la Figure 3.10.

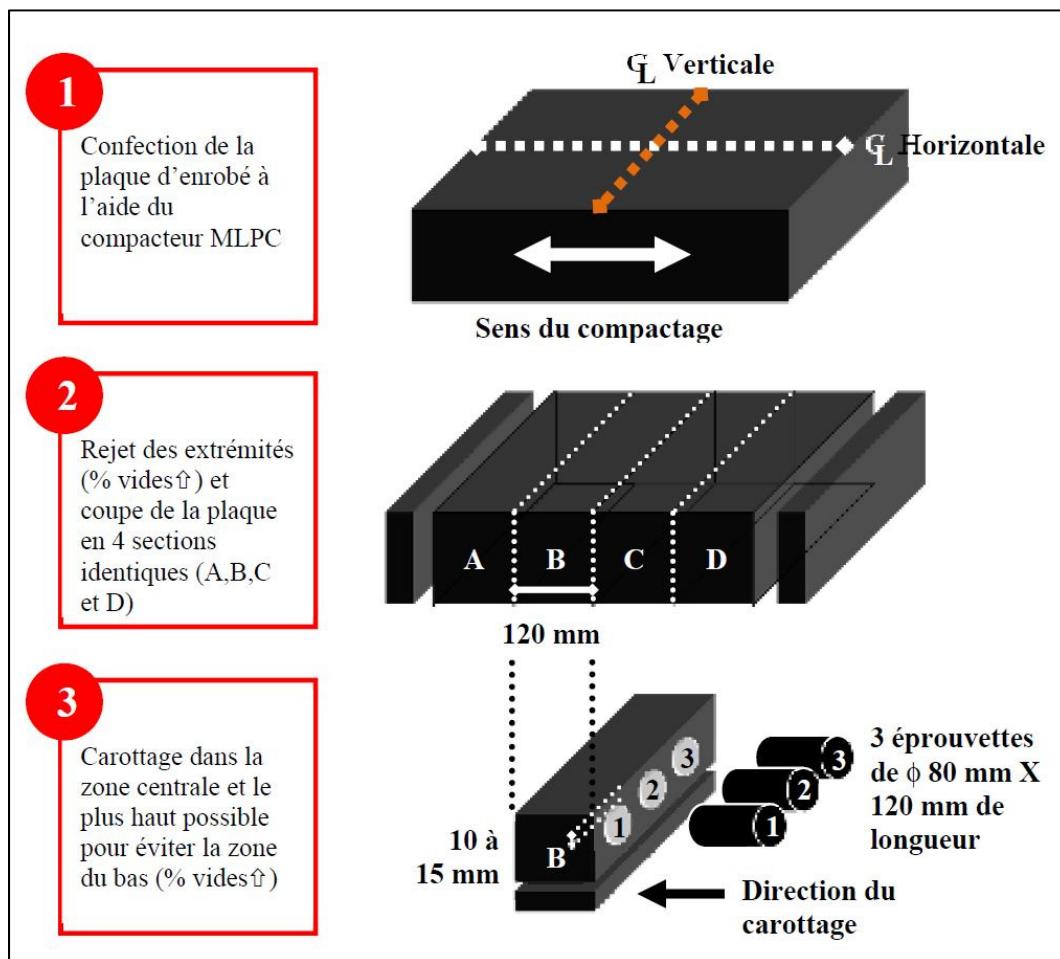


Figure 3.10 Plan de carottage pour les éprouvettes du module complexe
Tirée de Meunier (2012, p. 110)

Chaque extrémité des éprouvettes est méthodiquement aplanie afin d'avoir des surfaces le plus parallèles possible pour limiter l'obtention de données erronées. Une fois les éprouvettes carottées, ces dernières sont entreposées dans un bac de sable durant deux

semaines supplémentaires. Le sable permet d'éliminer tout risque de fluage de l'éprouvette d'enrobé qui fausserait également les données de l'essai.

Le jour précédent l'essai, les éprouvettes sont préparées. Des casques en aluminium sont collés aux extrémités de l'éprouvette à l'aide d'un époxy. Ces casques permettent de visser l'éprouvette aux manchons d'attache de la presse. De plus, un banc de collage, conçu pour cette étape, permet de coller les extrémités perpendiculairement à l'éprouvette de manière très précise. Des casques mal collés engendrent des efforts non axiaux dans l'éprouvette et conduit à des résultats biaisés.

3.10.3 Procédure d'essai du module complexe

Pour les essais, une éprouvette de chaque enrobé a été réalisée. Afin de permettre de mesurer les déformations en cours de sollicitation, trois extensomètres de 50 mm de longueur sont installés et espacés également de 120° au pourtour de l'éprouvette à l'aide d'élastique pour les maintenir en place. Une moyenne des trois mesures des extensomètres sera prise pour l'analyse des résultats. L'éprouvette est par la suite installée dans la chambre thermique de la presse hydraulique et connectée aux vérins hydrauliques à l'aide des casques de connexion. De plus, deux thermocouples sont installés dans la chambre afin de contrôler la température. Un premier thermocouple est installé directement à la paroi de l'éprouvette et le second est suspendu à l'intérieur de la chambre. La Figure 3.11 illustre le montage nécessaire pour effectuer l'essai.

Afin de déterminer une plage représentative de comportement de l'enrobé, l'essai s'effectue sous plusieurs fréquences (20, 10, 3, 1, 0.3, 0.1, et 0.03 Hertz) et températures (-35, -25, -15, -5, 5, 15, 25 et 35 °C). L'essai débute à basse température, soit -35 °C et chaque fréquence est alors imposée, soit de 20 Hz à 0.03 Hz. Seulement les six derniers cycles sur un total de 8 à 24 cycles (selon la fréquence) sont retenus pour les calculs des modules complexes et ce, pour chaque fréquence, à chaque température.

Une période de stabilisation de quatre heures est imposée entre chaque nouvelle température afin d'uniformiser la température au sein de l'éprouvette. Une fois l'essai démarré, ce dernier prend trois jours à être réalisé.

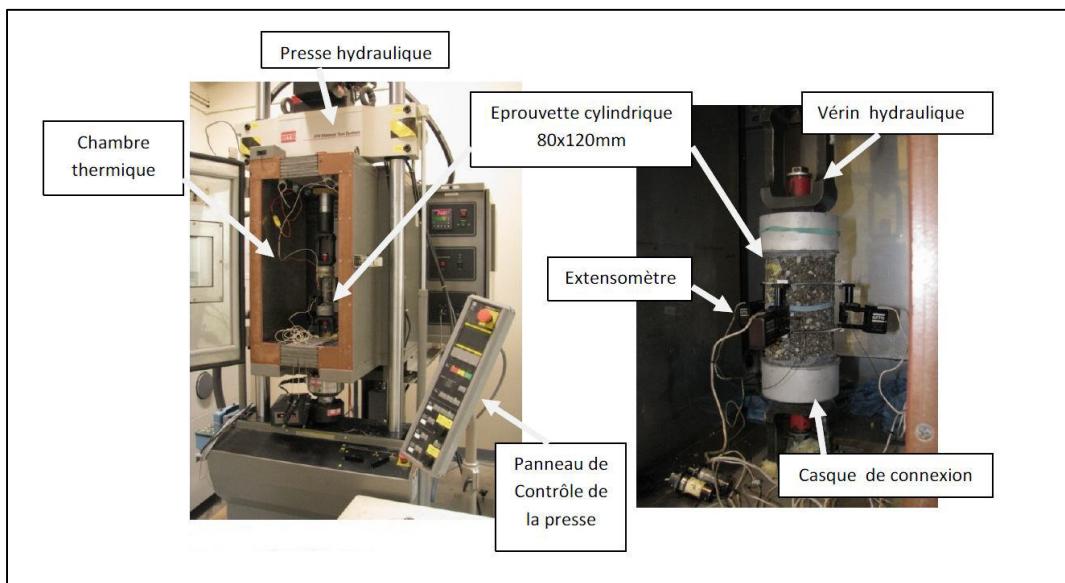


Figure 3.11 Montage de l'éprouvette pour l'essai du module complexe
Tirée de Feisthauer (2009, p. 32)

3.10.4 Traitements des données

Le module complexe est le coefficient de proportionnalité entre l'amplitude sinusoïdale complexe de la contrainte, à une fréquence « ω » donnée, et l'amplitude sinusoïdale complexe de la déformation (Di Benedetto et De La Roche, 1998). La norme du module complexe représente le rapport des amplitudes (σ_0/ϵ_0). Le module complexe peut se décomposer en deux parties, soit la norme du module complexe ($|E^*|$) qui indique la rigidité du matériau, désigné au Québec comme le module dynamique, à une fréquence et une température donnée, et l'angle de phase (ϕ) qui permet d'apprécier le comportement viscoélastique en précisant sa dominance visqueuse ou élastique (Carter et Perraton, 2002).

Le module complexe est souvent représenté sous forme vectorielle, ayant une composante élastique (réel) et une composante visqueuse (imaginaire). L'angle formé par ce vecteur représente l'angle de phase φ qui correspond au déphasage entre la déformation et la contrainte appliquée. La Figure 3.12 montre la schématisation du module complexe dans le plan Cole-Cole.

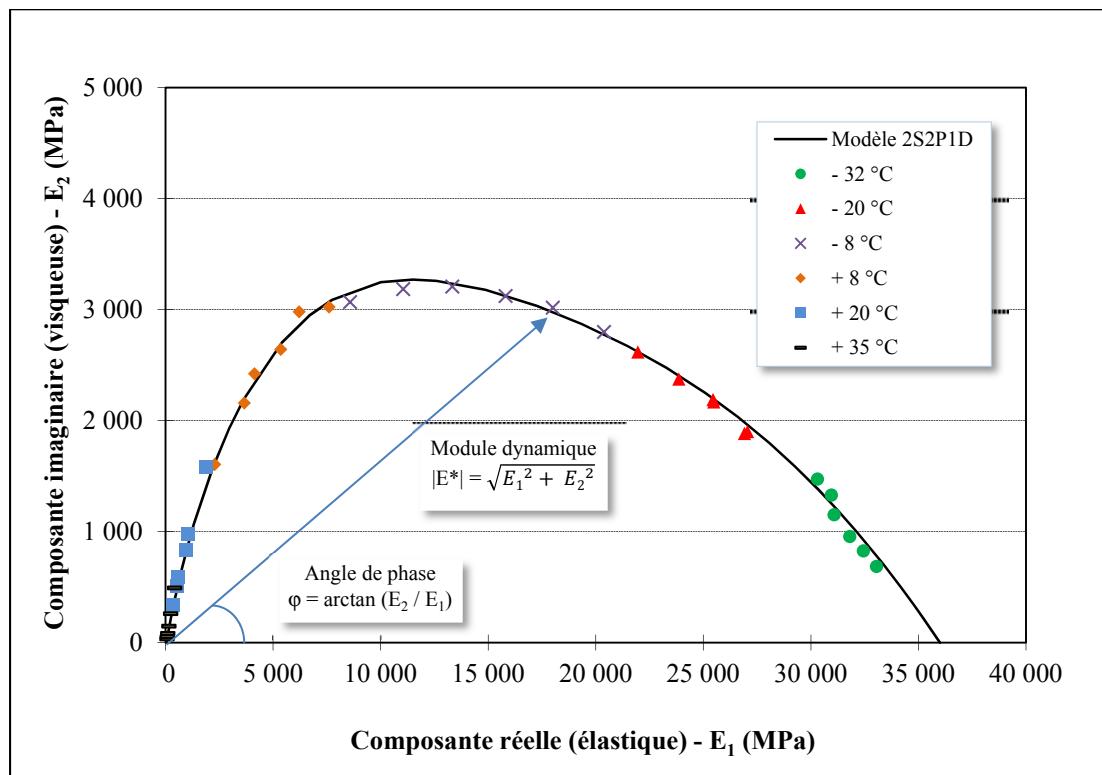


Figure 3.12 Résultats obtenus d'un module complexe dans le plan Cole-Cole et calage du modèle 2S2P1D

Tel que mentionné auparavant, le comportement d'un enrobé évolue avec le temps de chargement ainsi que la température. Il est donc essentiel de toujours donner la norme du module complexe en spécifiant la fréquence et la température. Autrement, ce résultat indique une valeur sans signification précise. Les essais de module complexe ne sont faits que sur une plage limitée de fréquences et de températures, car les appareils ne permettent pas de reproduire tous les cas possibles. Cependant, la représentation dans le plan Cole-Cole montre que les différents couples de fréquences et températures forment une courbe unique se

rapprochant d'un arc de cercle. Lorsque cette courbe est unique, le principe d'équivalence Temps-Température (PETT) s'applique. Il est aussi possible de représenter les résultats sur une courbe unique de la norme du module complexe en fonction de la fréquence pour une température donnée. Cette courbe est appelée « courbe maîtresse » et est produite à partir du principe d'équivalence temps-température (Di Benedetto et De La Roche, 1998).

3.10.5 Principe d'équivalence temps-température (PETT)

Le principe d'équivalence temps-température (PETT) permet d'obtenir une courbe maîtresse qui aide à apprécier le changement du module sous différentes fréquences à une température fixe. Le principe est fondé sur le fait qu'un même module peut être obtenu par différentes combinaisons de fréquence-température. Donc, une augmentation de la fréquence équivaut à une diminution de la température. Ceci permet d'obtenir des couples qui ne peuvent être reproduits en laboratoire et de prévoir le comportement du matériau (Di Benedetto et De La Roche, 1998). En plus d'être valide dans le domaine linéaire, le PETT est également applicable au domaine non linéaire (Di Benedetto *et al.* 2008).

Afin d'obtenir la courbe maîtresse, une translation des résultats de chaque isotherme suivant l'axe des fréquences est effectuée, en respectant l'isotherme correspondant à la température de référence, jusqu'à ce que les points ayant la même valeur du module se superposent (Di Benedetto, 1998). La fonction de translation, a_T , est définie suivant la relation proposée par Williams, Landel et Ferry (WLF) à l'équation 3.1. Les constantes C_1 et C_2 de l'équation varient en fonction du matériau testé.

$$\log a_t = \frac{-C_1(T_i - T_{ref})}{C_2 + (T_i - T_{ref})} \quad (3.1)$$

De plus, afin d'aider à la compréhension, la Figure 3.13 illustre graphiquement le principe d'équivalence temps-température.

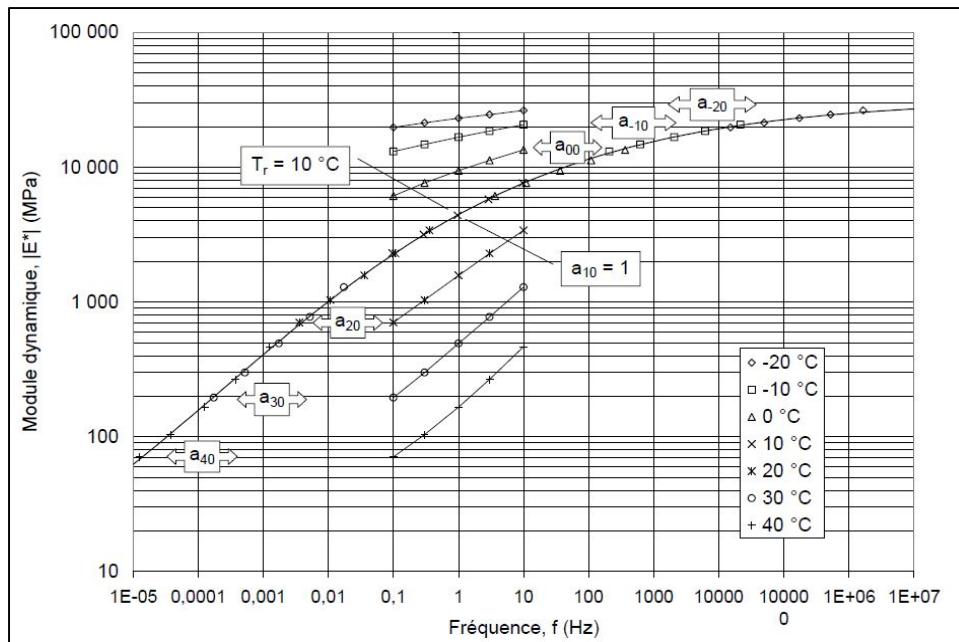


Figure 3.13 Représentation du principe d'équivalence temps-température
Tirée de Doucet et Auger (2010, p. 27)

3.10.6 Indice de qualité des données (I.Q.)

Avant de procéder à l'analyse des résultats de module complexe, la qualité de l'essai a été vérifiée pour chaque condition de mesure. Pour chaque température et fréquence, la qualité du signal a été vérifiée afin de valider si les données produisaient bien une courbe sinusoïdale en calculant la courbe des moindres carrés. La somme des écarts entre la fonction sinusoïdale approchée et les valeurs mesurées sert à calculer l'indice de qualité (IQ). Seuls les résultats dont les indices de qualité sont inférieurs à 10 % ont été retenus. De façon générale, les dernières et premières valeurs de chaque fréquence, à chaque température, ne sont pas retenues. Les Figures 3.14 et 3.15 illustrent respectivement un signal avec un bon indice de qualité et un signal avec un mauvais indice de qualité.

Également, la vérification de l'homogénéité des mesures entre les extensomètres permet de vérifier la validité de l'essai. En considérant l'écart de la déformation de chaque extensomètre à la déformation moyenne de juger de l'homogénéité du champ de contrainte et

de déformation au sein de l'éprouvette. Seuls les résultats dont les écarts sont inférieurs à 25 % ont été conservés pour les calculs des modules.

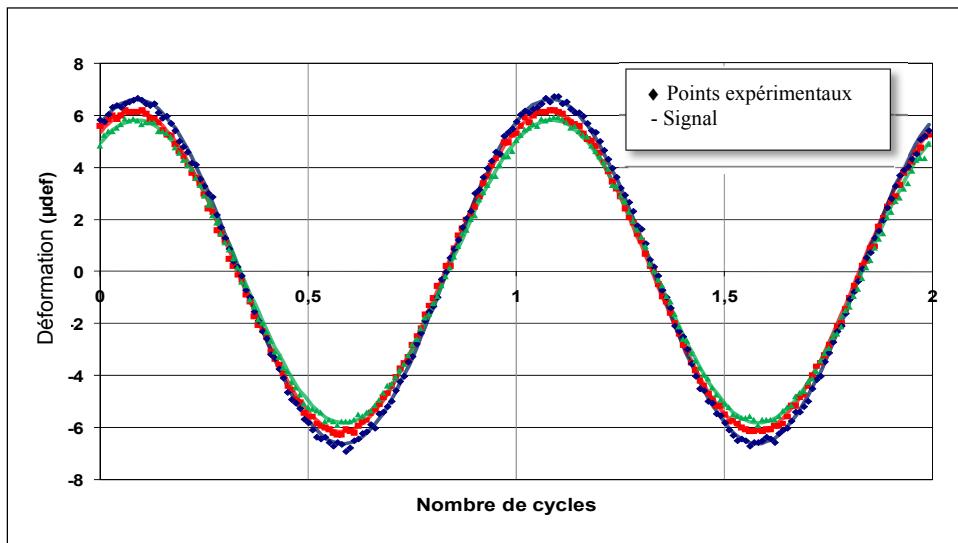


Figure 3.14 Représentation d'un bon indice de qualité du signal
(I.Q. = 1,7 %)
Adaptée de Marcotte et al. (2010, p. 12)

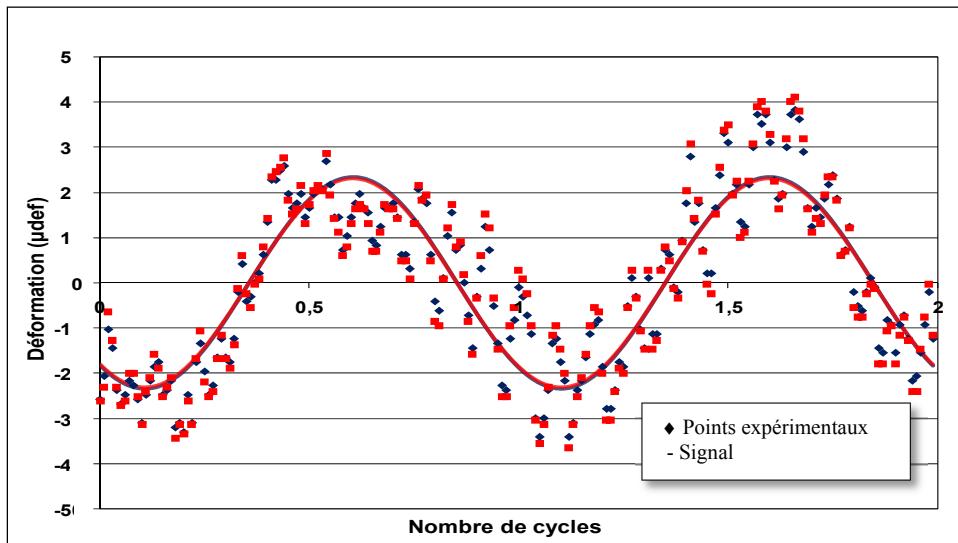


Figure 3.15 Représentation d'un mauvais indice de qualité du signal
(I.Q. = 32,5 %)
Adaptée de Marcotte et al. (2010, p. 12)

3.10.7 Modèle 2S2P1D

Les données recueillies lors de l'essai de module complexe illustrent le comportement en petites déformations de l'enrobé. Plusieurs études ont tenté de produire un modèle de calcul rhéologique afin de prédire le comportement de l'enrobé, en petite déformation, sur une large plage de température et de fréquence. Actuellement, il existe plusieurs modèles pour modéliser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé. Pour le présent programme expérimental, le modèle 2S2P1D, qui est basé sur le modèle Huet-Sayegh, a été utilisé. Le modèle Huet-Sayegh illustre uniquement le comportement de l'enrobé contrairement au modèle 2S2P1D qui permet de reproduire le comportement de l'enrobé ainsi que celui des bitumes (Di Benedetto et Olard, 2006).

Pour la présente recherche, le modèle utilisé est le modèle 2S2P1D. Cet acronyme décrit les éléments constitutifs du modèle, soit :

1. 2S : Two spring (deux ressorts),
2. 2P : Two parabolic dashpot (deux amortisseurs paraboliques),
3. 1D : One dashpot (un amortisseur linéaire).

La Figure 3.16 représente de façon schématique le modèle 2S2P1D.

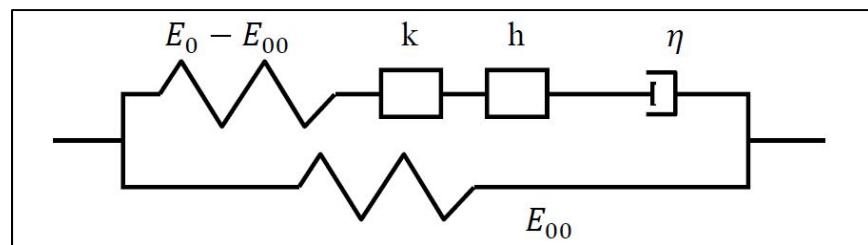


Figure 3.16 Représentation schématique du modèle 2S2P1D
Tirée de Meunier (2012, p. 93)

De façon mathématique, le modèle 2S2P1D est décrit par l'équation 3.2 suivante :

$$E^*(i\omega\tau) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (3.2)$$

Où les paramètres de l'équation signifient :

- i : nombre complexe établi par $i^2 = -1$,
- ω : pulsation donnée par $2\pi f$ où f est la fréquence,
- τ : temps dont la valeur dépend de la température de calcul utilisée dans l'équation,
- E_{00} : module statique lorsque la valeur du module tend vers zéro, soit $\omega\tau \rightarrow 0$ (pour les fréquences basses et/ou les températures élevées),
- E_0 : module vitreux lorsque la valeur du module tend vers l'infini, soit $\omega\tau \rightarrow \infty$ (pour les fréquences élevées et/ou températures basses),
- δ, β : constantes sans dimension,
- k, h : exposants des éléments paraboliques du modèle équivalent à $0 < k < h < 1$,
- η : viscosité newtonienne de l'amortisseur linéaire donné par l'équation

$$\eta = (E_\infty - E_0)\beta\tau.$$

Ce modèle nécessite de calibrer les constantes ($\delta, k, h, E_\infty, E_0, \beta, \tau_0$) afin de produire un modèle précis décrivant le plus fidèlement possible le comportement rhéologique de l'enrobé. Ces constantes sont ajustées à partir des résultats obtenus lors de l'essai de module complexe selon la méthode de calibration illustrée à la Figure 3.17. La procédure de calibration détaillée de ce modèle est décrite à l'annexe V.

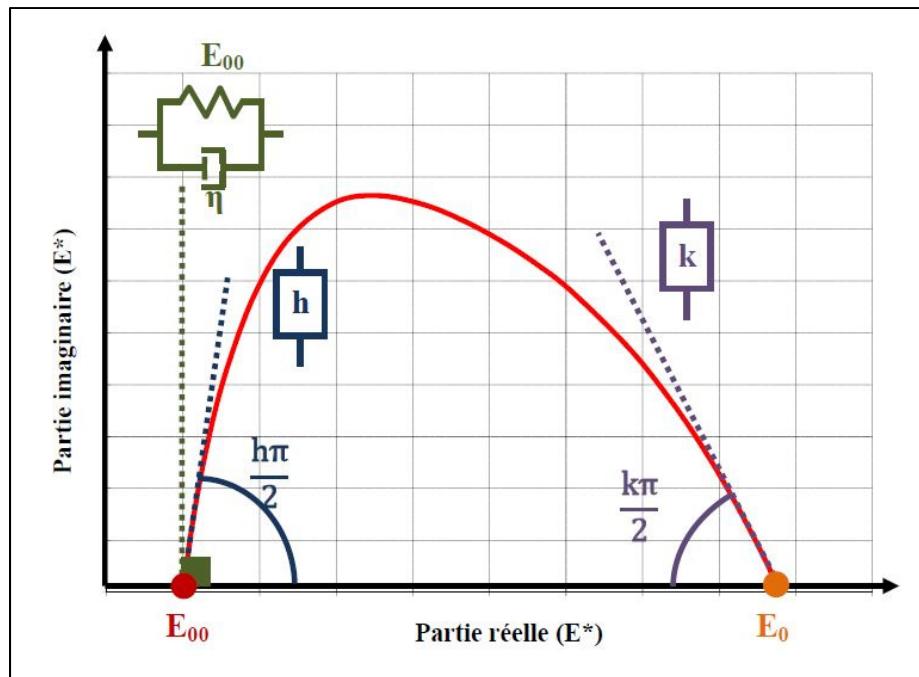


Figure 3.17 Représentation graphique du calage des constantes du modèle 2S2P1D dans le plan Cole-Cole
Tirée de Meunier (2012, p. 96)

CHAPITRE 4

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA FABRICATION DES ENROBÉS

Ce chapitre présente les propriétés et les caractéristiques des matériaux utilisés lors de la fabrication des enrobés. Ces propriétés sont essentielles à la formulation des enrobés et permettent également de comprendre en partie le comportement des enrobés. Pour tous les enrobés, les mêmes sources de matériaux ont été utilisées afin d'obtenir des enrobés semblables.

4.1 Granulats

La fabrication d'un enrobé commence par le choix et la caractérisation des granulats. Le Tableau 4.1 présente les caractéristiques ainsi que les granulométries de chacun des granulats utilisés pour la fabrication de l'enrobé ESG-10. La granulométrie est également présentée sous forme graphique à la Figure 4.1.

La norme 4202 (Figure 3.1) exige un minimum de deux classes granulaires distinctes pour la confection d'un enrobé ESG-10. Toutefois, la pratique courante utilise plus de classes afin d'optimiser les caractéristiques de l'enrobé. Pour cette étude, quatre classes granulaires ont été employées, soient une pierre 5-10 mm, une criblure de 0-5 mm, un sable 0-1,25 mm ainsi qu'un filler. Finalement, le GBR concassé et tamisé, pour obtenir une granulométrie de 0-10 mm, vient s'ajouter à ces granulats.

Tableau 4.1 Caractéristiques et granulométrie des granulats utilisés pour la formulation des enrobés

Propriétés	Normes	Résultats				
		Pierre 5-10 mm	Pierre 0-5 mm	Sable 0-1,25 mm	Filler	GBR
% massique utilisé	-----	35,0	29,0	19,0	2,0	15,0
Source	-----	Carrière Raycar	Bomix	Calco	St-Isidore	
Densité brute (d_{gb})	LC 21-065	2,842	2,821	2,664	2,700	2,721
Densité apparente (d_{ga})	LC 21-066	2,959	2,976	2,702	n/d	n/d
Absorption à l'eau (%)	LC 21-067	1,40	1,59	0,53	n/a	n/d
Fragmentation (%)	LC 21-100	100	n/a	n/a	n/a	n/a
Los Angeles (%)	LC 21-400	12,8	n/a	n/a	n/a	n/a
Micro-Deval (%)	LC 21-101	5,0	n/d	n/d	n/d	n/d
Granulométrie (tamisats en %)	14 mm	100	100	100	100	100
	10 mm	94	100	100	100	95
	5 mm	9,0	96	100	100	72
	2,5 mm	3,0	61	100	100	57
	1,25 mm	2,0	39	98	100	45
	0,630 mm	2,0	26	87	100	37
	0,315 mm	1,0	18	46	100	26
	0,160 mm	1,0	13	11	99	15
	0,080 mm	0,7	9,6	1,2	76	7,2
n/d : non disponible						
n/a : non applicable						

4.1.1 Granulats de calibre 5-10 mm

La pierre 5-10 mm provient de la carrière Raycar à St-Flavien situé près de Québec. Ce granulat est issu d'une roche de nature basalte et est entièrement concassé ce qui permet d'obtenir des particules presque totalement angulaires. Sa granulométrie est illustrée à la Figure 4.1 et montre une granulométrie uniforme.

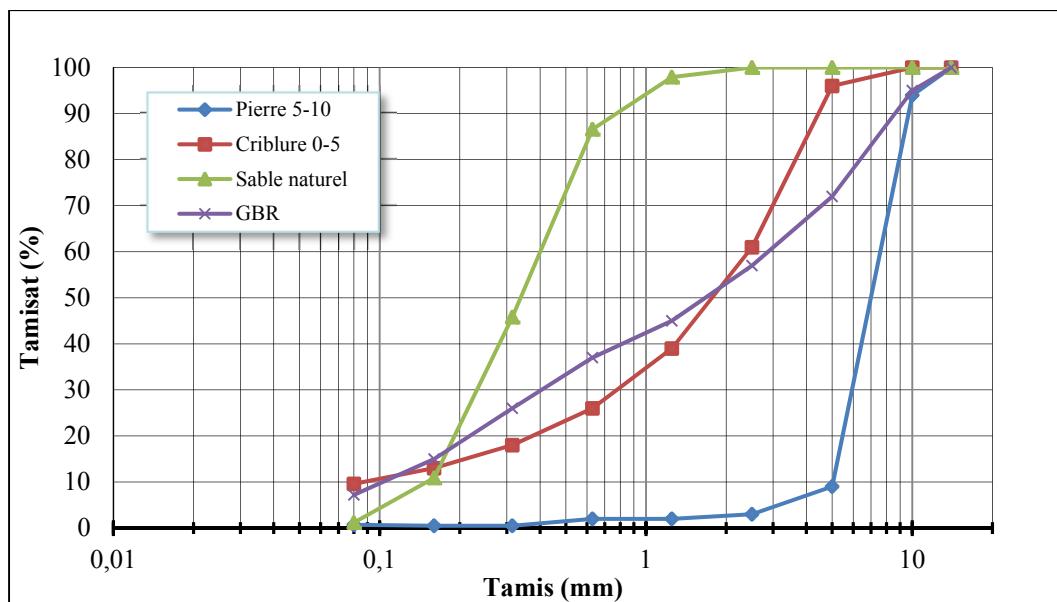


Figure 4.1 Granulométrie des granulats utilisés pour la formulation

4.1.2 Granulats de calibre 0-5 mm

Le granulat de calibre 0-5 mm est une criblure de pierre provenant également de la carrière Raycar. Étant donné que ces deux granulats proviennent du même endroit, il est normal d'observer que leur densité brute (d_{gb}) soit semblable (2,821 et 2,842) et ceci vient confirmer la validité des essais réalisés en laboratoire. La Figure 4.1 illustre que le granulat possède une granulométrie étalée.

4.1.3 Granulat de calibre 0-1,25 mm (Sable naturel)

Le sable utilisé pour cette recherche est un sable séché et tamisé de type Bomix acheté sac de 20 et 30 kg. Ce type de sable a été utilisé afin de faciliter la coordination des essais entre l'ÉTS à Montréal et Amos. La granulométrie effectuée sur ce sable, en respect avec la norme LC 21-040, permet de classer ce sable comme un sable uniforme de type SP selon la classification unifiée des sols (USCS). La Figure 4.1 présente la granulométrie ce sable. Sa courbe, possédant une pente relativement abrupte entre les tamis 1,25 mm et 80 μ m, signifie qu'il y a beaucoup de particules de grosseur comprise entre 80 μ m et 1,25 mm.

4.1.4 Filler

Le filler utilisé, une poussière de pierre, provient de la carrière Calco, division de Graymont à St-Marc-des-Carrières, située entre Trois-Rivières et Québec au nord de l'autoroute 40. Aucune norme LC ne précise une exigence particulière sur les particules passant le tamis 80 μm . L'analyse granulométrique est effectuée par sédimentation et est présenté au Tableau 4.2. La méthode d'analyse doit être conforme aux normes NQ 2560-114 et ASTM D 242.

Tableau 4.2 Caractéristique et granulométrie du filler utilisé pour la formulation des enrobés

Propriétés		Normes	Filler
% massique du mélange		-----	2,0 %
Source		-----	Calco
Densité brute (d_{gb})		NQ 2560-114 et ASTM D 242	2,700
Granulométrie	Tamis (μm)	Tamis (mm)	% passant
	630	100	100
	315	95-100	100
	160	-----	99
	80	70-100	76
	59	-----	59
	42	-----	45
	28	-----	41
	20	-----	37
	15	-----	32
	11	-----	28
	8	-----	22
	6	-----	20
	4	-----	18
	3	-----	17

4.1.5 Granulats bitumineux recyclés (GBR)

Le GBR provient d'une centrale d'enrobage à St-Isidore où il a été prélevé au mois de juin 2010. La granulométrie a été effectuée après extraction et selon la norme LC 26-350 (Analyse granulométrique des granulats) désormais remplacé par LC 26-700 (Analyse granulométrique des granulats d'extraction). Le GBR doit respecter les exigences de la norme NQ 2560-114 selon l'utilisation prévue de l'enrobé recyclé. Selon la caractérisation du GBR, il correspond en grande majorité à un enrobé de surface de type ESG-10. Seul le critère du tamis 5 mm n'est pas respecté avec un pourcentage passant supérieur de 72 % par rapport à l'exigence de la norme qui précise une valeur entre 52 à 65 %. Toutefois, les méthodes en chantier d'enlèvement de l'enrobé procure généralement plus de particules fines en raison de la fragmentation des granulats dû aux chocs ce qui peut expliquer cet écart par rapport à la norme. Le Tableau 4.3 présente les caractéristiques complètes du GBR.

L'obtention de la teneur en bitume du GBR a été réalisée sur deux échantillons de 1 000 grammes selon la méthode LC 26-100 (Détermination de la teneur en bitume), soit par la méthode d'extraction du bitume avec le trichloroéthylène. L'essai a permis d'obtenir des teneurs en bitume de 4,20 et 4,24 % donnant une teneur moyenne de 4,22 %. La classification du bitume extrait a respecté la norme 4101 où les essais de cisaillement dynamique (méthode d'essai AASHTO T240) ainsi que la flexion de poutre (méthode d'essai AASHTO T313) ont été effectués. Ces essais ont permis de déterminer un bitume de grade PG 76-28. L'essai de cisaillement dynamique sur le bitume vieilli à court terme a donné une température de 76,0 °C afin d'obtenir la valeur minimale requise par la norme de $G^*/\sin\delta = 2,2 \text{ kPa}$. Pour l'essai de flexion de poutre, une température de -30,3 °C a été obtenue afin de respecter la valeur maximale de module de rigidité (S) de 300 mPa.

Comme il a été mentionné à la section 1.5.3, on considère que l'ajout de 15 % de GBR ne modifie pas significativement le grade et les caractéristiques du bitume final de l'enrobé. De ce fait, il a été décidé de ne pas vérifier davantage les propriétés du bitume mélangé, soit le bitume du GBR et bitume vierge.

Tableau 4.3 Caractéristiques et granulométrie du granulat bitumineux recyclé

Propriétés		GBR	
Provenance		St-Isidore	
Type d'enrobé récupéré selon granulométrie		ESG-10	
Teneur en bitume moyenne		4,22 %	
Température élevée de caractérisation T_e (°C)		76,9 °C	
Température basse de caractérisation T_b (°C)		-30,3 °C	
Type de bitume		PG 76-28	
Densité (d_{gb})		2,721	
Granulométrie (selon LC-350)	Tamis (mm)	Exigences ESG-10	% passant
	14	100	100
	10	92-100	95
	5	52-65	72 ¹
	2,5	-----	57
	1,25	-----	45
	0,630	-----	37
	0,315	-----	26
	0,160	-----	15
	0,080	4,0-10,0	7,2
Note 1 : Critère ne respectant pas l'exigence de la norme			

4.2 Bitume

Tel que spécifié à la section 3.4.3 du chapitre 3, deux types de bitume ont été utilisés lors de cette recherche, soit un bitume pur (sans ajout de polymère) PG 58-28 et un bitume PG 64-34, qui est pour sa part, modifié avec l'ajout de polymère. Le Tableau 4.4 présente les principales caractéristiques des deux types de bitume utilisés provenant de Les Industries McAsphalt Ltée de Valleyfield.

Tel que mentionné précédemment, l'ajout de polymère permet de modifier les caractéristiques du bitume et ainsi améliorer les performances désirées. Les attestations de conformité complètes des deux bitumes sont présentes à l'annexe VII.

Tableau 4.4 Caractéristique des bitumes utilisés (données du fournisseur)

Caractéristiques	Résultats	
Fournisseurs	Industrie McAsphalt	
Classe de bitume	PG 58-28	PG 64-34
Numéro de lot	110405-01	100623-02
Masse volumique à 25 °C (g/cm ³)	1,023	1,018
Stabilité au stockage (°C)	1,1	0,3
Recouvrance d'élasticité à 10 °C (%)	0,0	85,0
Viscosité Brookfield à 135 °C (Pa*s)	0,290	0,691
Viscosité Brookfield à 165 °C (Pa*s)	0,083	0,251
Température élevée de caractérisation T _e (°C)	60,8	65,9
Température basse de caractérisation T _b (°C)	-29,6	-35,9

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Cette section présente les résultats obtenus pour des essais sur les différents enrobés testés au cours du programme expérimental décrit au chapitre 3. Le détail de formulation des enrobés, l'évolution de température durant le processus de malaxage, les pourcentages de vides obtenus à la PCG, les pourcentages d'orniérage obtenu à l'orniére a ainsi que les résultats de module complexe sont présentés pour chaque enrobé confectionné.

5.1 Formulation des enrobés

Durant ce programme expérimental, dix enrobés ont été confectionnés afin d'obtenir des résultats représentatifs des enrobés utilisés sur les routes du Québec. Durant le programme expérimental, la nomenclature suivante a été utilisée afin d'identifier les différents enrobés confectionnés : De plus, le Tableau 5.1 représente les enrobés confectionnés et testés.

ESG10-5828-LEA3

- **ESG10** : enrobé de type ESG-10;
- **5828** : bitume de type PG 58-28;
- **LEA** : méthode d'enrobage à basse énergie (**HMA** pour enrobé à chaud);
- **3** : teneur en eau de 3 % ajouté par rapport à la masse de GBR.

Tableau 5.1 Nomenclature des enrobés confectionnés

Enrobés à chaud ESG-10 (enrobé de référence)	
ESG10-5828-HMA	ESG10-6434-HMA
Enrobés EBE	
ESG10-5828-LEA1	ESG10-6434-LEA1
ESG10-5828-LEA3	ESG10-6434-LEA5
ESG10-5828-LEA5	ESG10-6434-LEA9
ESG10-5828-LEA7	
ESG10-5828-LEA9	

5.1.1 Dosage en enrobé recyclé

Tous les enrobés confectionnés dans ce rapport ont utilisés un dosage de granulat bitumineux recyclé de 15 % massique, autant pour les enrobés à chaud que pour les EBE.

5.1.2 Formule de mélange

5.1.2.1 Combiné granulométrique

Étant donné que seule la teneur en eau par rapport au granulat recyclé varie d'un enrobé à l'autre, une seule combinaison granulométrique a été nécessaire pour tous les enrobés confectionnés. Le Tableau 5.2 présente le combiné granulométrique des enrobés ainsi que les exigences par rapport à la norme.

Tableau 5.2 Combiné granulométrique des enrobés confectionnés

Tamis (mm)	Combiné (%)		Exigences ESG-10	
			Minimum	Maximum
14	100	Fuseau granulométrique	100	100
10	96		92	100
5	63		52	65
0,160	8,6		-----	-----
0,08	4,9		4	10
2,5	47	Zone de restriction	46	46
1,25	37		31	37
0,630	28		23	27
0,315	16		18	18

Il est à noter que les valeurs entre les tamis 0,315 mm et 2,5 mm sont une zone de restriction où le combiné doit être à l'extérieur de ces valeurs.

La Figure 5.1 présente la granulométrie de l'enrobé par rapport à la courbe de masse volumique maximale (CMVM). Elle est tracée par une droite reliant l'origine au point 3,3 mm^{0,45}, soit le tamis 14 mm à l'exposant 0,45. Cette courbe montre la meilleure granulométrie théorique pour minimiser les vides. La Figure 5.1 montre que la courbe granulométrique de l'enrobé confectionné suit en grande partie la CMVM exceptée aux tamis supérieurs 10 mm afin de respecter les exigences de la norme.

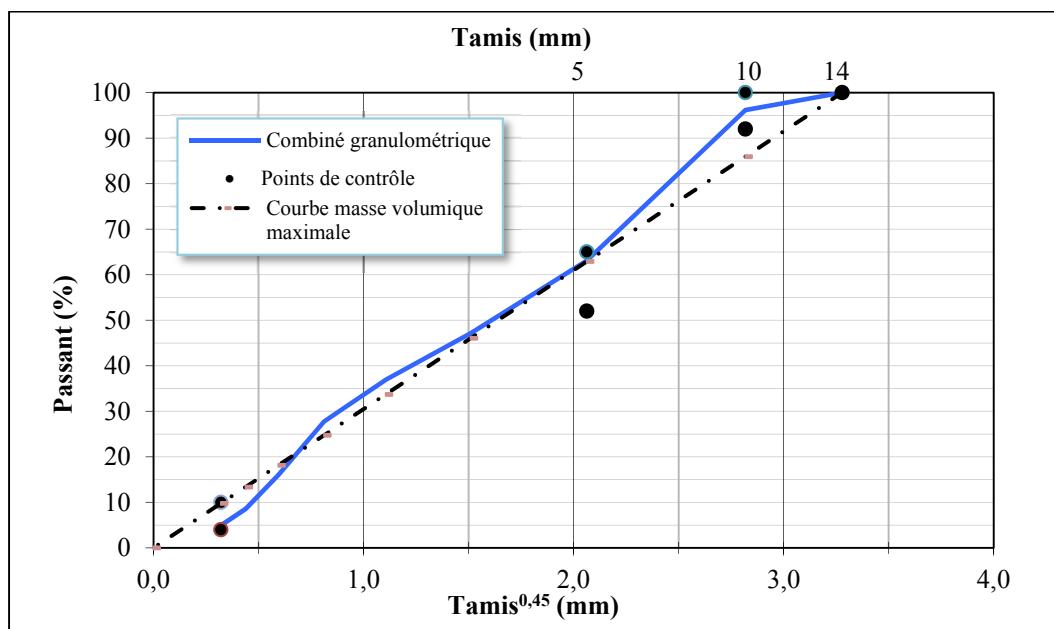


Figure 5.1 Granulométrie des enrobés par rapport aux points de contrôle du fuseau granulométrique et à la CMVM

Également, en faisant référence à la section 1.3.7.5 (Figure 1.11) du chapitre 1 sur la granulométrie favorable pour un enrobage adéquat par la mousse du bitume, la Figure 5.2 illustre que la granulométrie des enrobés confectionnées respecte de façon générale le fuseau théorique. Le pourcentage de tamisat pour les tamis de 10 et 14 mm ne respecte pas la courbe en raison des limites imposées par la norme. Donc, de façon théorique, la granulométrie de l'enrobé favorise l'enrobage des granulats par la mousse de bitume. Par la suite, cet aspect peut possiblement améliorer les performances des EBE.

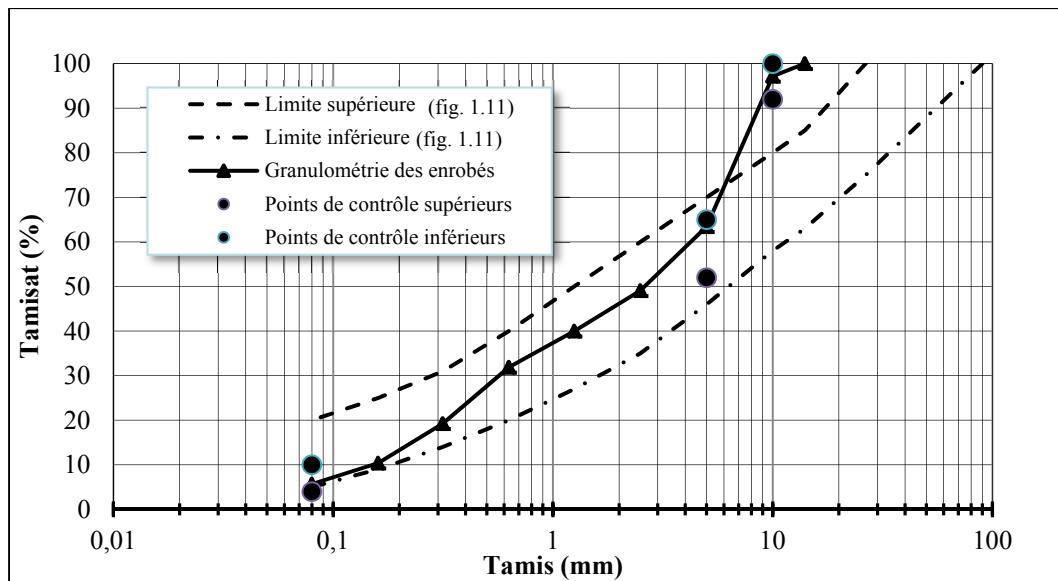


Figure 5.2 Comparaison de la granulométrie des enrobés confectionnés versus le fuseau granulométrique favorable d'un enrobé confectionné à la mousse de bitume

5.1.2.2 Calibration des formules de mélange des enrobés

Les enrobés avec le bitume PG 58-28 et PG 64-34 contenant 15 % massique de GBR ajouté à chaud (105 °C) ont été utilisés pour la formulation. En considérant le volume de bitume effectif (V_{be}) de 12,2 %, prescrit par la norme pour les enrobés ESG-10, et avec les caractéristiques des granulats, un pourcentage de bitume absorbé estimé ($P_{ba, est.}$) à 0,53 % et un pourcentage de bitume estimé ($P_{bi, est}$) total de 5,27 % ont été calculés.

En tenant compte du pourcentage de bitume du GBR de 4,22 %, la quantité de 15 % de GBR ajoutée procure un pourcentage de bitume de 0,63 %. Ce pourcentage doit être soustrait du pourcentage total de 5,27 % donnant ainsi le pourcentage de bitume d'ajout à 4,64 % selon l'équation suivante :

$$P_a = P_f - R * P_{GBR} \quad (5.1)$$

Où :

- P_a : pourcentage de bitume neuf à ajouter,
 P_f : pourcentage de bitume total selon la formulation,
 R : pourcentage massique du GBR ajouté,
 P_{GBR} : pourcentage de bitume du GBR calculé.

Avec ces données, trois enrobés ont été confectionnés et trois essais de densités par la méthode de pesée hydrostatique ont permis d'obtenir une moyenne de 2,547. À partir de cette valeur réelle, le P_{bi} ainsi que le P_{ba} ont été recalculés à 5,35 et 0,54 % respectivement donnant ainsi une nouvelle d_{mm} de 2,578. La valeur corrigée du bitume tenant compte du GBR a été recalculée selon l'équation 5.1. Pour sa part, la densité brute des granulats (d_{gb}) de 2,779 a été calculée en fonction du combiné granulométrique et de chaque densité des granulats utilisés. Enfin, la densité du bitume (d_b) de 1,023 a été tirée des spécifications du fabricant. Par la suite, la même procédure a été effectuée pour l'enrobé avec le bitume PG 64-34. Le Tableau 5.3 présente le sommaire des valeurs des proportions massiques des granulats et du bitume obtenues pour la formulation finale des enrobés. La description complète des enrobés est présente à l'Annexe VI.

Tableau 5.3 Proportions massiques finales de formulation des enrobés ESG-10 à chaud et EBE avec les bitumes PG 58-28 et PG 64-34

Éléments	PG 58-28	PG 64-34
Pierre 5-10 mm (%)	33,6	
Pierre 0-5 mm (%)	27,6	
Sable 0-1,25 mm (%)	18,1	
Filler (%)	1,9	
GBR (%)	14,3	
d_{mm}	2,578	2,577
d_{mb}	2,498	2,487
P_{ba} (%)	0,54	0,54
P_{bi} total de l'enrobé (%)	5,35	5,32
P_{bi} à considérer du GBR (%)	0,63	0,63
P_{bi} neuf à ajouter (%)	4,72	4,69

Bien entendu, le fait d'ajouter de l'eau lors du malaxage des EBE fait possiblement varier les caractéristiques de l'enrobé (d_{mm} , P_{ba} , etc). Comme il a été vu au chapitre 1, la qualité de la mousse de bitume produite lors de l'ajout en eau dépend beaucoup de la quantité d'eau ajoutée. Selon la quantité d'eau ajoutée, la mousse de bitume peut produire un mauvais enrobage. Ceci peut amener un pourcentage de bitume absorbé différent par exemple. Toutefois, il n'y a pas eu de formulation spécifique aux EBE. Étant donné que le but principal de l'expérimentation est d'évaluer l'effet de l'eau sur le comportement de l'enrobé et de comparer à un enrobé à chaud standard, les EBE ont été fabriqués selon les deux formulations du Tableau 5.3. Pour les EBE, seule la teneur en eau fut modifiée.

5.2 Températures des enrobés lors du malaxage et du compactage

Lors des essais de l'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire des différents enrobés, plusieurs températures ont été recueillies lors de l'essai afin de déterminer l'évolution de la température dans le mélange à chaud versus celui pour les EBE. Le Tableau 5.4 montre ces variations de température lors des essais.

Les températures après malaxage des deux enrobés à chaud sont respectivement de 116,8 et 123,4 °C pour les enrobés avec le bitume PG 58-34 et PG 64-34. Ceci représente les températures normales pour un enrobé à chaud standard. La différence entre l'écart de température de ces deux mélanges est due à la température initiale des bitumes, soit 147 et 168 °C.

La température finale après malaxage des enrobés à basse énergie sont pour la grande majorité sous la barre des 100 °C. Seules les enrobés avec une teneur en eau de 1 % ont des températures après malaxage légèrement supérieures à 100 °C. Les valeurs varient de 102,2 à 87,3 °C pour les mélanges avec le bitume PG 58-28 et de 104,5 à 90,1 °C pour le bitume PG 64-34. Ceci correspond à la plage de température normale des EBE expliquée au chapitre deux. Les températures après malaxage plus élevées pour les enrobés avec le bitume PG 64-

34 sont attribuables, à la température initiale de chauffage du bitume et des granulats plus élevées que pour les enrobés avec un PG 58-28.

Tableau 5.4 Températures des composantes et des enrobés lors de l'essai à la PCG

ÉLÉMENTS	TEMPÉRATURE (°C)					
	HMA ESG-10	EBE ESG-10				
		1 % d'eau	3 % d'eau	5 % d'eau	7 % d'eau	9 % d'eau
<i>Bitume PG 58-28</i>						
Température des granulats	162,0	162,0	162,0	162,0	162,0	162,0
Température du GBR	105,0	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7
Température du bitume	147,0	147,0	147,0	147,0	147,0	147,0
Masse d'eau ajoutée (g)	-	7,84	23,52	39,19	54,57	70,55
Température de l'eau ajoutée	-	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
Température après malaxage	140,3	102,2	97,5	94,6	89,1	87,3
Température de cure (entre malaxage et PCG)	136	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
Température à la surface de la briquette après PCG	116,8	70,8	70,2	67,7	67,3	65,2
<i>Bitume PG 64-34</i>						
Température des granulats	183,0	183,0	-	183,0	-	183,0
Température du GBR	105,0	22,7	-	22,7	-	22,7
Température du bitume	168	168	-	168	-	168
Masse d'eau ajoutée (g)	-	7,84	-	39,01	-	70,22
Température de l'eau ajoutée	-	22,1	-	22,1	-	22,1
Température après malaxage	159,2	104,5	-	96,4	-	90,1
Température de cure (entre malaxage et PCG)	162,0	95,0	-	95,0	-	95,0
Température à la surface de la briquette après PCG	123,4	74,6	-	72,9	-	70,1

Les résultats illustrent une diminution de température après malaxage avec l'augmentation des pourcentages d'eau ajoutés au mélange. Par exemple, pour le bitume PG 58-28, une teneur en eau de 1 % donne lieu à une température après malaxage de 102,2 °C alors que la température après malaxage est 87,3 °C pour un ajout de 9 %. Ce phénomène est également observable pour la confection des EBE avec le bitume PG 64-34. Par ailleurs, la température

finale après compaction à la PCG est comprise entre 65,0 et 75,0 °C pour les EBE, températures qui sont comparables à celles retrouvées fréquemment au chantier.

5.3 Variation de la teneur en eau de l'enrobé lors du malaxage, de la cure et du compactage

Lors du malaxage, de la cure et du compactage des enrobés à la PCG, les matériaux ont été pesées afin de déterminer l'évolution de leur teneur en eau. Ces données sont fournies au Tableau 5.5.

Tableau 5.5 Évolution de la teneur en eau dans les EBE lors du malaxage, de la cure et de la compaction pour l'essai à la PCG

Enrobés	% d'eau du mélange avant malaxage	% d'eau du mélange après malaxage	% d'eau du mélange après cure	% d'eau du mélange après compactage
ESG10-5828-LEA1	0,14	0,12	0,09	0,08
ESG10-5828-LEA3	0,43	0,15	0,12	0,11
ESG10-5828-LEA5	0,71	0,21	0,12	0,11
ESG10-5828-LEA7	0,99	0,25	0,13	0,12
ESG10-5828-LEA9	1,27	0,28	0,14	0,13
ESG10-6434-LEA1	0,14	0,11	0,11	0,10
ESG10-6434-LEA5	0,71	0,19	0,14	0,13
ESG10-6434-LEA9	1,27	0,22	0,17	0,15

Tout d'abord, la masse des enrobés après malaxage a été déterminée. Cette masse comparée à la masse totale initiale des matériaux de l'enrobé permet de déterminer la quantité d'eau évaporée lors du processus d'enrobage des EBE. Par la suite, la masse des enrobés a été prise avant et après la cure de 45 minutes à l'étuve. Enfin, une mesure de la masse des enrobés a été prise après l'essai à la PCG afin de constater si le compactage des enrobés a permis d'évacuer un pourcentage de la teneur en eau. Les disques de papier nécessaires à l'essai PCG ont été pesés après séchage à l'étuve afin d'enlever l'eau pouvant avoir été absorbée et

considérer la petite masse d'enrobé collée sur les papiers. Enfin, les briquettes à la PCG ont été défaites et séchées à l'étuve pour confirmer la teneur en eau finale de l'enrobé.

Pour les enrobés avec le bitume PG 58-28, on observe que le malaxage des EBE est l'étape où il y a la plus grosse perte d'eau. Cette perte est proportionnelle à la teneur en eau ajoutée initialement au GBR. Des pertes d'eau de 0,02 à 0,99 % sont observables. Également, durant la cure à 95 °C des EBE, la teneur en eau de l'enrobé diminue proportionnellement à la teneur en eau ajoutée du GBR. Ces pertes sont de l'ordre de 0,03 à 0,14 %. Enfin, durant le compactage à la PCG, la teneur en eau des enrobés diminue d'environ 0,01 % pour tous les enrobés. Cette perte d'eau semble indépendante de la teneur en eau ajoutée initialement au GBR.

En ce qui concerne les enrobés avec le bitume PG 64-34, les résultats suivent la même tendance. Toutefois, les pertes d'eau durant le malaxage sont légèrement supérieures à celles des enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28. Des pertes d'eau de 0,03 à 1,05 % sont observables. Durant la cure, les pertes sont cependant plus faibles de l'ordre de 0,25 %. Enfin, le compactage réduit la teneur en eau des enrobés d'environ 0,01 à 0,02 % et ce, pour les enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34.

5.4 Évaluation de la qualité de l'enrobage

Lors du malaxage des enrobés pour l'essai à la PCG, la qualité de l'enrobage des EBE a été évaluée visuellement. Le tableau 5.6 illustre la qualité de l'enrobage pour les EBE avec le bitume PG 58-28. Il est possible de remarquer que l'enrobé avec une quantité d'eau ajoutée de 1 % d'eau possède plusieurs granulats peu ou non enrobés par le bitume. Avec l'augmentation de la quantité d'eau ajoutée, une nette amélioration de l'enrobage est observée. L'EBE avec une quantité d'eau ajouté de 9 % possède un enrobage total des granulats par le bitume, ce qui doit être normalement le cas pour un enrobé.

Tableau 5.6 Qualité de l'enrobage des EBE confectionnés pour l'essai à la PCG avec le bitume PG 58-28

ESG10-58-34-LEA1	ESG10-58-34-LEA3	ESG10-58-34-LEA5
		
ESG10-58-34-LEA7	ESG10-58-34-LEA9	
		

5.5 Aptitude au compactage (PCG)

L'aptitude au compactage a d'abord été testée sur l'enrobé à chaud traditionnel afin de vérifier la validité de la formulation. La norme LC 26-033 spécifie, pour un enrobé de type ESG-10, des critères de vides de l'ordre de $> 11,0 \%$, entre $4,0$ à $7,0 \%$ et plus grand que $2,0 \%$ pour un nombre de girations données de 10, 80 et 200 respectivement. Une première

briquette a été fabriquée et testée sur l'enrobé confectionné avec le bitume PG 58-28 et un enrobé à chaud standard. Les résultats étant conformes, deux autres essais ont été effectués. En respectant les critères de vides, les résultats des trois briquettes ont permis de confirmer la validité de la formule de mélange. Il est important de rappeler que cette même formule a été utilisée pour tous les autres mélanges, car seule la teneur en eau par rapport à la masse du GBR varie d'un enrobé à l'autre.

Par la suite, des teneurs en eau de 1, 3, 5, 7 et 9 % par rapport à la masse du GBR ont été ajoutées à chaque mélange contenant le bitume PG 58-28. Pour chaque teneur en eau, trois briquettes à la PCG ont été testées et une moyenne a été établie en respectant les critères de validités des essais présents à la norme LC 26-003. Suite à ces essais, les enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34 ont été malaxés en reprenant le même processus utilisé que pour les enrobés avec le bitume PG 58-28. Toutefois, seules les teneurs en eau de 1 %, 5 % et 9 % ont été utilisées afin de réduire le nombre d'essais tout en représentant bien toute la gamme des teneurs en eau ciblées. Le Tableau 5.7 fournit les résultats de pourcentages de vides moyens de trois briquettes obtenus à la PCG pour chaque type d'enrobés.

Les deux enrobés à chaud standard avec les deux types de bitumes respectent les critères de vides imposés par la norme. Les résultats montrent des vides légèrement plus élevés pour l'enrobé confectionné avec le bitume PG 64-34 comparativement à celui confectionné avec le bitume PG 58-28. Encore une fois, la plus grande viscosité par l'ajout de polymère du bitume PG 64-34 pour une même température de compactage (95 °C) provoque ces différences de vides.

La teneur en vides des EBE ne varie pas de façon proportionnelle à l'augmentation de la teneur en eau dans le mélange. L'augmentation de la teneur en eau donne des vides plus faibles et ce, pour les deux types d'enrobés étudiés. Le critère à 80 girations n'est pas respecté pour l'enrobé au bitume PG 58-28 pour une teneur en eau de 1 et 3 %. La valeur maximale de 7,0 % est dépassée dans les deux cas possédant respectivement 7,2 et 7,0 % de

vides. Pour l'enrobé confectionné avec le bitume PG 64-34, la valeur des enrobés avec une teneur en eau ajoutée à 1 % ne respecte pas la valeur maximale du 7,0 % se situant à 7,21 % de vides. Pour tous les HMA et les EBE, les critères à 10 et 200 girations respectent les pourcentages de vides prescrits par la norme.

Tableau 5.7 Moyenne des vides et des écarts-types de trois briquettes obtenus à l'essai PCG

ENROBÉS	10 GIRATIONS		80 GIRATIONS		200 GIRATIONS	
	Vides moyen (%)	Écart-type	Vides moyen (%)	Écart-type	Vides moyen (%)	Écart-type
<i>Bitume PG 58-28</i>						
ESG10-5828-HMA	11,9	0,04	6,0	0,12	4,1	0,07
ESG10-5828-LEA1	13,0	0,13	7,2 ¹	0,11	5,2	0,02
ESG10-5828-LEA3	12,9	0,21	7,0	0,22	4,9	0,21
ESG10-5828-LEA5	13,1	0,09	6,9	0,11	4,9	0,11
ESG10-5828-LEA7	12,9	0,23	6,9	0,25	4,8	0,17
ESG10-5828-LEA9	12,0	0,19	5,9	0,11	3,9	0,11
<i>Bitume PG 64-34</i>						
ESG10-6434-HMA	12,0	0,21	6,2	0,15	4,2	0,11
ESG10-6434-LEA1	13,0	0,10	7,2 ¹	0,12	5,3	0,09
ESG10-6434-LEA5	12,7	0,22	6,9	0,24	5,1	0,19
ESG10-6434-LEA9	12,1	0,10	6,1	0,12	4,3	0,06
Exigences	≥ 11,0	0,25	4,0 à 7,0	0,25	≥ 2,0	0,25
Note 1 : Valeurs ne respectant pas les critères de la norme						

5.6 Résistance à l'orniérage

L'étude de l'influence de la teneur en eau sur la performance à l'orniérage des EBE a été limitée aux enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28. De surcroit, trois teneurs en eau initiale du GBR ont été retenues pour cette étude, soit 1, 5 et 9 %. La résistance à l'orniérage a été effectuée sur deux plaques pour chaque enrobé confectionné. Les éprouvettes ont été conservées à la température de la pièce durant une période minimale de 48 heures avant d'être testées à l'orniéreur (exigence de la norme). L'essai s'est déroulé à une température

contrôlée de 58 °C à plus ou moins 2 °C. La température d'essai est spécifiée dans la norme LC 26-410. Le Tableau 5.8 illustre les profondeurs d'ornières en pourcentages obtenus des deux plaques ainsi que la moyenne.

Tableau 5.8 Pourcentage de déformation des enrobés à l'essai d'orniérage
(repos plaque : 48 h à température du labo; température essais : $58 \pm 2^\circ\text{C}$)

Types d'enrobés		Ornières (%)			
		1 000 cycles	3 000 cycles	10 000 cycles	30 000 cycles
ESG10-5828-HMA	pl. droite	3,4	3,6	4,9	6,8
	pl. gauche	2,8	3,7	4,6	6,4
	moyenne pl.	3,1	3,7	4,7	6,6
ESG10-5828-LEA1	pl. droite	1,7	2,7	3,4	4,7
	pl. gauche	2,5	3,7	5,0	6,9
	moyenne pl.	2,1	3,2	4,2	5,8
ESG10-5828-LEA5	pl. droite	1,8	2,7	3,7	6,3
	pl. gauche	2,9	3,4	5,6	6,6
	moyenne pl.	2,3	3,1	4,7	6,4
ESG10-5828-LEA9	pl. droite	2,3	3,2	4,2	5,5
	pl. gauche	2,7	3,7	7,7	9,5
	moyenne pl.	2,5	3,4	6,0	7,5
Exigences		$\leq 10,0$	$\leq 20,0$	---	---

Lors des essais, les densités brutes (d_{mb}) de chacune des plaques n'ont pas été mesurées. Sachant que la teneur en vide initiale des plaques a une influence sur les déformations à l'orniérage, l'analyse des résultats doit être faite dans un esprit critique.

Sommairement, les résultats respectent les deux critères de la norme pour l'enrobé de type ESG-10, soit moins de 10,0 et 20,0 % d'ornières à 1 000 et 3 000 cycles. Les résultats montrent des ornières plus élevées pour l'enrobé à chaud que pour tous les EBE après 1 000 et 3 000 cycles. De manière générale, il semble a priori que les EBE sont moins susceptibles à l'orniérage que l'enrobé à chaud, sauf pour l'EBE avec 9 % d'eau (ESG10-5828-LEA9) qui présente des ornières plus importantes à un grand nombre de cycles.

5.7 Module complexe

La mesure du module complexe a été effectué sur tous les enrobés à chaud ainsi que les EBE, et ce, pour les deux types de bitume étudiés. Contrairement aux essais de PCG et d'orniéreur et tel que mentionné auparavant, une seul éprouvette a été testée pour chaque enrobé. Rappelons que les éprouvettes ont été récupérées par carottage dans des plaques d'enrobé suivant la procédure de la Figure 3.10.

Également, comme dans le cas des essais à l'orniérage, la densité brute (d_{mb}) des éprouvettes confectionnées pour les essais de module complexe n'a pas été mesurée.

5.7.1 Enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28

L'essai de module complexe procure une série de données imposante difficile à présenter sous forme tabulaire. Les résultats sont, ici, présentés ci- sous forme de graphique, selon le plan Cole-Cole. Bien qu'il existe plusieurs méthodes pour présenter et interpréter les résultats de module complexe, le plan Cole-Cole présente de façon globale et simple tous les résultats de module complexe.

Également, à l'aide de chaque essai, la calibration du modèle 2S2P1D a été effectuée selon la méthode décrite à la section 3.11.7. Les paramètres pour les éprouvettes d'enrobé confectionnées avec le bitume PG 58-28 sont présentés au Tableau 5.9.

À l'aide de la calibration et des valeurs obtenues lors des essais, un graphique a été produit. Il présente les courbes expérimentales, illustrées par des marques, ainsi que les valeurs modélisées, illustrées par des lignes en continues. La Figure 5.3 présente les résultats obtenus pour les essais avec les mélanges utilisant le bitume de type PG 58-28.

Tableau 5.9 Constantes de calibration du modèle 2S2P1D pour les enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28

Enrobés	Paramètres									
	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ_0	β	T_0	C_1	C_2
ESG10-5828-HMA	18	36 000	0,18	0,55	1,75	0,01	2 000	8,39	15,71	183,74
ESG10-5828-LEA1	34	36 000	0,18	0,54	1,75	0,01	2 000	7,24	18,48	183,38
ESG10-5828-LEA5	15	34 500	0,18	0,55	2,00	0,06	2 000	8,52	16,33	183,60
ESG10-5828-LEA9	35	31 000	0,18	0,60	2,00	0,10	2 000	5,80	18,99	183,40

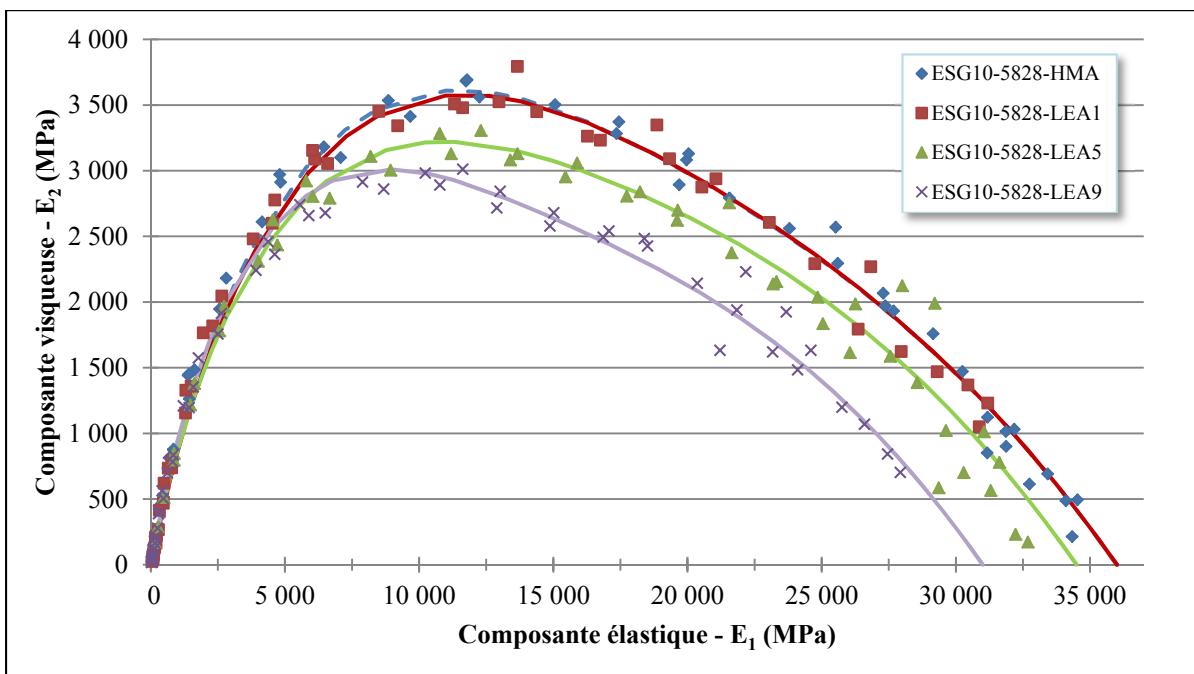


Figure 5.3 Résultats des essais des modules complexes des enrobés avec le bitume PG 58-28 incluant la courbe du modèle 2S2P1D

Les résultats présentés sous cette forme donnent une courbe unique pour chaque enrobé indépendamment de la fréquence et de la température. Les résultats de la Figure 5.3 couvrent toute la plage de températures et fréquences couverte en cours d'essai. Les points d'un même enrobé forment sensiblement un arc de cercle assez bien défini ce qui illustre que l'essai est

bien réussi. Seul l'enrobé contenant une teneur en eau de 1 % possède des valeurs un peu plus dispersées.

Les résultats de l'enrobé à chaud standard sont très similaires à ceux du mélange contenant 1 % d'eau ajoutée selon les deux axes. Il est important de rappeler que l'abscisse (E_1) représente la partie élastique du module complexe et l'ordonnée (E_2) représente la partie visqueuse. Les enrobés avec une teneur en eau initiale du GBR de 5 et 9 % présentent des valeurs différentes de celles obtenues pour l'enrobé à chaud, surtout à basse température ou à fréquence élevée où les valeurs de module complexe sont élevées.

5.7.2 Enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34

En ce qui concerne les enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34, les valeurs des constantes pour la calibration du modèle 2S2P1D sont présentées dans le Tableau 5.10.

Tableau 5.10 Constantes de calibration du modèle 2S2P1D pour les enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34

Mélanges	Paramètres									
	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ_0	β	T_0	C_1	C_2
ESG10-6434-HMA	50	36 000	0,18	0,55	2,10	0,01	2 000	4,83	16,24	183,65
ESG10-6434-LEA1	7	35 000	0,19	0,64	2,20	0,01	2 000	6,00	15,98	183,63
ESG10-6434-LEA5	15	30 500	0,19	0,60	2,20	0,008	2 000	6,08	19,25	183,38
ESG10-6434-LEA9	45	27 500	0,19	0,61	2,20	0,009	2 000	4,23	8,10	97,45

Les résultats expérimentaux ainsi que la courbe du modèle rhéologique sont représentés à la Figure 5.4. Les résultats de tous les enrobés forment un arc de cercle unique ce qui signifie que l'essai s'est très bien déroulé.

Encore une fois, l'enrobé à chaud et l'EBE à 1 % d'eau présente des valeurs relativement semblables. Les EBE à 5 et 9 % d'eau donnent également des résultats plus faibles que ceux obtenus pour l'enrobé à chaud, ce qui concorde avec les résultats des enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28.

Il est intéressant de noter que les valeurs obtenues avec ce bitume modifié (PG 64-34) sont légèrement inférieures pour les parties élastiques et visqueuses à celles obtenues avec les EBE confectionnés avec le bitume non modifié. Nous analyserons plus en détail cet aspect au prochain chapitre.

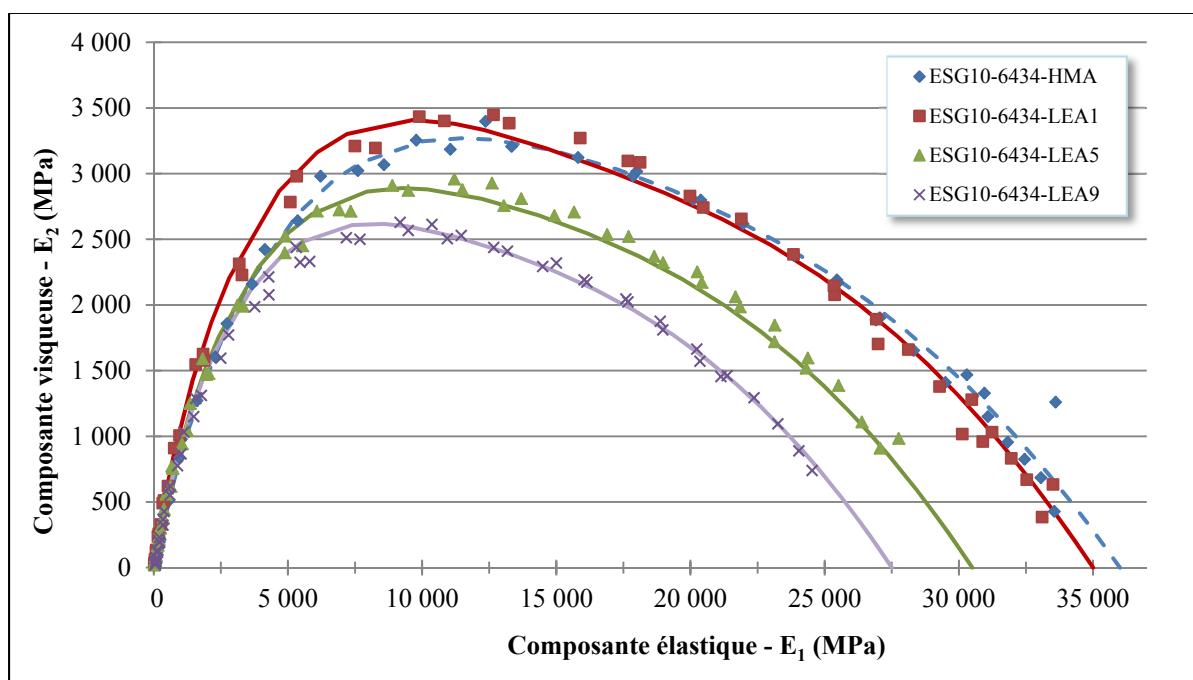


Figure 5.4 Résultats des essais des modules complexes des enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34 incluant la courbe du modèle 2S2P1D

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS

Le présent chapitre permet d'analyser les résultats du programme expérimental présentés dans le chapitre 5. Il a pour but d'éclaircir l'influence de la teneur en eau initiale sur les comportements thermomécaniques d'un EBE et de les comparer à celles d'un même enrobé mais confectionné à chaud. Ceci permettra de valider l'utilisation des EBE et d'identifier une teneur en eau optimale.

L'analyse est effectuée selon l'ordre de présentation des résultats, soit une présentation de l'évolution de la température au sein de l'enrobé en parallèle avec l'évolution de la teneur en eau. Par la suite, l'évolution des vides à la PCG suivie des résultats à l'orniére et de module complexe sont analysés. Également, des corrélations sont effectuées entre ces essais afin d'éclaircir certains éléments.

6.1 Évolution de la température des EBE

En premier lieu, il est important de comprendre le processus d'évolution de la température durant le malaxage d'un EBE. Cette évolution de température apporte les changements de caractéristiques du bitume et de l'eau qui sont nécessaires à la performance adéquate d'un EBE. Étant donné la difficulté de connaître l'évolution de température pour chaque composante dans l'enrobé, la Figure 6.1 présente l'évolution de la température des enrobés après malaxage et après l'essai à la PCG pour les enrobés confectionnés avec les deux types de bitumes. Les deux séries de température de surface ont été recueillies à l'aide d'un thermomètre au laser. La température après malaxage a été prise à plusieurs endroits dans l'enrobé. Celle après l'essai à la PCG a été prise à plusieurs endroits sur la surface de la briquette.

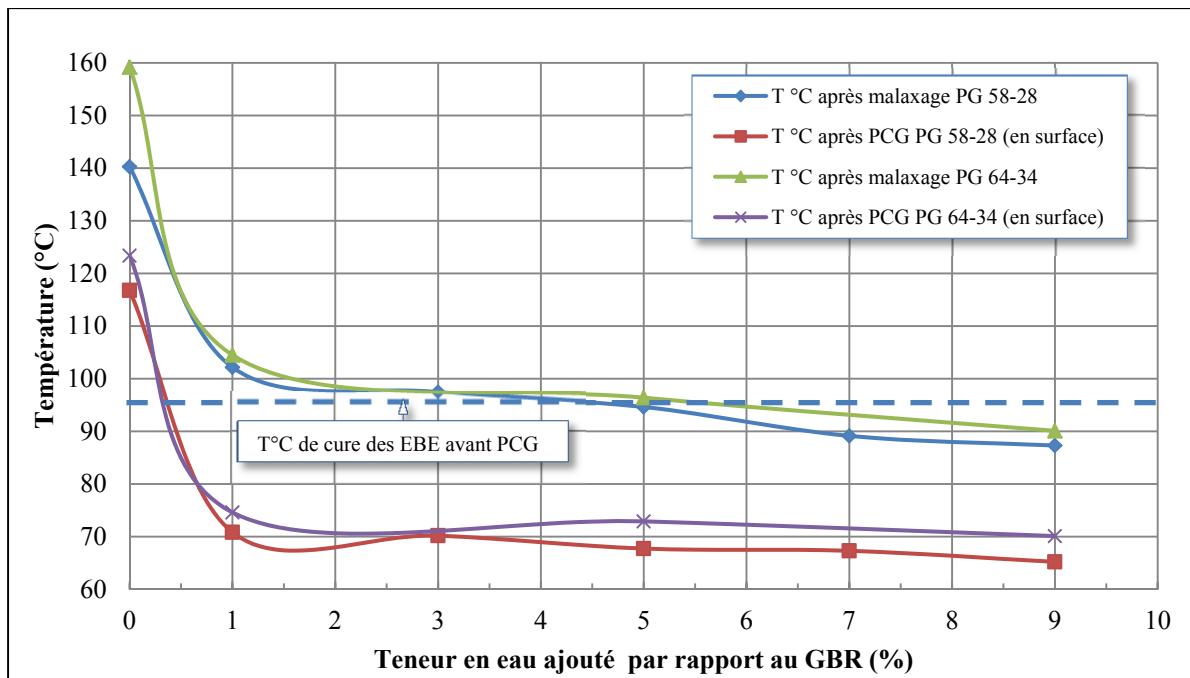


Figure 6.1 Températures après malaxage et après les essais à la PCG des EBE selon le type de bitume et la teneur en eau initiale du GBR

De façon générale, la température après malaxage et après l'essai à la PCG diminue avec l'augmentation du pourcentage d'eau initial contenu dans le GBR ajouté durant le malaxage à la température ambiante. L'eau consomme une grande quantité d'énergie afin d'augmenter sa température d'un degré Celsius : sa capacité calorifique étant grande (4,18 kJ/kg°C). Dans le processus de malaxage, l'eau tire son énergie nécessaire des composantes plus chaudes de l'enrobé, soit les granulats et le bitume. Ce phénomène correspond au premier principe de la thermodynamique de conservation de l'énergie. Ce principe affirme qu'il n'y a aucune création ou perte d'énergie, mais seulement des transformations d'une forme d'énergie en une autre forme d'énergie (Wikipédia, 2012). Dans le cas présent, l'eau utilise l'énergie thermique du bitume et des granulats. Également, il appuie le second principe de la thermodynamique précisant l'évolution de la conservation d'énergie. Ce principe précise que toute transformation doit s'effectuer dans le sens d'un bilan entropique positif (Wikipédia, 2012). Donc, l'échange thermique s'effectue d'un corps chaud vers un corps froid. De plus, l'augmentation de la quantité d'eau dans l'enrobé, accroît l'énergie consommée afin d'augmenter la température de l'eau. Ceci a pour effet de diminuer davantage la température

des granulats et du bitume et en conséquent, celle de l'enrobé. Cet aspect sera quantifié plus en détail à la section 6.2.

Également, les températures des enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34 sont légèrement supérieures comparativement à celles des enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28. Afin d'obtenir une viscosité adéquate pour bien enrober les granulats, une température plus élevée de chauffage (168 °C) est nécessaire pour le bitume PG 64-34 comparativement au bitume PG 58-28 qui nécessite une température de 147 °C.

La Figure 6.1 montre également une diminution constante de la température avec l'augmentation de la teneur en eau et ce, de manière relativement proportionnelle. Une équation linéaire pour chaque droite peut facilement être calculée afin de prédire les températures finales de mélanges en fonction du pourcentage d'eau ajouté. Dans le cas présent, pour les températures après malaxage, les équations des droites de tendances donnent des pentes de -1,9 et -1,8 pour l'enrobé avec PG58-28 et avec PG64-34 respectivement. Cela implique qu'en moyenne, pour chaque pourcentage d'eau ajouté, la température diminue de presque 2°C. Pour la température après PCG, ces pentes sont de -0,7 et -0,6 pour l'enrobé avec PG58-28 et avec PG64-34 respectivement. Les pentes plus faibles des températures après PCG sont attendues puisque la descente en température d'un matériau suit une courbe exponentielle, c'est-à-dire que la vitesse de changement de température diminue avec l'abaissement de la température. Ce phénomène est décrit par la « Loi de Fourier » qui s'applique à la deuxième loi de la thermomécanique. Cette loi, précise que le transfert thermique est effectué d'une région de température élevée vers une région de température plus basse et que, la densité du transfert de chaleur est proportionnelle au gradient de température entre les deux corps (Wikipédia, 2013). La loi vient donc corroborer les résultats obtenus.

De plus, ces pentes sont des indicateurs de la sensibilité des EBE à la teneur en eau. Selon ces résultats, une précision de $\pm 1\%$ pour la valeur de la teneur en eau serait suffisante, puisque selon la norme LC 26-003 (Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à

chaud à la presse à cisaillement giratoire) du MTQ, une précision de ± 2 °C est demandée pour les températures de malaxage et de compactage en laboratoire lors de la formulation ou la validation d'un enrobé.

6.2 Évolution de la teneur en eau des EBE

Parallèlement à l'évolution de la température des EBE, il est important de quantifier l'évolution de la teneur en eau des EBE, car ces deux variables sont dépendantes une de l'autre. Effectivement, la variation de la température des matériaux de l'enrobé s'explique par un échange d'énergie thermique des matériaux, soit un transfert de chaleur. Dans le cas de l'eau, il y a transformation de la phase liquide à la phase vapeur. Cette perte d'eau a été mesurée pour tous les mélanges tel que présentés au Tableau 5.5.

Selon le principe des EBE, la grande majorité de l'eau contenue dans l'enrobé lors de son malaxage est utilisée pour le moussage et, par la suite, s'évapore rapidement. Les paragraphes suivants illustrent en détail l'évolution de la teneur en eau des enrobés confectionnés avec les deux types de bitume afin de vérifier ce principe.

6.2.1 Enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28

La Figure 6.2 montre que la perte d'eau au malaxage est significative pour les EBE confectionnés avec le bitume PG 58-28. La diminution en eau, en pourcentage d'eau résiduelle, varie de 0,02 % pour l'enrobé ESG10-58-28-LEA1 jusqu'à une perte de 0,99 % d'eau résiduelle pour l'enrobé ESG10-5828-LEA9. Donc, la quantité d'eau évaporée est proportionnelle à l'augmentation de la teneur en eau initiale du GBR. La teneur en eau après malaxage se stabilise avec un écart de seulement 0,16 % (0,12 à 0,28 %) entre les différents enrobés comparativement à l'écart des teneurs en eau initiale des enrobés qui est de 1,13 % (0,14 à 1,27 %). La moyenne de la teneur en eau après malaxage des enrobés avec le bitume PG 58-28 est d'environ 0,20 %.

Malgré le fait que la cure des EBE s'est réalisée à 95 °C, soit en dessous du point d'ébullition de l'eau, et que les enrobés étaient couverts lors de cette cure, une perte d'eau est aussi constatée lors de la cure des enrobés. La raison de cette évaporation durant la cure est que l'équilibre thermique n'est pas complètement atteint pour l'enrobé à la fin du malaxage. Donc, une quantité d'eau supplémentaire est évaporée en période de cure en tirant l'énergie nécessaire des matériaux encore suffisamment chaud dans l'enrobé. Le pourcentage d'eau évaporé pour la cure est beaucoup moindre que lors du malaxage avec une diminution d'environ 0,08 % d'eau résiduelle. Après la cure, la teneur en eau de tous les enrobés se stabilise aux environs de 0,12 % d'eau résiduelle. Ces résultats concordent avec la littérature où la teneur en eau final des EBE tend vers une valeur commune et ce, peu importe la teneur en eau initiale. Il est à noter, que selon la littérature, une valeur d'environ 0,5 à 0,7 % est recommandée afin d'obtenir une maniabilité adéquate ce qui est supérieur à la valeur moyenne obtenue d'environ 0,12 %.

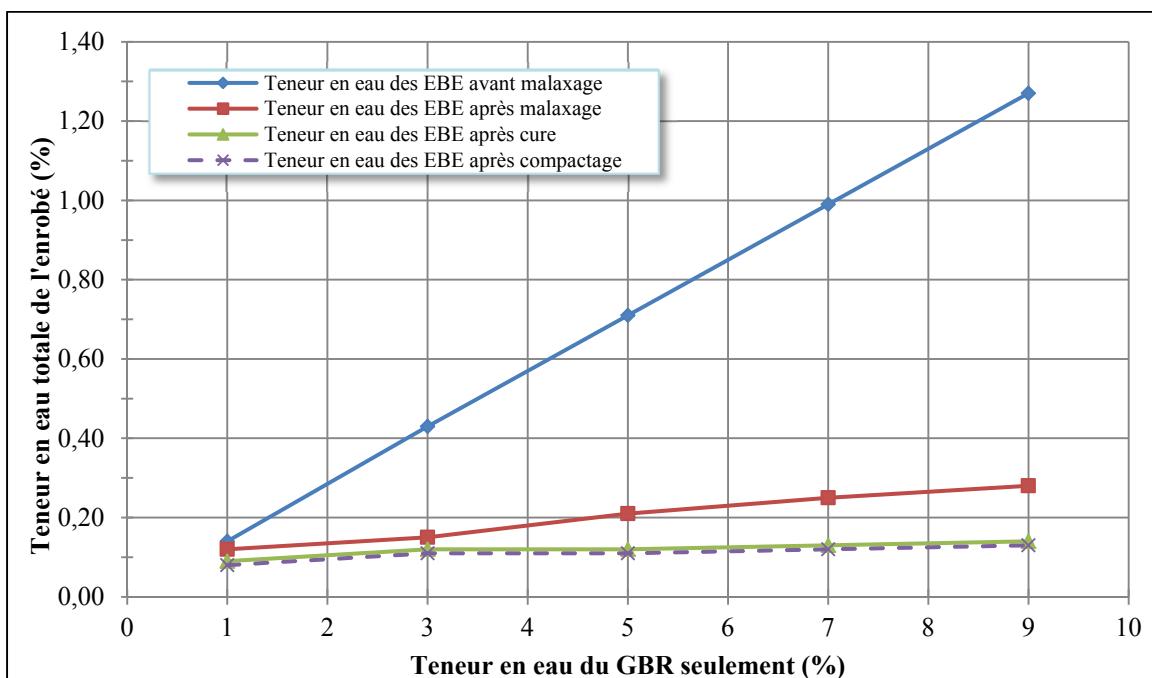


Figure 6.2 Évolution de la teneur en eau des EBE avec le bitume PG 58-28 lors du malaxage, de la cure et du compactage

Enfin, le compactage des enrobés à la PCG amène une faible perte de la teneur en eau des enrobés de l'ordre de 0,01 % seulement. Cette valeur est de beaucoup inférieure à ce que l'on retrouve dans la littérature où la perte est de 0,1 à 0,2 % d'eau lors du compactage. De plus, la teneur en eau finale de tous les enrobés sont semblables et se situe autour de 0,11 % d'eau comparativement à une valeur minimale recommandée dans la littérature de 0,5 % d'eau afin d'assurer une maniabilité suffisante.

6.2.2 Enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34

Du côté des EBE fabriqués avec le bitume PG 64-34, la Figure 6.3 illustre les résultats obtenus. De façon générale, les teneurs en eau sont dans le même ordre de grandeur que ceux obtenus pour les enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28.

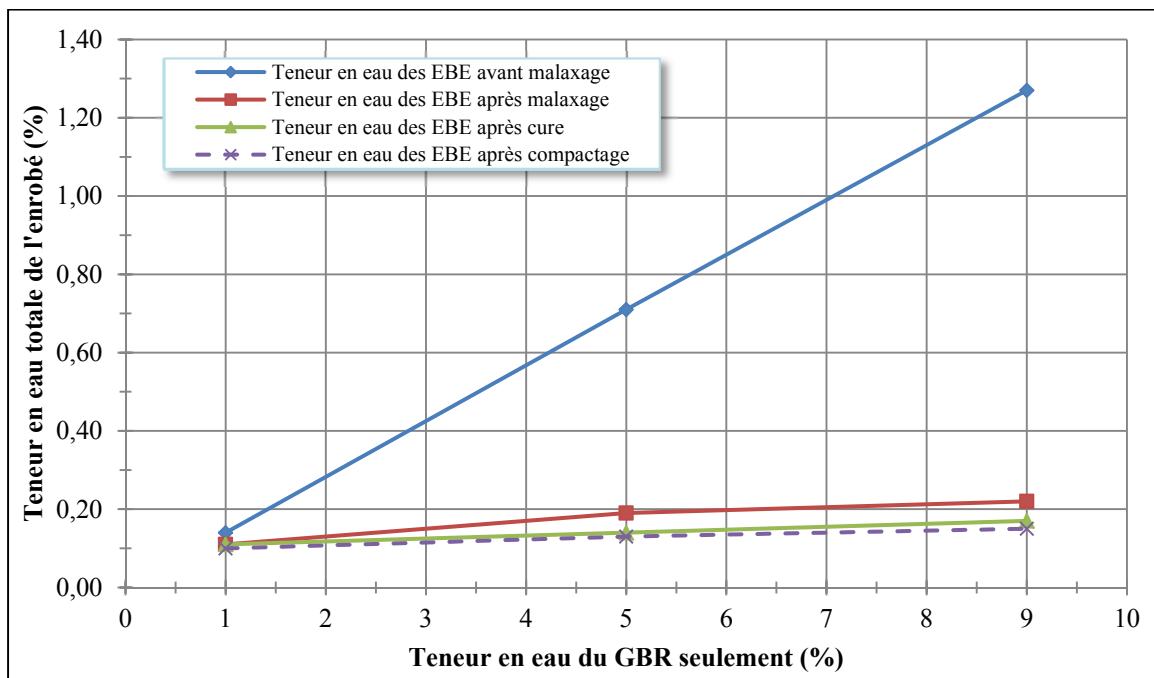


Figure 6.3 Évolution de la teneur en eau des EBE avec le bitume PG 64-34 lors du malaxage, de la cure et du compactage

La perte d'eau durant le malaxage est légèrement supérieure à la perte moyenne d'eau après malaxage de 0,17 % contrairement à 0,20 % pour les enrobés confectionnés avec le bitume

PG 58-28. Cependant, pour les teneurs en eau après la cure à l'étuve, une valeur moyenne de 0,14 % est obtenue ce qui est plus grand que la valeur moyenne de 0,12 % obtenue pour les autres enrobés. Enfin, le compactage de ces enrobés diminue la teneur en eau de 0,01 %, valeur tout à fait comparable à celle des enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28. La moyenne de la teneur en eau finale des enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34 se situe, en définitive, au environ de 0,13 %, valeur supérieure à celles des autres enrobés.

Afin de faciliter l'analyse des teneurs en eau des différents enrobés confectionnés, la Figure 6.4 illustre la comparaison de l'évolution des teneurs en eau avec les deux types de bitume utilisés..

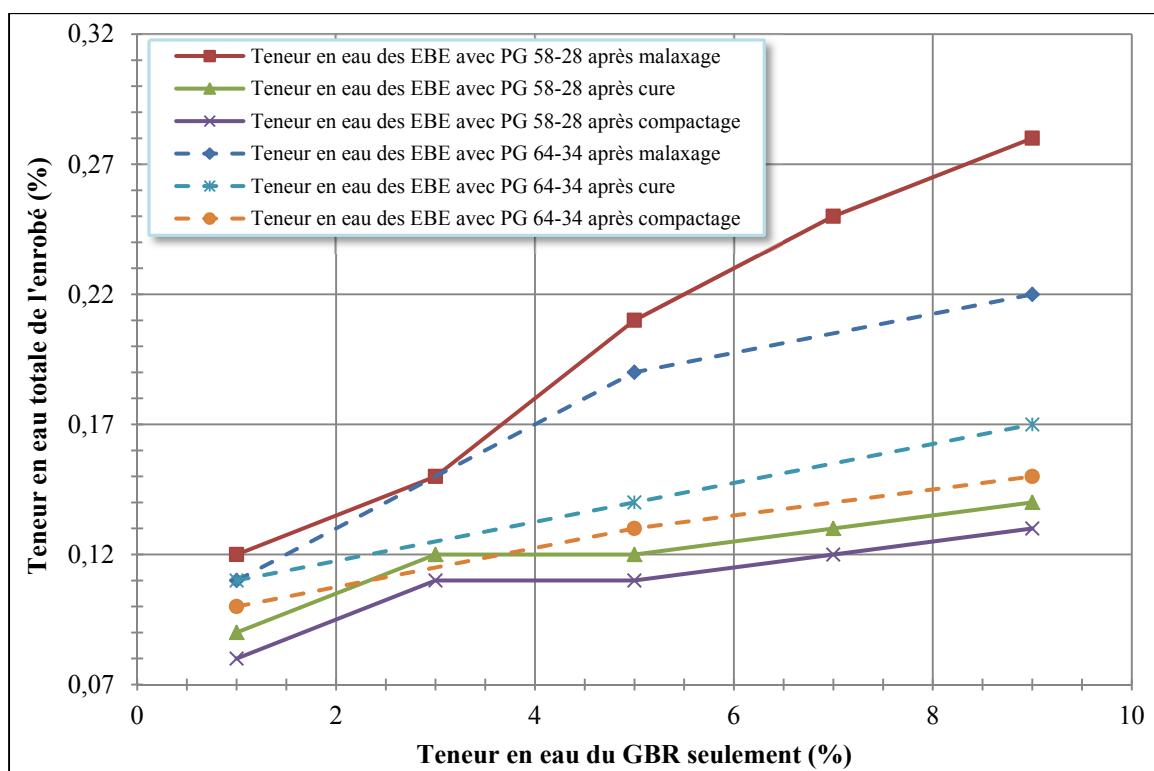


Figure 6.4 Évolution de la teneur en eau des EBE pour les enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28 et ceux confectionnés avec le bitume PG 64-34 après le malaxage, la cure et la compaction

Les teneurs en eau légèrement inférieures pour les enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34 après le malaxage peuvent être dues aux températures de chauffage du bitume et des granulats nettement plus élevés ($> 20^{\circ}\text{C}$) que celles établies pour les enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28. Une température plus élevée fait évaporer une plus grande quantité d'eau et ce, plus facilement. Également, le processus semble être plus rapide, car par la suite, la teneur en eau perdue lors de la cure de 45 minutes est d'environ 0,03 % pour les enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34 contrairement à une perte de 0,08 % pour les enrobés avec le bitume PG 58-28. Ce phénomène peut être expliqué par le principe de la loi de Fourrier, énoncé à la section 6.1. L'équilibre thermique s'effectue plus rapidement pour les enrobés confectionnés à plus haute température étant donné le grand écart de température entre les corps chauds (bitume et granulats) et les corps froids (eau et GBR) : le transfert de chaleur est proportionnel au gradient de température des corps

Par ailleurs, un lien avec la formation de la mousse de bitume peut expliquer la rapidité de la perte de la teneur en eau dans l'enrobé. Comme il a été décrit à la section 1.3.7.4, les deux principaux facteurs influençant la qualité d'une mousse de bitume sont la quantité d'eau ajoutée et la température du bitume. L'expansion volumique de la mousse du bitume s'accroît avec l'augmentation de la teneur en eau et de la température du bitume. Toutefois, cette augmentation du coefficient d'expansion diminue la stabilité de la mousse de bitume en réduisant le feuil de bitume englobant les bulles de vapeurs d'eau. En conséquent, le temps de demi-vie en est réduit. Donc, avec le bitume PG 64-34, la température de malaxage élevée (168°C) réduit le temps de demi-vie de la mousse de bitume ce qui favorise l'évacuation plus rapide de la vapeur d'eau emprisonnée par le bitume. Également, ceci explique l'accroissement de la perte de teneur en eau totale de l'enrobé lorsque la teneur en eau initiale du GBR est également augmentée, et ce, malgré le fait que les bitumes plus durs, comme le PG 64-34 par rapport au PG 58-28, réduit généralement le moussage du bitume.

Il est important de noter que lors du malaxage des EBE, l'augmentation de la teneur en eau initiale du GBR semble procurer un meilleur enrobage des granulats. En effet, il a été observé visuellement qu'une certaine quantité de granulat n'était pas enrobé par le bitume

pour les EBE dont une teneur en eau initiale était de 1 et 3 %. Par contre, les EBE avec des teneurs en eau initiale du GBR de 5, 7 et 9 % offraient un excellent enrobage avec très peu ou pas de particules non enrobées. Il a été expliqué, à la section 1.3.7.4, qu'une mousse de bitume offrant un bon enrobage devait posséder un coefficient d'expansion et un temps de demi-vie élevés. Cependant, le temps de demi-vie est réduit avec l'augmentation en eau ce qui concorde avec la Figure 1.8 de la section 1.3.7.4. L'augmentation de la teneur en eau initiale du GBR apporte un meilleur enrobage malgré la diminution du temps de demi-vie de la mousse. Par conséquent, les données confirment que la teneur en eau initiale du GBR, laquelle favorise une expansion volumique nettement plus significative, a une plus grande influence pour le moussage du bitume que le temps de demi-vie.

En somme, une teneur en eau initiale de 9 % du GBR offre donc une meilleure combinaison entre le rapport d'expansion et le temps de demi-vie selon le principe illustré à la Figure 1.9 de la section 1.3.7.4.

6.2.3 Comparaison de l'évolution de la teneur en eau expérimentale avec les modèles théoriques de conduction thermique

Dans les deux séries d'enrobés confectionnés, les teneurs en eau résiduelles se stabilisent autour de 0,11 % (PG 58-28) et 0,13 % (PG 64-34) pour toutes les teneurs en eau initiale étudiées. La teneur en eau résiduelle d'un EBE ne semble pas être grandement influencée par la teneur en eau initiale. Toujours selon les données obtenues, la température des granulats et du bitume n'a pas une grande influence sur la teneur en eau finale, car elle se stabilise pour tous les enrobés à des valeurs comprises entre 0,11 à 0,13 %. Afin d'appuyer l'idée que la quantité d'eau et la température n'influencent pas directement la teneur en eau finale des EBE, il est intéressant de comparer les données expérimentales aux calculs théoriques du transfert thermique par conduction. Cet échange d'énergie sous forme de chaleur est décrit par l'équation suivante :

$$Q = M * C_p * \Delta T \quad (6.1)$$

où la variable « Q » représente l'énergie en kilojoules (kJ), « M » représente la masse du matériau en kilogramme (kg), « C_p » représente la capacité de chaleur massique du matériau (appelé également constante de chaleur spécifique) en $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$. Cette variable correspond à la quantité d'énergie nécessaire pour éléver d'un degré Celsius la température d'un matériau pour chaque unité de masse de ce matériau. Finalement, « ΔT » représente l'augmentation de température du matériau en degré Celsius ($^\circ\text{C}$), soit la température finale moins la température initiale ($T_f - T_i$). La formule peut donc s'écrire :

$$Q = M * C_p * (T_f - T_i) \quad (6.2)$$

La capacité de chaleur massique dépend du type de matériau. Pour l'eau et la vapeur d'eau, ce coefficient dépend de la température. Également, la phase d'évaporation de l'eau s'effectue à température constante, le terme ΔT devient nul. Également, la constante « C_p » est remplacée par la valeur « L_v » qui correspond à la capacité de chaleur massique d'évaporation de l'eau. L'équation pour la quantité d'énergie nécessaire lors de la phase de transformation de l'eau en vapeur devient donc :

$$Q = M * L_v \quad (6.3)$$

Le calcul se fait par rapport à la masse utilisée lors du malaxage pour la confection des éprouvettes à la PCG. Les températures initiales et finales utilisées sont celles identifiées aux tableaux 5.4 du chapitre 5. Les coefficients de chaleur massique des différents matériaux sont détaillés à l'annexe IV. Pour tous les calculs, il faut assumer l'hypothèse qu'il n'y a aucune perte de chaleur vers l'extérieur au cours du malaxage. En réalité, cette hypothèse est fausse, car des transferts thermiques vers l'air et le matériel utilisé pour le malaxage sont présents. Toutefois, l'hypothèse simplifie les calculs et permet d'obtenir tout de même un bon ordre de grandeur.

Le calcul compare l'énergie thermique offerte par les granulats et le bitume chaud et l'énergie nécessaire du GBR et de l'eau afin d'augmenter leur température. En se basant sur

les températures initiales et finales des matériaux lors du malaxage et considérant la masse d'eau évaporée, un bilan thermique peut être calculé. Selon la théorie, l'énergie donnée par les granulats et le bitume chaud devrait être égale à l'énergie reçue par le GBR et l'eau lors du malaxage. Le tableau 6.1 présente le sommaire des calculs pour différents enrobés confectionnés. Les valeurs négatives indiquent seulement que l'énergie est donnée. De plus, le détail de ces calculs est présent à l'annexe IV.

Le calcul théorique montre que l'énergie disponible provenant des granulats et du bitume chaud est supérieure à l'énergie nécessaire pour augmenter la température du GBR et de l'eau. Selon les calculs théoriques, l'énergie disponible est suffisamment grande pour faire évaporer toute l'eau de tous les enrobés confectionnés, ce qui n'est pas le cas si on compare seulement l'échange d'énergie entre les matériaux. Bien entendu, d'autres facteurs nécessitent des quantités d'énergie. Par exemple, les échanges vers l'extérieur et l'énergie nécessaire pour briser les liens eau-granulats viennent diminuer l'énergie disponible pour le GBR et l'eau. Cependant, ces quantités d'énergie ne sont pas suffisamment grandes considérant le grand écart entre l'énergie donnée et reçue.

Tableau 6.1 Bilan énergétique comparatif des données expérimentales et des calculs théoriques

Enrobés	Énergie disponible (kJ)	Énergie reçue (kJ)
ESG10-5828-LEA1	- 278,3	120,0
ESG10-5828-LEA5	- 301,7	156,7
ESG10-5828-LEA9	- 309,4	191,2
ESG10-6434-LEA1	- 325,2	65,2
ESG10-6434-LEA5	- 359,6	130,1
ESG10-6434-LEA9	- 386,4	201,0

Ce calcul vient appuyer l'énoncé que la teneur en eau finale des EBE est faiblement influencée par la température initiale des matériaux ainsi que par leur teneur en eau initiale.

6.3 Aptitude au compactage

La section précédente a montré que la teneur en eau des EBE avant compaction variait de 0,12 à 0,14 % par rapport à la masse totale de l'enrobé et selon les différents enrobés testés. Comme il a été vu à la revue de la littérature (section 2.6), une teneur en eau minimale de 0,5 à 0,7 %, par rapport à la masse totale de l'enrobé, est recommandée dans les EBE afin d'obtenir une maniabilité suffisante pour la mise en place de l'enrobé (Ventura *et al.* 2008). Afin d'évaluer la maniabilité des EBE confectionnés dans le présent programme expérimental, la prochaine section analyse les résultats obtenus à la PCG des EBE confectionnés avec les bitumes PG 58-28 et PG 64-34.

6.3.1 Enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28

La Figure 6.5 présente les résultats de l'évolution des vides dans l'enrobé en fonction du nombre de giration établies à l'essai PCG pour les enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28. Les valeurs entre parenthèses représentent les teneurs en eau résiduelles des enrobés avant et après compactage à la PCG.

Tel que mentionné lors de la présentation des résultats, l'enrobé confectionné avec une teneur en eau de 1 % (LEA1) ne respecte pas le critère de vides à 80 girations pour l'enrobé ESG-10 dépassant légèrement la valeur de 7,0 % de vides permis par la norme. Cet enrobé, avec une teneur en eau résiduelle de 0,08 %, est celui possédant la plus faible aptitude au compactage, soit les vides les plus élevés. Les EBE avec les teneurs en eau initiale de 3 à 7 % obtiennent ensemble des vides très rapprochés. Leur teneur en eau final est très semblable, variant de 0,11 à 0,12 %.

De façon générale, les vides à la PCG diminuent avec une faible augmentation de la teneur en eau résiduelle après malaxage. Une teneur en eau résiduelle plus élevée après malaxage dans l'enrobé améliore sa maniabilité. L'eau résiduelle agit comme lubrifiant dans l'enrobé facilitant ainsi son compactage. D'autre part, une teneur en eau initiale plus élevée apporte des températures de malaxage et de compaction plus faible de l'enrobé ce qui devrait

diminuer la maniabilité. Toutefois, les faibles différences des teneurs en eau résiduelle des enrobés peuvent ne pas expliquer complètement le phénomène. En effet, comme il a été mentionné, les EBE avec une teneur en eau initiale plus élevée procurent un meilleur moussage du bitume ce qui donne un meilleur enrobage des granulats. En conséquent, le meilleur enrobage des granulats et la meilleure formation de mastic (particules fines avec bitume) amènent une plus grande maniabilité de l'enrobé, et ce, indépendamment de la teneur en eau résiduelle.

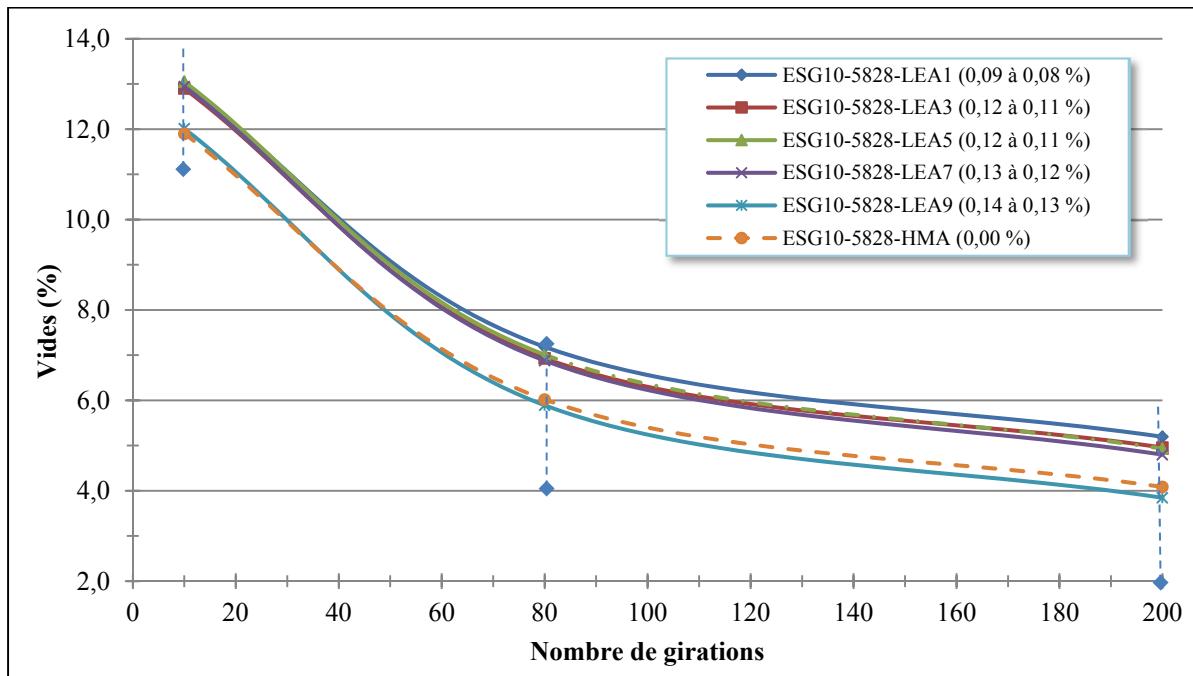


Figure 6.5 Pourcentage de vides selon le nombre de girations pour les enrobés à chaud et EBE avec le bitume PG 58-28

D'autre part, en comparant l'aptitude au compactage de l'enrobé à chaud ESG10-5828-HMA à celui de l'enrobé EBE avec 9 % d'eau initiale ESG10-5828-LEA9, ont constaté un comportement très semblable. Les vides de l'EBE à une teneur en eau initiale de 9 % sont moindre en fin de compactage, soit à long terme, comparativement à ceux l'enrobé à chaud. Cette faible différence peut provenir de l'eau résiduelle encore emprisonnée dans le mélange et qui agit toujours comme lubrifiant. Également, le meilleur enrobage lors du moussage du bitume améliore la maniabilité. Toutefois, on remarque un grand écart vis-à-vis la maniabilité

pour les enrobés LEA7 et LEA9 pour une faible différence de 0,01 % d'eau représentant environ 0,5 gramme pour une briquette à la PCG. Encore une fois, l'enrobage lors du moussage du bitume semble dominer sur la teneur en eau initiale pour la maniabilité de l'enrobé.

D'autre part, l'effet de la quantité d'eau dans l'enrobé s'accentue à long terme. En effet, à 200 girations, la différence entre les pourcentages de vides des cinq EBE contenant différentes teneurs en eau est plus marquée à un grand nombre de girations comparativement à un faible nombre de giration. Donc, ceci confirme que la température de l'enrobé influence moins la maniabilité des EBE que la teneur en eau résiduelle. De plus, un meilleur enrobage à la mousse de bitume semble avoir une plus grande influence sur l'eau résiduelle des enrobés.

Afin de mettre en perspective l'influence de la teneur en eau sur l'aptitude au compactage, nous avons tracé l'évolution des vides par rapport à la teneur en eau des enrobés. Cette représentation permet de mieux voir l'influence de la teneur en eau dans le mélange au niveau des vides. Tel qu'illustré, les vides diminuent avec l'augmentation de la teneur en eau. Dans le cas présent, il est possible d'observer que les vides sont relativement constants pour des teneurs en eau initiale comprises entre 1 et 7 %. Ceci indique que l'essai à la PCG n'est pas très sensible aux changements de température et de teneur en eau des enrobés. Les teneurs en eau résiduelle de 0,12 % à 0,17 % amènent une différence d'environ 0,5 % de vides des EBE confectionnés à des teneurs en eau initiale du GBR de 1 à 7 %. Afin de séparer l'effet de la température et celle de la teneur en eau, il serait intéressant de refaire des essais de PCG à différentes teneurs en eau mais à température constante.

De plus, il est important de noter une diminution abrupte des vides pour les EBE confectionnés à un teneur en eau initiale du GBR de 7 (LEA7) et 9 % (LEA9). Il a été mentionné que l'enrobé LEA9 procure le meilleur moussage du bitume et le meilleur enrobage. De façon préliminaire, ceci peut indiquer qu'à une teneur en eau initiale de 9 % du GBR, le squelette granulaire change plus rapidement et plus facilement à cause de la faible

friction interne causée par l'eau et les granulats complètement enrobés par le bitume. Ceci peut être comparé à la teneur en eau optimale de l'essai *Proctor* afin d'obtenir la plus grande masse volumique possible sur les matériaux granulaires. Encore une fois, il est surprenant de constater qu'une différence de 0,01 % d'eau résiduel entre l'enrobé LEA7 et LEA9 fait varier les vides de près de 1,0 %.

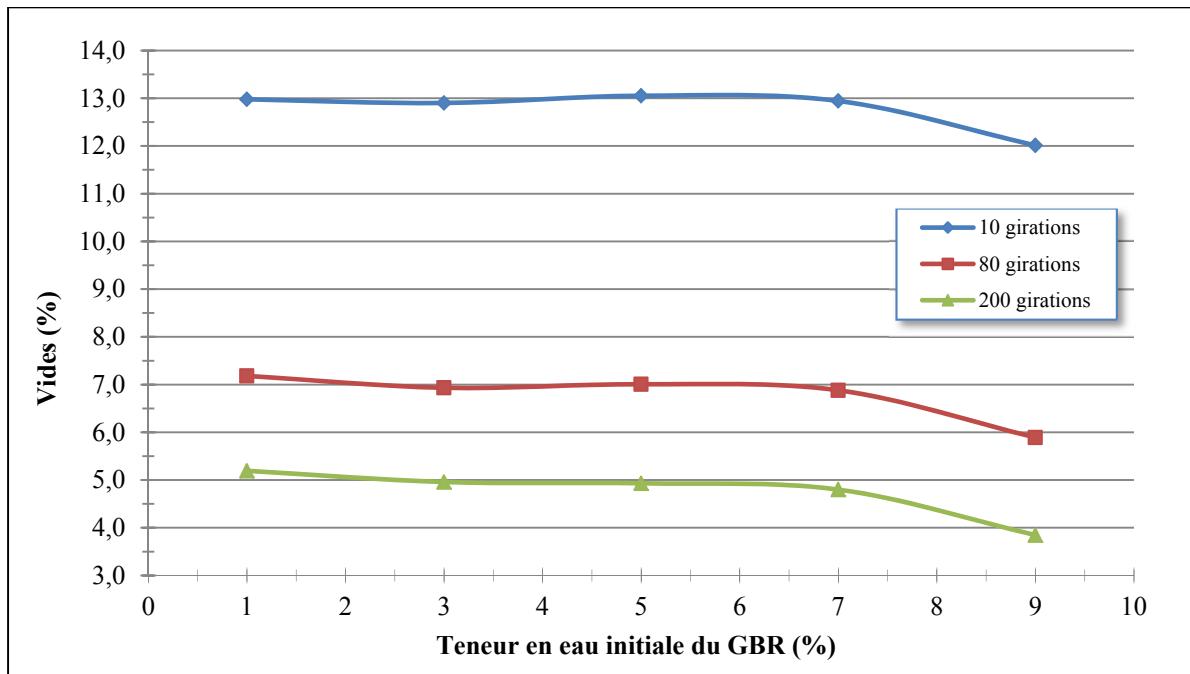


Figure 6.6 Pourcentage de vides selon la teneur en eau initiale du GBR pour les EBE confectionnés avec un bitume PG 58-28

6.3.2 Enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34

La même analyse est proposée pour les résultats obtenus sur les enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34 afin de valider la concordance des résultats. La Figure 6.7 illustre l'évolution des vides par rapport au nombre de girations pour les EBE confectionnés avec un bitume PG 64-34.

L'apparence générale des valeurs obtenues est similaire à celles des premiers enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28. L'enrobé LEA1 est celui procurant le plus de vides,

suivi du LEA5 ce qui correspond aux enrobés avec le bitume PG 58-28. De plus, les vides obtenus pour l'enrobé à chaud et ceux de l'EBE LEA9 sont semblables. Toutefois, contrairement aux premiers enrobés, l'enrobé à chaud possède des vides plus faibles, soit 4,2 %, comparativement au LEA9 avec 4,3 % de vides pour 200 girations.

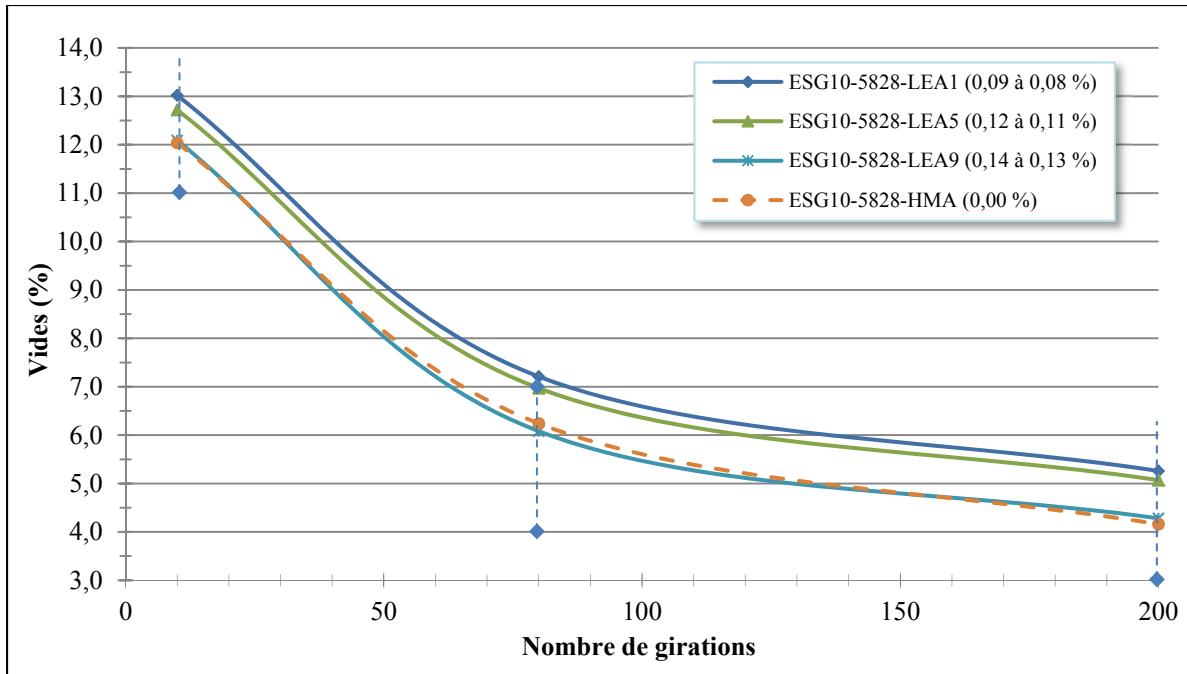


Figure 6.7 Pourcentage de vides selon le nombre de girations pour l'enrobé à chaud et EBE confectionnés avec un bitume PG 64-34

Rappelons que le bitume PG 64-34 possède une plus grande viscosité lors de l'essai à la PCG étant donné que les enrobés débutent l'essai à la température de cure de 95,0 °C. Donc, l'enrobé LEA9 confectionné avec un bitume PG 64-34 possède une moins grande influence sur la maniabilité en raison d'un bitume plus visqueux pour une même température que l'enrobé confectionné avec le bitume PG 58-28.

La Figure 6.8 montre une similitude entre les résultats obtenus pour les EBE confectionnés avec un bitume PG 64-34 et ceux obtenus pour les EBE confectionnés avec un bitume PG 58-28 : les pourcentages de vides pour un nombre de girations donné diminuent avec l'augmentation des teneurs en eau initiale. Également, une teneur en eau initiale de 9 %

procure une baisse en vides plus rapide, soit deux fois moins de vides de 5 % à 9 % d'eau initiale contrairement à l'écart entre les teneurs en eau initiale de 1 % et 3 %. Avec des résultats similaires dans le cas des deux types de bitume, il serait intéressant d'effectuer des essais supplémentaires avec des teneurs en eau initiales supérieures à 9 % afin d'en vérifier le comportement.

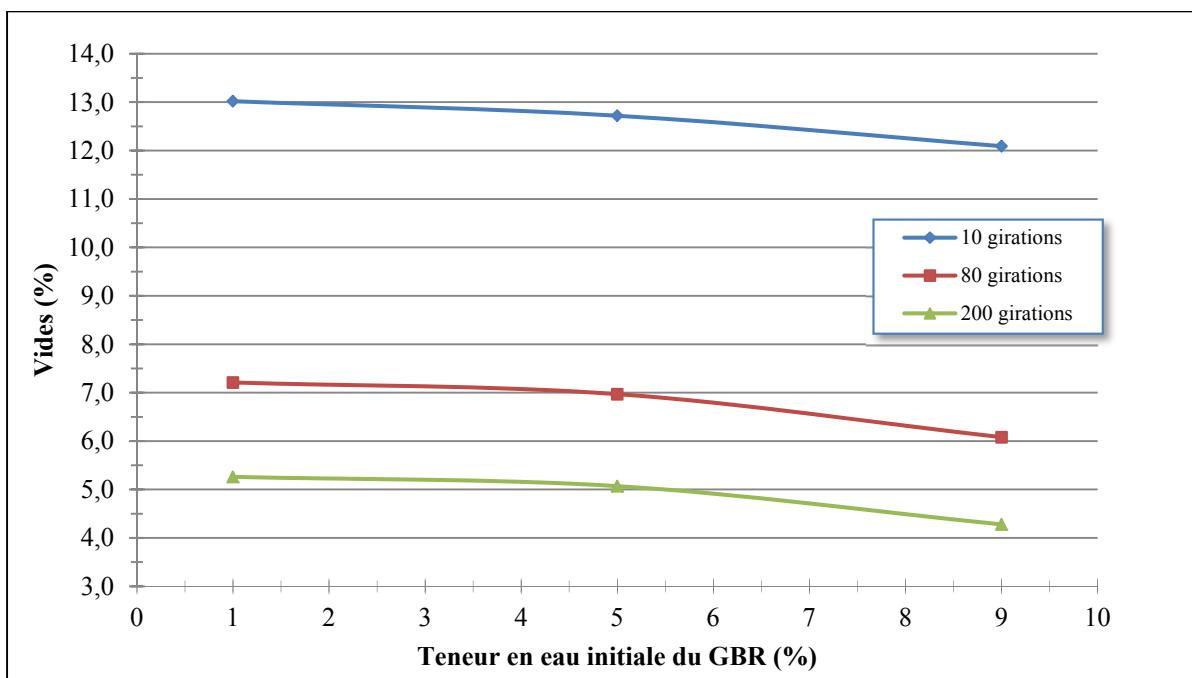


Figure 6.8 Pourcentage de vides selon la teneur en eau initiale du GBR pour les EBE confectionnés avec un bitume PG 64-34

6.3.3 Comparaison entre les EBE avec bitume PG 58-28 et PG 64-34

De façon générale, les pourcentages de vides obtenus pour les enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34 sont légèrement plus élevés que ceux obtenus pour les enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28. La Figure 6.9 illustre cette comparaison, soit la différence des vides moyens entre les enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34 et un bitume PG 58-28. De façon générale, la différence du pourcentage de vides des EBE avec le bitume PG 64-34 par rapport aux EBE avec le bitume PG 58-28 augmente avec le nombre de giration.

Divers facteurs sont à considérer pour évaluer et expliquer la différence des résultats pour les enrobés avec les deux types de bitume. Bien entendu, l'ajout de polymère rend le bitume plus dur, donc plus visqueux qu'un bitume sans polymère pour une même température. En conséquent, le moussage du bitume est réduit ce qui diminue la qualité de l'enrobage.

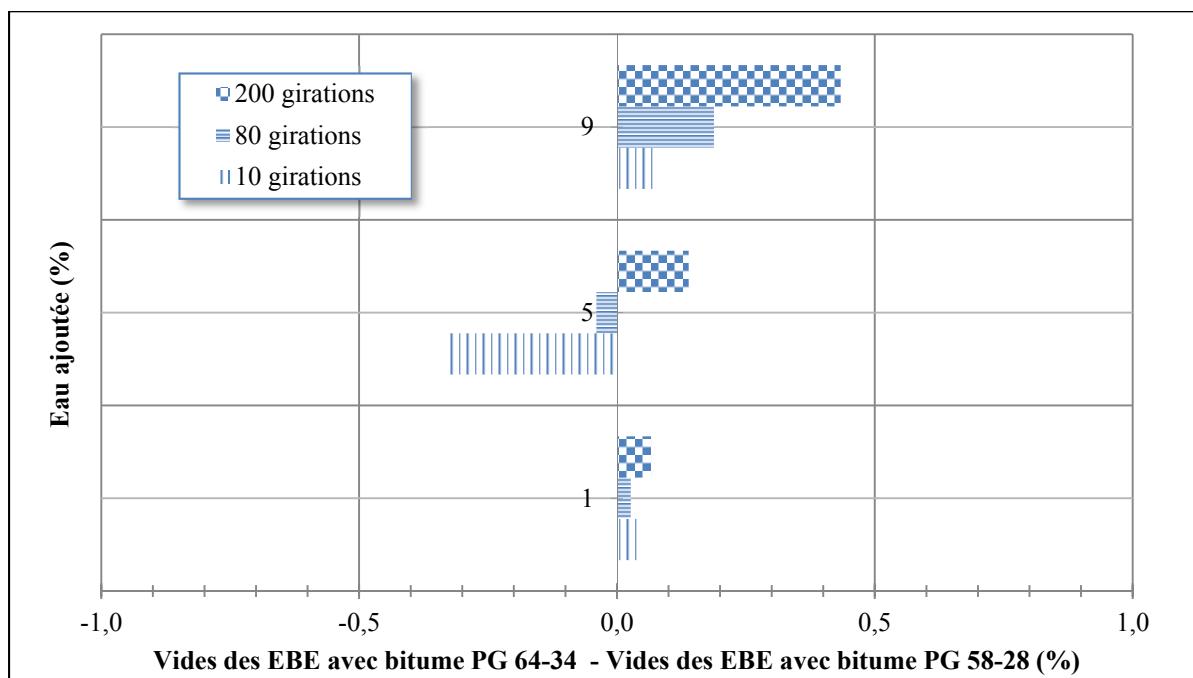


Figure 6.9 Différence du pourcentage de vides moyens des EBE confectionnés avec un bitume PG 58-28 et PG 64-34 selon la teneur en eau initiale du GBR ($T_{\text{compacate}} : 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

D'autre part, l'absorptivité en eau dépend de la grosseur et de la connectivité des vides au sein de l'enrobé. Un bitume plus dur possède une compaction initiale plus faible. Donc, les vides interstitiels sont plus grands. Ceci permet d'absorber initialement plus d'eau, mais permet aussi d'en relâcher une grande quantité plus facilement. Encore une fois, les résultats obtenus indiquent le contraire. En effet, l'eau résiduelle des EBE avec le bitume PG 64-34 est plus élevée qu'avec l'utilisation du bitume PG 58-28. Sachant que l'eau est incompressible, cette eau contenue dans des vides plus grands peut avoir évité d'être compressée durant le compactage. Donc, au lieu d'être évacuée, l'eau semble avoir demeuré à l'intérieur de l'enrobé.

6.3.4 Sommaire

Selon les résultats obtenus, la température semble être le facteur possédant le moins d'influence sur la maniabilité des EBE. Les EBE confectionnés avec un bitume PG 58-28 et ceux confectionnés avec un bitume PG 64-34 contenant 9 % d'eau initiale du GBR présentent des vides semblables à ceux de l'enrobé à chaud à la PCG, et ce, pour des températures de compaction avec des écarts de plus de 53 °C.

D'autre part, les teneurs en eau résiduelle des EBE ont une plus faible influence que le type de bitume. Malgré que la teneur en eau résiduelle avant compactage des EBE confectionnés avec le bitume PG 64-34 est plus élevée, les résultats à la PCG montrent que ces enrobés sont plus difficile à compacter contrairement aux enrobés avec le bitume PG 58-28. Enfin, l'aptitude au compactage des EBE semble principalement influencée par la qualité de l'enrobage des granulats lors du moussage du bitume, laquelle est plus effective aux teneurs en eau élevées, et non par la teneur en eau résiduelle de l'enrobé.

6.4 Résistance à l'orniérage

Comme nous l'avons souligné au chapitre 5, seuls les enrobés LEA1, LEA5 et LEA9 confectionnés avec le bitume PG 58-28 ont été testés à l'orniéreur. De plus, rappelons que les densités brutes des plaques n'ont pas été prises après leur compaction. La teneur en vides des plaques influence l'orniérage initial de l'enrobé. En effet, une sous-compaction de l'enrobé amène une densification plus rapide de l'enrobé ce qui augmente sa déformation. Donc, un pourcentage d'orniérage initiale plus élevé pour un enrobé pourrait simplement être dû à une sous-compaction lors de la fabrication des plaques. En raison de cet aspect, les valeurs moyennes obtenues des deux plaques lors de l'essai à l'orniéreur peuvent être possiblement un meilleur indicateur de la déformation que la valeur obtenue pour une seule plaque. En considérant cet aspect dans l'analyse des données, la Figure 6.10 présente, en échelle logarithmique, l'évolution des déformations selon le nombre de cycles à chaud de la charge.

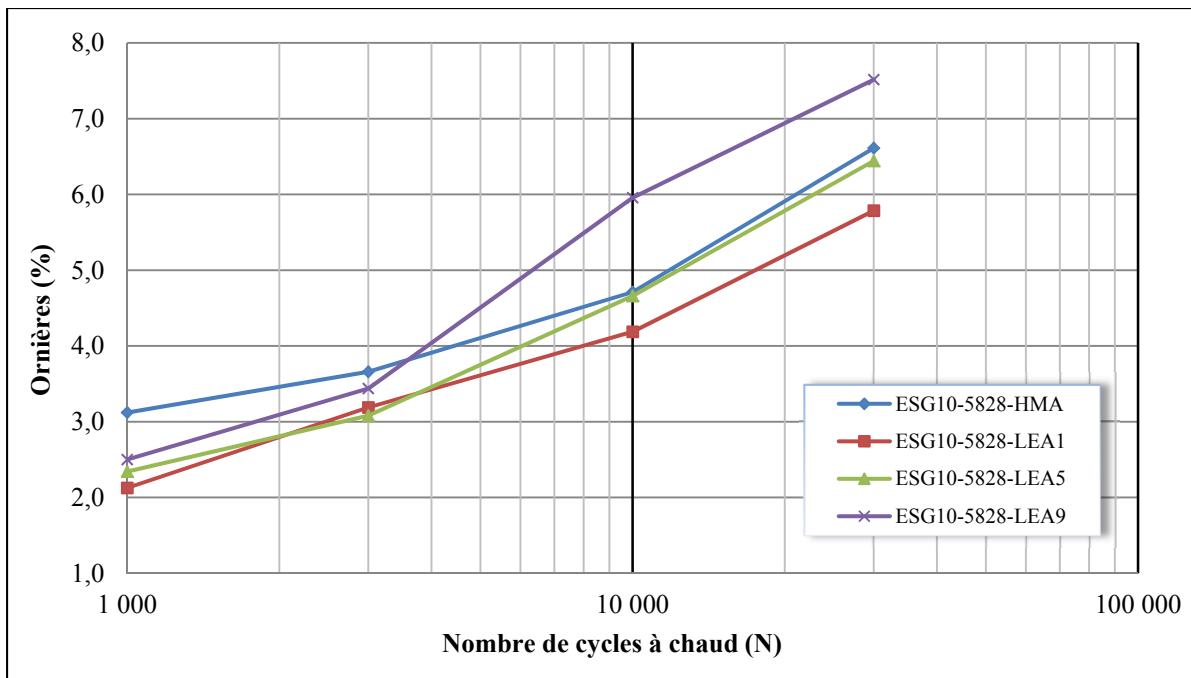


Figure 6.10 Évolution du pourcentage d'ornière moyen des deux plaques selon le nombre de cycles à chaud des EBE avec le bitume PG 58-28

Il est intéressant de constater que de façon générale, les EBE possèdent des déformations à l'orniérage plus petites à petit nombre de cycles et des déformations semblables à grand nombre de cycles comparativement à l'enrobé à chaud. Ceci correspond aux observations de la littérature présentées à la section 2.6.3.

À 1 000 cycles, les EBE possèdent une moyenne de 2,3 % de déformations d'orniérage comparativement à 3,1 % pour l'enrobé à chaud. L'enrobé LEA1, possèdent la moins grande déformation permanente de tous les enrobés avec une différence de 0,8 % de moins de déformations permanente que celle de l'enrobé à chaud à partir de 10 000 cycles. L'enrobé LEA5 permet d'obtenir vers les 10 000 cycles, un orniérage semblables à celui de l'enrobé à chaud. Cela concorde presque parfaitement avec des essais antérieurs de la littérature présentés à la section 2.6.3. Ces essais avaient montré également qu'un enrobé contenant 5 % d'eau initiale d'un GBR présentait des ornières plus petites à un petit nombre de cycles et des déformations très identiques à un enrobé à chaud à partir de 10 000 cycles. Du côté de l'enrobé LEA9, l'orniérage est plus grand, soit 1,1 % de plus. Ces données concordent avec

la littérature où il était mentionné que les EBE possédaient des comportements semblables à l'orniérage avec des écarts de moins de 1,0 % à 30 000 cycles.

En comparant les données plus précisément avec l'essai à la PCG, les enrobés LEA1 et LEA5 obtenaient des vides plus élevés que l'enrobé à chaud. Pour l'enrobé LEA9, il avait un comportement semblable que l'enrobé à chaud. Une maniabilité réduite accroît le pourcentage de vides au sein de l'enrobé. Des vides plus élevés amène généralement un orniérage initial plus élevé. Donc, on aurait pu s'attendre à ce que les enrobés LEA1 et LEA5 obtiennent une plus grande déformation initiale que l'enrobé à chaud et LEA9. Toutefois, c'est le contraire qui se produit. Comme il a été vu précédemment, l'enrobage des granulats est amélioré avec l'augmentation de la teneur en eau initiale. Toutefois, les faibles quantités d'eau résiduelle après malaxage dans les EBE ne semblent pas suffisantes pour atteindre une compaction initiale près de son optimum. C'est plutôt la qualité de l'enrobage des granulats qui semble être le facteur dominant d'après les conclusions de l'analyse des résultats à la PCG : un mauvais enrobage empêche une bonne lubrification des granulats et demande un effort de compactions supplémentaire pour densifier l'enrobé.

Afin d'appuyer spécifiquement cet effet, la Figure 6.11 illustre l'augmentation des déformations permanentes en fonction du pourcentage d'eau initial dans l'enrobé est ajouté. Comme nous l'avons souligné précédemment, la qualité de l'enrobage augmente avec l'augmentation de la teneur en eau initiale ajoutée. Donc, les courbes présentées à la Figure 6.11 montrent que l'orniérage augmente avec l'ajout de la teneur en eau.

D'autre part, il peut être intéressant d'analyser plus précisément le comportement à long terme à l'orniérage des EBE étant donné que ce type d'enrobé est relativement nouveau. Toujours selon la Figure 6.10, on peut remarquer que l'orniérage des EBE se poursuit plus longtemps que l'enrobé à chaud. En effet, l'orniérage initial ($< 1\,000$ cycles) des EBE est relativement semblable, variant de 2,1 % à 2,5 %. Toutefois, au-delà de 2 000 cycles, les résultats d'orniérage varient considérablement en fonction de la teneur en eau initiale. L'évolution des ornières pour l'enrobé à chaud devient plus constante (représenté par une

droite sur le graphique) aux environs des 3 000 cycles. À ce stade, la courbe des EBE présente encore une pente plus prononcée, ce qui signifie que l'EBE continue à orniérer. La pente des droites pour les trois enrobés à basse température devient une droite vers les 10 000 cycles.

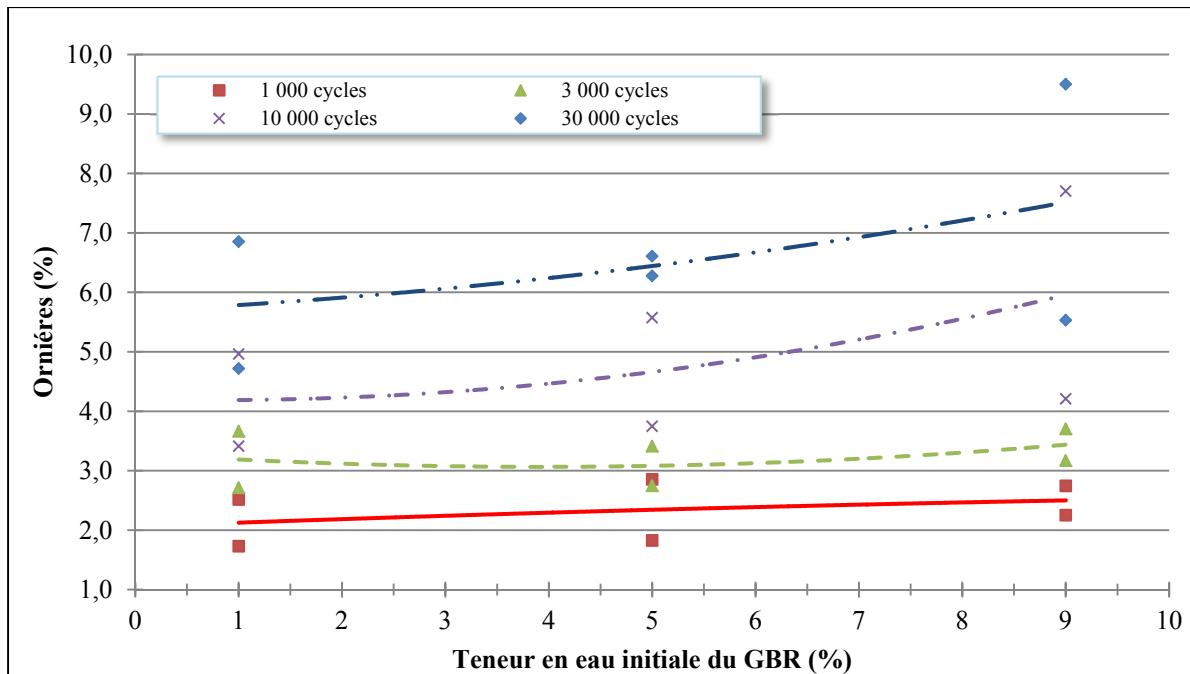


Figure 6.11 Évolution de l'orniérage des EBE avec le bitume PG 58-28 selon la teneur en eau initiale ajoutée

D'autre part, si une analyse plus précise est effectuée, les trois EBE ont un accroissement de déformations moins élevé que l'enrobé à chaud à partir de 10 000 cycles. Le Tableau 6.2 présente les déformations permanentes mesurées entre 1 000 et 10 000 cycles et les déformations permanentes mesurées entre 10 000 et 30 000 cycles pour les enrobés testés.

Les résultats du Tableau 6.2, montrent que l'enrobé à chaud possède le plus petit taux d'accroissement de déformations permanentes entre 1 000 à 10 000 cycles avec 1,6 % que tous les EBE. Par la suite, son taux augmente à 2,1 %. Du côté des EBE, les déformations permanentes sont beaucoup plus grandes entre 1 000 et 10 000 cycles que par la suite, où elles se stabilisent. Tel que vu précédemment, la déformation des EBE se stabilise à plus long

terme que les enrobés à chaud et un taux de déformations permanentes plus petit est ensuite constaté.

Tableau 6.2 Pourcentage d'écart des déformations de la moyenne des plaques de l'enrobé HMA est des EBE avec le bitume PG 58-28 entre différents nombres de cycles

Type de mélange	HMA	LEA 1 %	LEA 5 %	LEA 9 %
Déformations entre 1 000 et 10 000 cycles (%)	1,6	2,1	2,3	3,5
Déformations entre 10 000 et 30 000 cycles (%)	1,9	1,6	1,8	1,8

Finalement, selon les résultats obtenus dans le cadre de ce programme de recherche, l'utilisation des EBE donne des résultats similaires à l'orniérage en comparaison avec un enrobé à chaud. Par contre, l'évolution de l'orniérage est distincte pour les EBE. Il est possible de conclure que pour les enrobés testés, la variation de teneur en eau initiale ajoutée de 1 à 9% n'a pas une influence considérable sur les résultats à l'orniérage.

6.5 Module complexe

Le dernier essai réalité de notre programme expérimental est l'essai de module complexe. Cet essai permet de vérifier le comportement rhéologique des différents enrobés confectionnés lors des expérimentations sous petites sollicitations. Pour chaque type de bitume, quatre enrobés ont été testés, soit l'enrobé à chaud et les EBE confectionnés avec des teneurs en eau initiale du GBR de 1, 5 et 9 %.

6.5.1 Enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28

La Figure 6.12 présente les résultats obtenus pour les quatre enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28. Les résultats montrent que l'enrobé à chaud présente un comportement semblable à celui de l'enrobé EBE contenant 1 % d'eau. Pour les deux autres EBE, les

valeurs évoluent distinctement de celles de l'enrobé à chaud lorsque la teneur en eau augmente. Ceci ne concorde pas avec ce qui est reporté dans la littérature où l'EBE était supérieur pour la partie visqueuse (E_2) seulement.

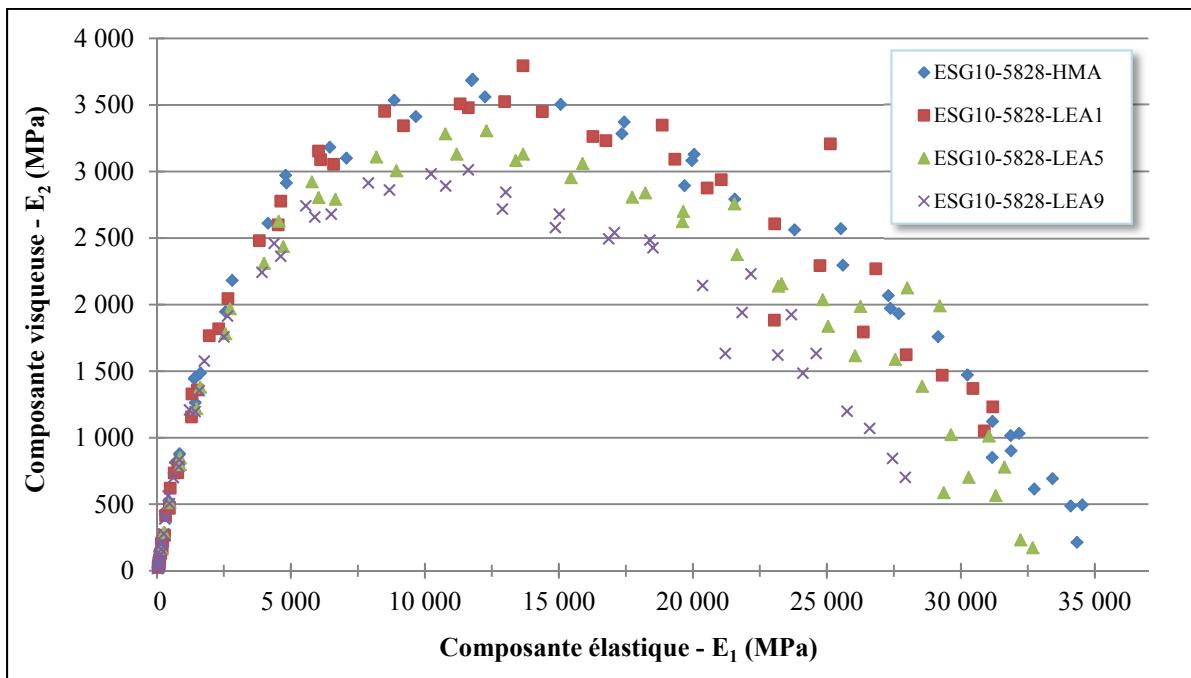


Figure 6.12 Résultats dans le plan Cole-Cole des modules complexes des enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28

La différence des valeurs s'effectue en abscisse (E_1) et en ordonnées (E_2). Cela signifie que l'augmentation de la teneur en eau résiduelle modifie l'élasticité de l'enrobé (E_1) ainsi que sa composante visqueuse (E_2). Donc, la quantité d'eau résiduelle contenue dans l'enrobé semble avoir une petite influence sur le module complexe de l'enrobé. La norme du module complexe ($|E^*|$) étant plus petite pour les EBE que pour l'enrobé à chaud, l'augmentation de l'humidité dans l'enrobé semble donner un enrobé plus mou. Cependant, le plan Cole-Cole ne représente qu'une plage minime de valeurs expérimentales, soit pour des fréquences variantes de 0.01 Hz à 20 Hz.

Il est intéressant également d'illustrer les résultats du module complexe selon les courbes maîtresses. Ces courbes permettent de présenter le comportement de l'enrobé selon une très

grande plage de fréquences. En considérant le principe d'équivalence temps-température, la courbe maîtresse de l'enrobé à chaud ainsi que celles des trois EBE ont été tracées à la température de référence choisie de 10 °C. La Figure 6.13 illustre ces courbes maîtresses pour les enrobés confectionnés avec un bitume PG 58-28.

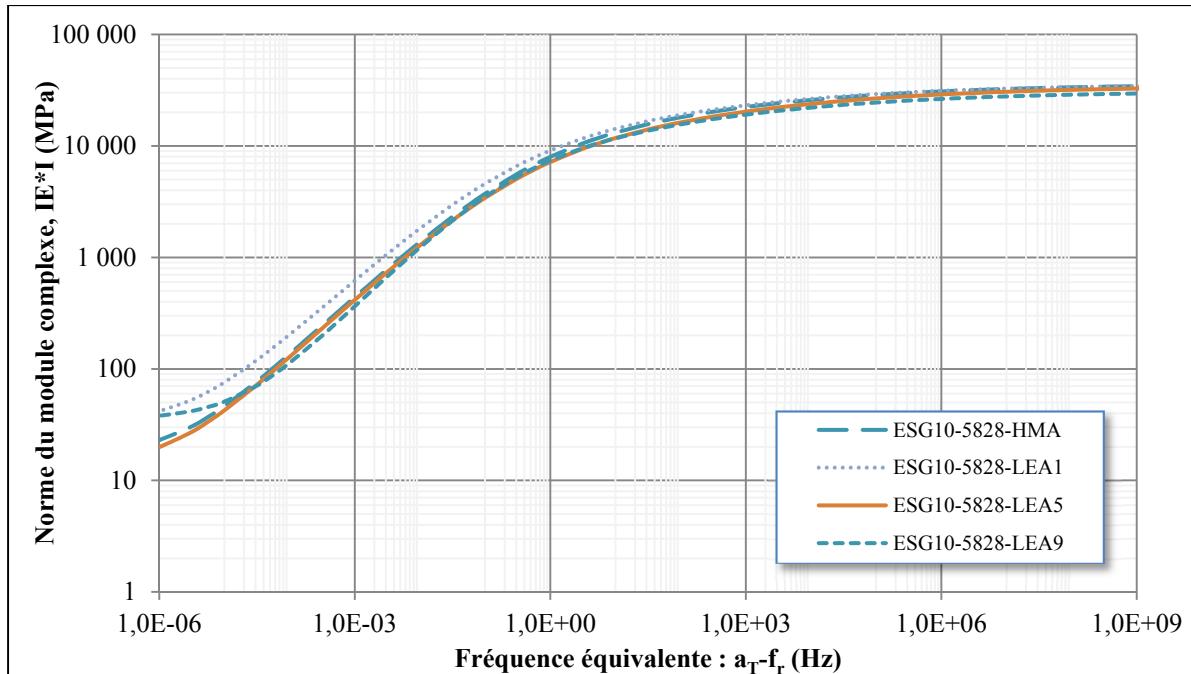


Figure 6.13 Courbes maîtresses à 10 °C des enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28

Les courbes maîtresses montrent qu'il n'y a pas de grandes différences entre la courbure de l'enrobé à chaud et celles des trois EBE à très hautes fréquences (basses températures), mais que des écarts sont nettement plus significatifs en basses fréquences (hautes températures). Dans l'ensemble, les courbes sont semblables et la variation de la teneur en eau résiduelle dans l'enrobé semble, à priori, avoir un impact mineur pour les EBE confectionnés avec le bitume PG 58-28. Toutefois, il n'est pas évident de quantifier adéquatement les résultats. Afin de mieux évaluer l'écart entre les différents résultats des modules obtenus, Delaporte *et al.* (2007) ont présenté leurs résultats selon un ratio entre les différents enrobés. Ce ratio est appelé le coefficient de la norme du module complexe ($|C^*|$). Le ratio représente le rapport entre la norme du module complexe d'un EBE ($|E^*_{EBE}|$) et la norme du module complexe de

l'enrobé à chaud de référence ($|E_{REF}^*|$) pour une même fréquence et une même fréquence équivalente (f_e) déterminée par le PETT. Dans le cas présent, ce ratio est calculé selon l'équation suivante :

$$|C_E^*| = \frac{|E_{EBE}^*|}{|E_{HMA}^*|} \quad (6.1)$$

Nous avons calculé l'évolution de $|C_E^*|$ pour les essais réalisés. Il permet de représenter l'évolution des écarts entre la norme des modules complexes en fonction de la fréquence équivalente tel qu'illustrée à la Figure 6.14. Soulignons qu'une valeur unitaire de $|C_E^*|$ signifie que la raideur de l'EBE est la même que celle de l'enrobé à chaud à la fréquence considérée.

Les résultats de la Figure 6.14 montrent que les normes du module complexe des trois enrobés EBE deviennent très semblable à celle de l'enrobé à chaud pour des valeurs de fréquence supérieure à 1,0 Hz (basses températures). En dessous de cette valeur, l'EBE contenant 1 % d'eau est, semble-t-il, plus raide que l'enrobé à chaud : la Figure 6.14 montrent des valeurs supérieures à celles de l'enrobé à chaud de 20 % vers 1,0 Hz et se stabilisant à une valeur limite d'environ 90 % supérieure en très basse fréquence (hautes températures). Cela signifie que la raideur de cet enrobé est presque deux fois plus important à basse fréquence que celle de l'enrobé à chaud ($< 1*10^{-8}$ Hz). Les résultats de l'enrobé s'apparentent le plus à l'enrobé à chaud avec des variations de -5 % à -20 %.

Les résultats obtenus pour les EBE confectionnés avec un bitume PG 58-28 concordent avec les informations retrouvées dans la littérature. En effet, tel que vu à la section 2.6.4, les EBE obtiennent généralement des résultats semblables à hautes fréquences et un écart plus grand aux basses fréquences.

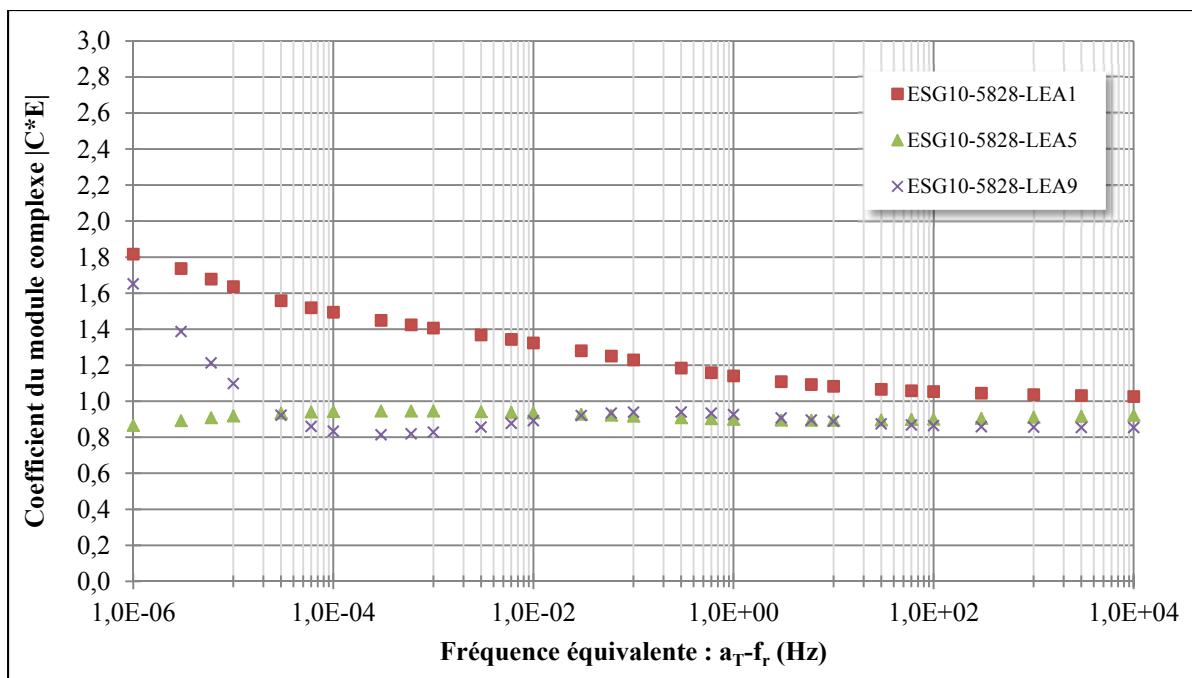


Figure 6.14 Évolution des écarts des coefficients de la norme du module complexe pour les enrobés EBE confectionnés avec le bitume PG 58-28 ($T_{\text{réf}} : 10^{\circ}\text{C}$)

6.5.2 Enrobés confectionnés avec un bitume PG 64-34

Du côté des enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34, les résultats obtenus et illustrés à la Figure 6.15, montrent des similarités de comportement à ceux observés pour les enrobés contenant le bitume pur.

La confection des enrobés avec augmentation de l'eau résiduelle après compactage diminue les valeurs élastiques et visqueuses du module complexe. De plus, les valeurs obtenues avec ce bitume sont plus petites que celles obtenues le bitume PG 58-28. En effet, les valeurs en abscisse et en ordonnées sont inférieures d'environ 300 MPa.

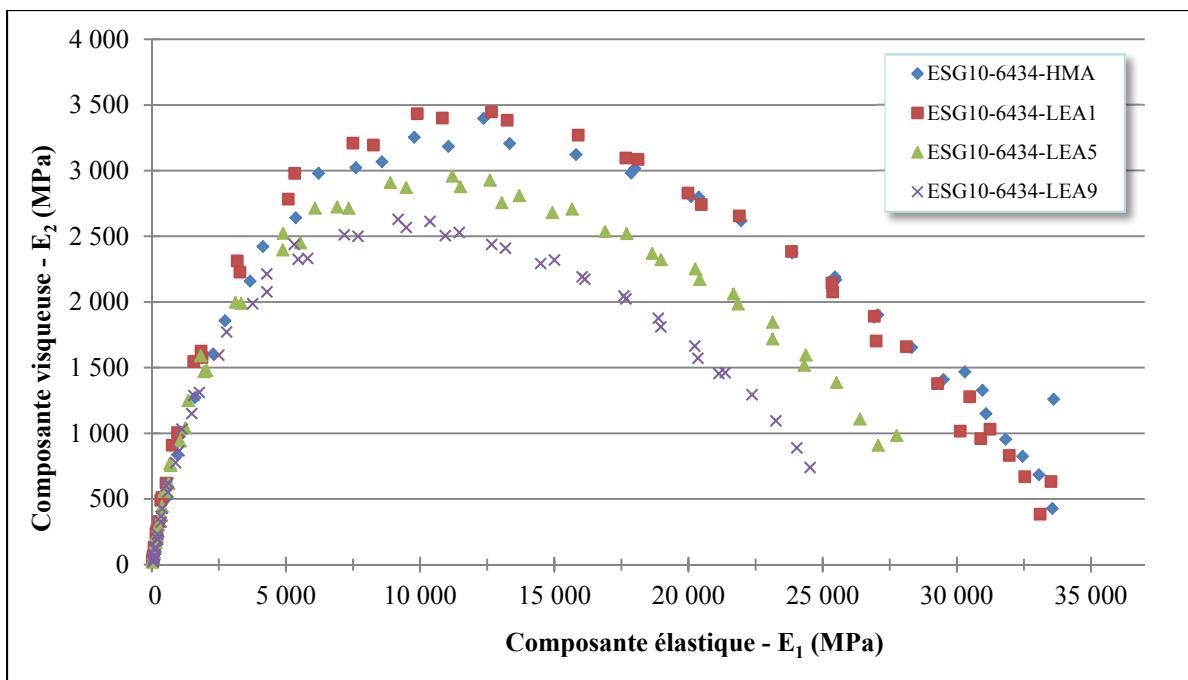


Figure 6.15 Résultats dans le plan Cole-Cole des modules complexes des enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34

D'autre part, les courbes maîtresses pour les quatre enrobés avec le bitume PG 64-34 ont été tracées selon une température de référence de 10 °C. La Figure 6.16 présente ces courbes. Avec ce type de bitume, une différence légèrement plus grande est remarquée entre la rhéologie de l'enrobé à chaud et celle de l'EBE contenant 1 % d'eau initiale. Pour des fréquences équivalentes inférieures à 1,0 Hertz, la courbe de l'EBE à 1 % d'eau se situe nettement en dessous de celles des autres enrobés. En ce qui concerne les EBE à 5 et 9 % d'eau, les courbes sont relativement rapprochées et donnent des valeurs de modules semblables dans l'ensemble.

Comme il a été présenté à la section 6.5.1, un graphique représentant les coefficients du module complexe a été tracé afin de mieux cibler l'influence de la teneur en eau initiale des différents enrobés (Figure 6.17). Comme pour les premiers enrobés EBE, les valeurs des $|C_E^*|$ convergent vers un ratio de 1,0 au-delà de 1,0 Hz.

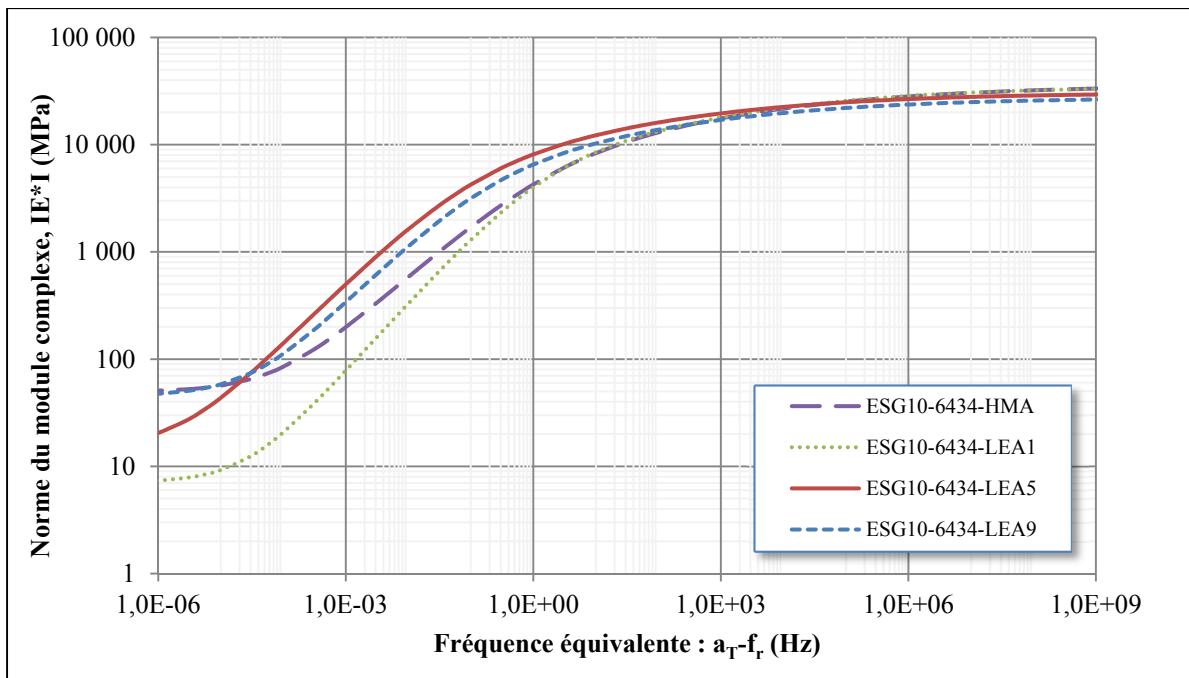


Figure 6.16 Courbes maîtresses à 10 °C des enrobés confectionnés avec le bitume PG 64-34

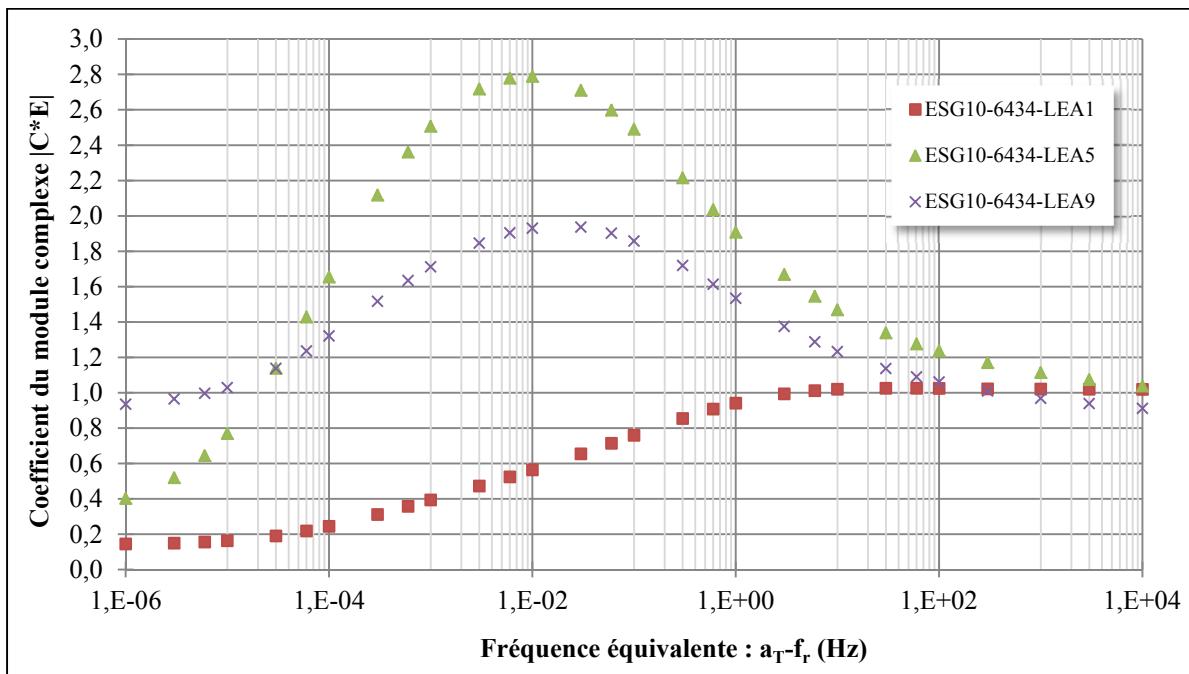


Figure 6.17 Évolution des écarts des coefficients de la norme du module complexe pour les enrobés EBE confectionnés avec un bitume PG 64-34 ($T_{réf}$: 10 °C)

Contrairement aux enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28, l'enrobé à LEA1 d'eau confectionné avec un bitume PG 64-34 possède des ratios de -80 % à 0 %. De plus, l'enrobé LEA5 possède la plus grande différence avec des valeurs jusqu'à 280 % supérieures à l'enrobé à chaud vers une fréquence de 0,01 Hz. L'enrobé LEA9, variant entre les deux autres EBE, atteint également un sommet aux environs de 0,01 Hz avec un écart de 195 % supérieur à l'enrobé à chaud.

6.5.3 Comparaison entre les modules vitreux (E_0)

Afin de mieux visualiser l'effet de la teneur en eau initiale du GBR des enrobés sur les hautes et basses fréquences, la relation entre le module vitreux (E_0) et la teneur en eau est présentée à la Figure 6.18 pour les enrobés confectionnés avec les deux types de bitume. La teneur en eau de 0 % représente l'enrobé à chaud. L'analyse avec le module vitreux permet de visualiser le comportement des enrobés à basse température.

On constate que le module vitreux diminue avec la teneur en eau initiale du GBR de façon relativement linéaire. Également, les résultats montrent que l'écart entre les deux types de bitume s'accentue avec l'augmentation de la teneur en eau. Les enrobés confectionnés avec un bitume polymère PG 64-34 a un taux de diminution de module vitreux (pente) plus grand que celui calculé pour les enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28.

Par ailleurs, la Figure de droite représente l'évolution de la norme du module complexe ($|E^*|$) à une fréquence de 0,003 Hz ($T_{ref} = 10^\circ\text{C}$) suivant la teneur en eau initiale du GBR. Notons que la basse fréquence de 0,003 Hz permet de représenter les hautes températures. On constate que les résultats sont plus variables. Les résultats montrent que, d'une part, la teneur en eau initiale du GBR est nettement plus significative pour les EBE confectionnés avec le bitume PG 64-34 et, d'autre part, que les tendances sont inverses. Compte tenu du nombre restreint d'essai, on peut, a priori, admettre que l'effet de la teneur en eau est peu significatif pour les EBE confectionnés avec le bitume PG 58-28. Des essais complémentaires permettraient de valider ces tendances.

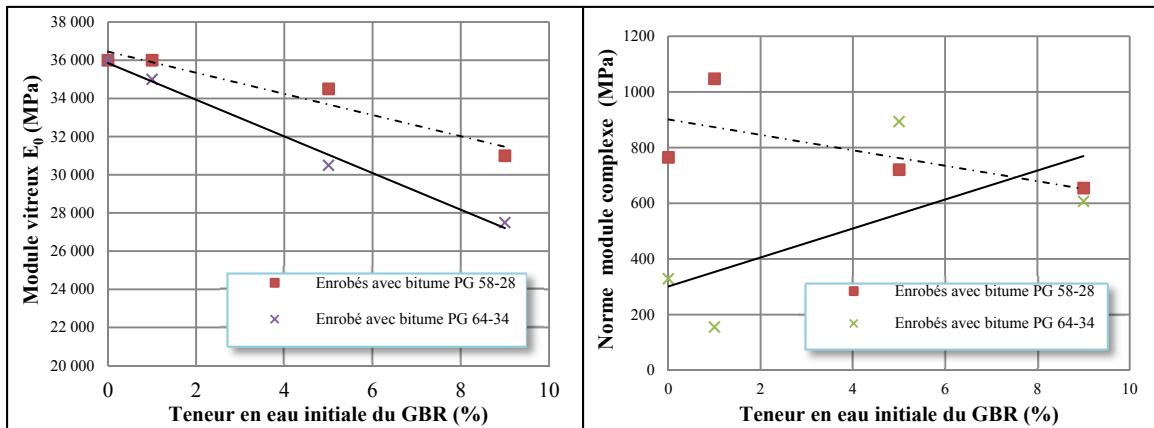


Figure 6.18 Effet de la teneur en eau et du type de bitume sur le module vitreux (basses températures) et sur la norme du module complexe à 10°C et 0,003 Hz (hautes températures) des différents enrobés confectionnés

6.5.4 Sommaire

En résumé, et selon les différentes représentations des modules complexes, les variations des EBE comparativement aux enrobés à chaud sont plus significatives en basse fréquence, soit en dessous de 1,0 Hz. Au-delà de cette valeur, les modules sont très semblables pour tous les enrobés. Le changement de bitume donne des résultats tout à fait contraires pour les enrobés LEA1 et LEA5. Pour leurs parts, les enrobés LEA9, selon les deux types de bitume, varient entre les deux autres EBE. Encore une fois, le type de bitume possède une plus grande influence que la teneur en eau résiduelle des EBE.

CONCLUSION

L'objectif principal du programme expérimental était d'évaluer l'influence de la teneur en eau des enrobés à basse énergie sur leurs comportements thermomécaniques. Également, il était intéressant d'identifier si les enrobés à basse énergie (EBE) avait un comportement similaire aux enrobés à chaud. De plus, une teneur en eau optimale contenue dans les granulats était recherchée afin de produire un comportement le plus semblable possible aux enrobés à chaud. Pour ce faire, un enrobé largement employé au Québec, l'enrobé ESG-10 a été choisi dans le cadre du présent programme expérimental. De plus, l'ajout de 15 % de granulats bitumineux recyclés (GBR) a été considéré pour représenter une pratique de plus en plus courante de recyclage appliquée au Québec. Des GBR avec des teneurs initiales en eau variables (de 1 à 9 %) ont été considérés dans le programme expérimental. Les quantités d'eau correspondante sont ajoutées durant le malaxage en même temps que le GBR préalablement séché à l'étuve à 105 °C et, par la suite, refroidi à la température ambiante. Les différentes teneurs en eau ont été utilisées afin d'être représentative de la variation d'humidité des réserves extérieures de GBR exposées aux intempéries.

Pour chacun des enrobés fabriqués, les données sur la variation de la température de l'enrobé ont été recueillies. Également, des données ont été prises sur les teneurs en eau des enrobés durant le malaxage, la cure et le compactage pour l'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG). Une évaluation visuelle de la qualité de l'enrobage de chacun des enrobés après malaxage a été effectuée. Par la suite, pour vérifier le comportement des enrobés à chaud et EBE, deux principaux essais thermomécaniques ont été effectués, soient l'orniéreur ainsi que la mesure du module complexe.

Les résultats ont montré que la température après malaxage des EBE diminue avec l'augmentation de la teneur en eau initiale. L'énergie thermique fournie est suffisante pour faire évaporer toute l'eau de tous les EBE ce qui n'est pas le cas. La grande majorité de l'eau est évaporée lors du malaxage et la teneur en eau résiduelle après malaxage se situe aux environs de 0,13 % par rapport à la masse totale de l'enrobé et ce, indépendamment de la

teneur en eau initiale ajoutée. Par la suite, le compactage a fait diminuer la teneur en eau résiduelle des EBE de seulement 0,01 %. De plus, il a été observé qu'une plus grande teneur en eau initiale procure un meilleur enrobage des granulats par un moussage de bitume plus effectif lors du malaxage. L'enrobé avec une teneur en eau de 1 % avait des granulats peu ou non enrobé par le bitume contrairement à l'enrobé avec une teneur en eau de 9 % qui avait un enrobage complet des granulats par le bitume.

Pour ce qui est des résultats des essais à la PCG, il ont montré que les résultats des EBE contenant 1 % à 7 % d'eau initiale du GBR sont plus difficiles à compacter ce qui donne des pourcentages de vides plus élevés. Les enrobés confectionnés avec 9 % d'eau initiale du GBR présentent les vides à la PCG les plus similaires à ceux des enrobés à chaud. Ces résultats sont observés pour les deux types de bitume. De plus, le bitume PG 64-34 est légèrement moins maniable en raison de sa plus grande viscosité à haute température. Rappelons que les essais à la PCG ont tous été effectués à 95 °C. L'eau résiduelle après malaxage et cure a une plus grande influence sur la maniabilité de l'enrobé que la température des matériaux. Également, le type de bitume présente une influence plus marquée que l'eau résiduelle sur l'aptitude au compactage (PCG) des EBE. Enfin, c'est la qualité de la mousse de bitume permettant de bien enrober les granulats qui offre la plus grande influence sur la maniabilité des enrobés et ce, indépendamment des autres facteurs.

Du côté de l'orniére, seul les enrobés confectionnés avec le bitume PG 58-28 a été testé. Les résultats montrent que les EBE offrent des plus petites déformations permanentes que l'enrobé à peu de cycles. Par la suite, l'orniérage augmente plus rapidement entre 3 000 et 10 000 cycles pour les EBE que pour les enrobés à chaud. De plus, selon les résultats, le début des ornières de post-compaction est indépendant de la teneur en eau du granulat. En effet, cette valeur a été la même pour tous les enrobés, soit aux environs de 10 000 cycles. Pour cet essai, l'EBE confectionné avec une teneur en eau de 5 % du GBR était celui dont les résultats correspondaient le plus à ceux de l'enrobé à chaud. Dans l'ensemble, le comportement à l'orniérage des EBE est similaires à celui des enrobés à chaud avec des différences de $\pm 1,0\%$.

Enfin, l'essai de module complexe a été réalisé afin de conclure le présent programme expérimental. Les résultats ont montré, pour les deux types de bitumes, que les valeurs de module diminuent avec l'augmentation des pourcentages d'eau ajoutés au GBR. La partie visqueuse et élastique plus petite signifie que l'enrobé est plus mou pour une même température et fréquence donnée. Pour les deux bitumes, c'est l'EBE contenant 1 % d'eau qui possède un comportement très similaire à l'enrobé à chaud. De plus, une différence plus accrue est notable entre les modules des EBE et à chaud avec des basses fréquences, soit en dessous de 1,0 Hz.

En résumé, la teneur en eau résiduelle n'est pas le facteur prédominant agissant sur le comportement des EBE. C'est la quantité d'eau initiale ajoutée lors du malaxage qui semble influencer la qualité de la mousse de bitume produite et ainsi, la qualité de l'enrobage. De plus, les EBE obtiennent généralement des caractéristiques et des comportements similaires aux enrobés à chaud. Chacun des trois types d'essais a montré une teneur en eau différente, soit de 1 %, 5 % et 9 % afin d'obtenir un comportement semblable à l'enrobé à chaud. En observant la qualité de l'enrobage, les teneurs en eau initiale de 7 et 9 % par rapport à la masse du GBR offrent le meilleur enrobage des granulats par le bitume. Par conséquent, des valeurs de 7 à 9 % d'eau initiale du GBR peut donner aux enrobés à basse énergie les caractéristiques se rapprochant le plus d'un enrobé à chaud standard.

ANNEXE I

NOTIONS COMPLÉMENTAIRES SUR LES GRANULATS

Les granulats, formant la plus grande portion de l'enrobé, procurent les principales caractéristiques au mélange. Il est donc important de survoler quelques notions de base.

Il existe différentes sources de granulat. Ils peuvent se retrouver à l'état naturel dans les carrières, gravières et sablières. Il existe également une seconde catégorie de granulats, appelée granulats artificiels.

Granulats naturels

Tout d'abord, les granulats provenant des carrières sont dynamités et concassés afin d'obtenir les dimensions désirées. Cette méthode procure des granulats possédant des faces très angulaires, c'est-à-dire des faces ne présentant aucune arrondie. Cette caractéristique permet d'obtenir des angles de frottement interne dans le matériau élevé. Cela signifie que les particules ne glissent pas facilement une contre l'autre, donc elle résiste de meilleure façon aux charges. De plus, les granulats concassés en carrière présentent généralement des faces rugueuses. Donc, le liant dans les enrobés possède une meilleure qualité d'adhérence à la surface des particules (Aïtcin *et al.* 1992).

Les granulats provenant des gravières et des sablières sont des matériaux ne nécessitant pas de dynamitage. Ces matériaux ont été laissés en place par l'eau et le vent. Au Québec, les dépôts fluvioglaciaires (dépôts provenant des cours d'eau causés par la fonte des glaciers) sont principalement ceux retrouvés. La dégradation au fil du temps de ces granulats leur donne des formes arrondies possédant des surfaces lisses (Aïtcin *et al.* 1992). Contrairement aux granulats fabriqués en carrières, elles possèdent un plus faible frottement interne et une moins bonne adhérence.

Enfin, il est important de noter que certains granulats sont réactifs avec certains produits (bitume, ciment, etc.). La stabilité d'un granulat est fonction de ses caractéristiques physico-chimiques et de l'environnement dans lequel il évolue (Aïtcin *et al.* 1992). Par exemple, un bitume ne peut avoir aucune adhérence sur certains granulats en raison des caractéristiques de ce granulat ce qui amène une qualité d'enrobage et des caractéristiques non souhaitées pouvant apporter la ruine de l'ouvrage.

Granulats artificiels

Les granulats artificiels de bonne qualité pouvant être utilisés sont généralement utilisés au Québec. Ces granulats sont fabriqués pour des besoins spécifiques tels les granulats pour béton léger (Aïtcin *et al.* 1992). Toutefois, les granulats bitumineux recyclés faisant partie des granulats artificiels sont très utilisés dans le retraitement des chaussées. De plus, les résidus miniers sont également en croissance d'utilisation.

Caractéristiques complémentaires des granulats

En plus des critères de caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats, les caractéristiques complémentaires peuvent avoir un impact important sur le comportement et la performance de l'enrobé même s'ils ne sont pas des critères obligatoires à respecter.

Les caractéristiques complémentaires sont la propreté, le coefficient de polissage et d'écoulement ainsi que la teneur en mottes d'argiles. Lorsqu'il est question de la propreté des granulats, le terme « matières délétères » est souvent employé. Ce dernier signifie qu'il a présence de matières nuisibles dans le granulat comme des matières organiques, argileuses ou minérales (Aïtcin *et al.* 1992). La présence de ces matières sur la surface du granulat est nuisible pour l'adhésion adéquate du liant sur les particules. Donc, ceci apporte un décollement des particules dans l'enrobé à court terme.

ANNEXE II

NOTIONS COMPLÉMENTAIRES SUR LES MÉLANGES GRANULAIRES

Deux autres notions concernant la granulométrie jouent un rôle significatif dans les performances du matériau, soient les types et les classes granulométriques. Tout d'abord, le type représente la variété de grosseurs des particules. Une granulométrie ayant des grosseurs de particules de mêmes dimensions est appelée uniforme. Ce type de granulométrie est représenté par la courbe *a* sur la Figure 1.2 du chapitre 1. D'autre part, la courbe *b* sur la même Figure représente une granulométrie appelée étalée. Ce type présente une plus grande variété de dimensions de particules. Également, lorsqu'une courbe présente un plateau, soit une ligne horizontale, cela signifie qu'il n'y a pas de particules d'une grosseur donnée tel qu'illustré par la courbe *a* entre les tamis 5 mm et 10 mm. Il est question ici de granulométrie discontinue.

Pour sa part, les classes granulométriques désignent des ensembles de granulats de différentes grosseurs. Il existe plusieurs sous-classes de granulométrie, mais les classes principales sont les graviers, les sables et les argiles. Leur classification dépend des proportions des grosseurs de particules selon différents tamis.

Influence de la granulométrie sur la compacité du matériau

La granulométrie d'un matériau granulaire a un rôle direct sur sa compacité, sa perméabilité, sa capillarité et son comportement au gel (Aïtcin *et al.* 1992). La compacité d'un matériau granulaire s'effectue généralement par l'orientation du squelette granulaire d'une manière à obtenir des frictions suffisantes entre les particules. Toutefois, elle peut également provenir des épaufures des granulats ou de l'élimination d'une quantité d'eau contenue dans le granulat.

Un matériau plus compacté possède plus de contacts entre les grains, soit un volume des vides intergranulaires (VAM) faible. Ceci permet au matériau d'être plus résistant, car les nombreuses forces de friction entre les particules résistent à l'application d'une charge. Une sollicitation supérieure à la somme des forces causées par la friction entre les grains engendre une restructuration du matériau pouvant résister à la charge imposée.

Pour obtenir le plus de contact possible, la granulométrie d'un matériau doit donc posséder une porosité la plus basse possible, soit un faible pourcentage de vides. C'est avec l'optimisation de la granulométrie qu'il possible d'obtenir une compacité optimale. De façon générale, des granulats de tailles semblables, soit une granulométrie uniforme, possèdent un arrangement procurant une plus grande porosité qu'un granulat possédant une plus grande gamme de dimension de particules, soit une granulométrie étalée. Ce principe s'illustre par la Figure-A II-1. Les particules de plus petites dimensions peuvent s'introduire dans les vides causés par les grosses particules.

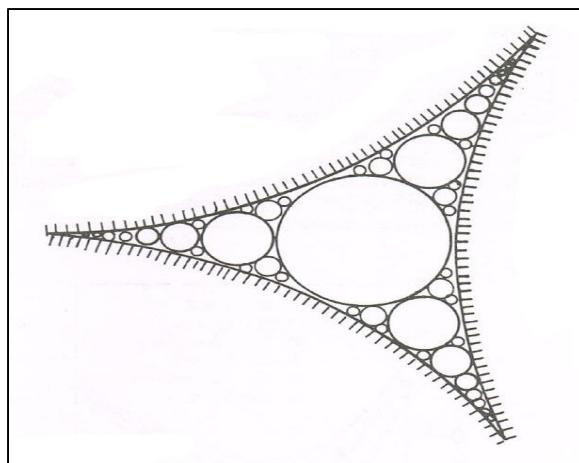


Figure-A II-1 Représentation de sphère dans l'espace
Tirée de Aïtcin *et al.* (1992, p. 73)

Également, la Figure-A II-2 illustre qu'un granulat 10-40 mm (particules de 10 à 40 mm) possède une porosité plus petite qu'un granulat 5-10 mm en raison des dimensions de particules plus variées. De plus, la combinaison de différents mélanges granulaires permet

d'optimiser la diminution de la porosité d'un mélange. Toujours selon Figure-A II-2, l'ajout de sable dans un mélange permet de diminuer la porosité du mélange. Il est important de bien noter qu'au-delà de 40 % d'ajout en sable, les vides augmentent. Il est à noter que le granite concassé possède moins de vide que le gravier naturel, ce qui concorde avec les énoncés faits plus tôt. Tel que discuté, les graviers concassés sont plus angulaires et leurs faces sont plus rugueuses ce qui augmente le frottement entre ceux-ci, augmentant ainsi le pourcentage de vide.

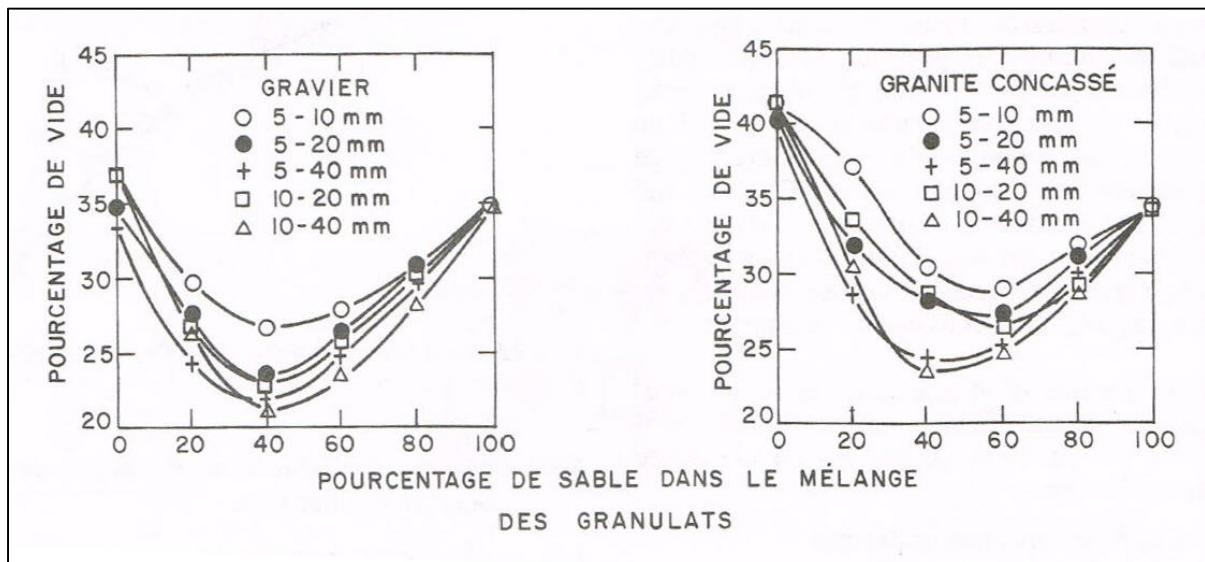


Figure-A II-2 Effet d'une combinaison granulaire sur la porosité
Tirée de Aïtcin (1992, p. 74)

Donc, l'obtention d'une faible porosité s'effectue par optimiser les pourcentages de chaque matériau granulaire pour obtenir un mélange ayant le moins de vides possibles. Il existe différentes méthodes afin d'optimiser les combinaisons granulaires en fixant chaque pourcentage des différentes classes granulaires. Une méthode sera décrite aux prochaines sections.

Facteurs additionnels influençant la compacité

D'autres facteurs influents sur la compacité d'un matériau, à part la granulométrie qui est le principal facteur, la texture de surfaces des granulats ainsi que leur forme agissent également sur la capacité d'un matériau à se compacter.

Tel qu'il a été vu à la section sur les caractéristiques de fabrication des granulats, des surfaces rugueuses augmentent la friction aux points de contact entre les grains. Un mélange avec des granulats concassés peut posséder des VAM plus élevés, comparativement à des particules arrondies. Les surfaces arrondies permettent difficilement aux grains de se bloquer un contre l'autre ce qui peut amener une restructuration granulaire continue. D'autre part, des particules de formes plates et allongées s'orientent plus facilement qu'une particule de forme plus cubique. Les particules plates ont tendance à s'orienter à l'horizontale diminuant ainsi le VAM du mélange (Langlois, 2005).

Il est important de souligner un dernier facteur dans la compacité d'un matériau. Il s'agit de la teneur en eau du matériau, soit l'humidité contenue dans les granulats. En effet, il est démontré dans la mécanique des sols que la teneur en eau d'un matériau exerce un rôle de premier plan dans la compacité d'un sol (Aïtcin *et al.* 1992). Encore une fois, l'eau agit sur les points de contact des grains. Une augmentation en eau permet de lubrifier les granulats en leur procurant une fine pellicule d'eau sur leur surface ce qui diminue la friction entre les grains. Ainsi, la restructuration des grains est facilitée sous l'influence d'une sollicitation ce qui diminue le VAM.

Toutefois, une trop grande quantité d'eau peut obtenir l'effet contraire comme dans le cas de la trop grande quantité d'ajouts en sable de la Figure-A II-2. En effet, une grande teneur en eau dans le matériau absorbe une importante quantité d'énergie produite lors d'application de charge. L'eau emmagasine l'énergie sous forme de pression hydrostatique sous sollicitation ce qui empêche les grains d'adopter une structure plus dense et diminuer le VAM. Cette énergie est dissipée après l'application de la charge (Robitaille et Tremblay, 1997). Donc, un

trop grand apport en eau diminue la compacité du matériau. Il est donc nécessaire d'obtenir l'optimum, appelé Proctor qui est le nom de l'essai permettant de déterminer cette valeur. La norme NQ 22501-255 décrit l'essai de Proctor Modifié.

Courbe de masse volumique maximale (CMVM)

Plusieurs études ont été menées afin d'optimiser la granulométrie de mélange granulaire afin d'obtenir la plus petite porosité possible. Une des principales méthodes utilisées au Québec est le tamis à la puissance 0,45. Cette approche a l'œuvre de plusieurs chercheurs qui ont repris les recherches des précédents afin d'en arriver à la méthode connue actuellement.

C'est au début des années 1900 que les premières études ont été menées par Weymouth. Ces résultats montraient qu'une droite de pente 0,5 sur une échelle logarithmique donnait une masse volumique maximale. Par la suite, vers 1930, Nijboer détermina la pente de 0,45 comme étant celle donnant la plus grande masse volumique. Après quelques confirmations des résultats de Nijboer par d'autres scientifiques, ce n'est qu'en 1992 que Huber et Shuler définissent clairement la courbe de masse volumique maximale (Langlois, 2005).

Afin d'atteindre le minimum de vide dans la granulométrie (masse volumique maximale), plusieurs études ont montré qu'une droite tracée du point d'origine « 0 » vers le point correspondant au tamis de grosseur maximale à un pourcentage de passant de 100 %, permettait de produire une combinaison granulaire ayant une masse volumique maximum. C'est cette droite qui est la courbe de masse volumique maximale. À partir de cette droite et selon l'usage ou la performance désirée, différentes combinaisons peuvent être produites. La Figure-A II-3 représente cette courbe.

La courbe de masse volumique maximale se trace sur un graphique ayant comme abscisse en échelle logarithmique la dimension des tamis élevés à la puissance 0,45. L'ordonnée présente le pourcentage passant des granulats. La courbe passe par l'origine par la valeur 0,0 et par la valeur du tamis de dimension de grosseur maximale à 100 % passant. Comme illustrée sur la

Figure 1.5, la dimension de grosseur maximale (DGM) représente le tamis normalisé supérieur au tamis de dimension de grosseur nominale maximale (DGNM). Pour la Figure 1.5, le DGM est le tamis 14 mm. Pour sa part, le tamis de dimension de grosseur nominale maximale correspond au tamis supérieur à celui possédant un pourcentage de retenu plus grand que 10 %. Dans le cas présent, le DGNM est le tamis 10 mm, c'est-à-dire qu'il y a un pourcentage de retenu plus grand que 10 % sur le tamis 5 mm. Dans le cas des enrobés, un mélange de type ESG-10 a un DGM de 10 mm et un DGNM de 14 mm.

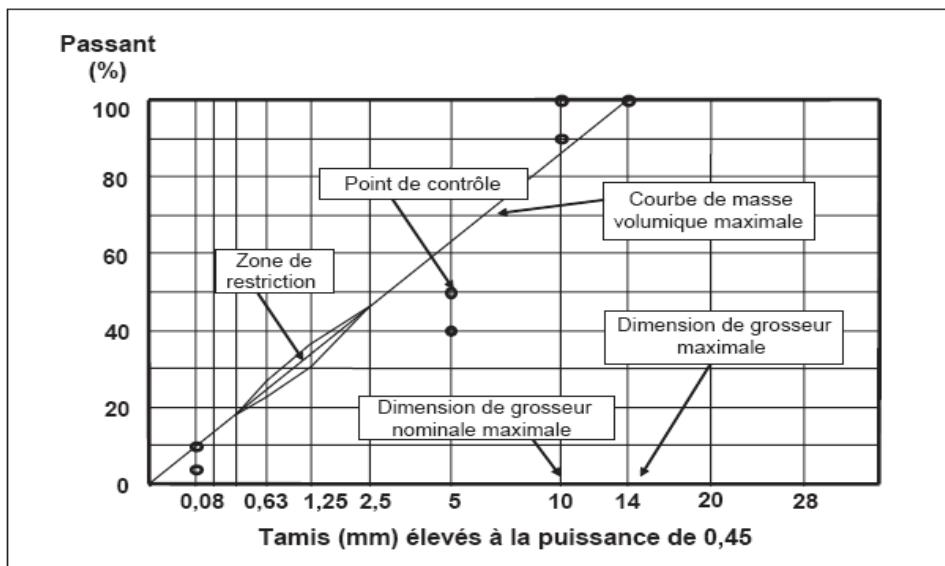


Figure-A II-3 Courbe de masse volumique maximale d'un granulat de dimension de grosseur maximale de 14 mm
Tirée de Langlois (2005, p. 8)

La présentation des tamis à la puissance 0,45 et l'utilisation d'une échelle logarithmique a simplement pour but de faciliter la représentation de la CMVM, car cette dernière devient une droite au lieu d'une courbe ce qui en facilite l'analyse.

Avec cette droite, plusieurs prédictions peuvent être tirées. Un matériau possédant des vides intergranulaires (VAM) élevés devra être plus éloigné de la droite ce qui représente une granulométrie uniforme. Un VAM élevé signifie qu'il y a moins de contact entre les particules. Une texture de matériau grenue, soit plus poreuse, est en dessous de la CMVM

comparativement à une surface fermée qui se situe au-dessus. La droite se situant au-dessus de la CMVM possède plus de particules de dimensions inférieures à 5 mm. Ces particules fines permettent de boucher plus facilement un plus grand nombre de VAM. D'autre part, une granulométrie étalée se rapproche de la CMVM et possède un plus grand nombre de contacts entre les particules.

ANNEXE III

NOTIONS COMPLÉMENTAIRES SUR L'AJOUT EN CENTRALE DE GBR

Il existe deux types de recyclage, soit en place et en centrale (AIPCR, 2001). Étant donné que le présent mémoire se consacre à l'ajout en centrale de recyclés, seul ce dernier sera décrit.

De façon générale, les centrales continues et discontinues avec ou sans tambour de chauffage peuvent être adaptées afin de pouvoir introduire du GBR dans le processus de malaxage de l'enrobé. Les modifications dépendent du processus d'ajout. L'ajout en centrale du GBR peut se faire à froid en utilisant une mousse de bitume afin de produire un enrobage adéquat. Cette méthode s'appelle le recyclage à froid en centrale (ARRA, 2001). La seconde méthode est l'ajout à chaud en chauffant le GBR avec différentes méthodes en fonction du type de centrale tout en minimisant le chauffage du bitume déjà vieilli. Cette méthode est le recyclage à chaud en centrale.

Procédé à froid

Le recyclage en centrale est actuellement effectué en majeur parti par l'utilisation d'une émulsion de bitume. Il existe également le recyclage à partir du bitume moussé. Cependant, étant relativement nouveau, ce procédé est plus largement utilisé dans le recyclage en place au lieu qu'en centrale. Ces deux méthodes permettent de bien enrober le GBR à froid et l'ajouter aux granulats et bitume vierge.

Cette technique permet d'atteindre un taux de recyclage jusqu'à 100 % selon certains critères. Habituellement, le GBR doit être concassé pour obtenir des particules inférieures à 14 mm. Également, afin que le nouvel enrobé reste suffisamment longtemps maniable, une mise en œuvre et compaction en chantier doit être rapide. Toutefois, de façon générale et selon les réglementations, une proportion de 20 % à 35 % est utilisée (Serfass, 2007).

Il existe quelques modèles de centrale d'enrobage spécialement conçu pour l'utilisation du GBR. Pour l'ajout à froid, la plupart utilisent la mousse de bitume tel le système *Double Barrel Green* spécialement conçu pour ce type d'enrobé qui est un exemple parmi tant d'autres.

Procédé à chaud

Pour l'ajout à chaud, diverses méthodes sont utilisées. La première méthode est le recyclage au pied de l'élévateur. Les granulats recyclés sont introduits aux granulats vierges préalablement chauffés à une température plus élevée que la normale. La température du GBR augmente par contact avec les granulats surchauffés. Le liant est par la suite ajouté. Cette méthode permet de restreindre l'oxydation du bitume vieilli. Cependant, la surchauffe des granulats vierges apporte une grande consommation d'énergie, peut diminuer leur qualité, apporter des particules fines supplémentaires. L'ajout en GBR est très limité, soit de 5 % à 15 % selon son contenu en humidité. (AIPCR, 2001 et Serfass, 2007).

De façon générale, les méthodes les plus rependues sont l'ajout dans le tambour-malaxeur à divers endroits. Le GBR est habituellement introduit entre le séchage des granulats vierge et l'ajout du bitume par une trémie ou par anneau de recyclage. Il peut également être introduit juste avant ou pendant le malaxage des granulats vierge et du bitume. Ces méthodes évitent de mettre en contact direct la flamme du brûleur avec le GBR. Les granulats sont réchauffés par les gaz chauds ou par contact avec les matériaux déjà chauffés du mélange (ARRA, 2001 et Serfass, 2008). La Figure-A III-1 montre un système de centrale d'enrobage continue possédant un anneau de recyclage ou est introduit le GBR juste avant l'ajout du bitume.

Enfin une dernière méthode, mais rarement utilisée et non recommandée, est le chauffage du GBR simultanément avec les granulats vierges. Toutefois, la flamme du sécheur détruit littéralement le bitume du GBR ce qui diminue les avantages de cette méthode (Serfass, 2011).

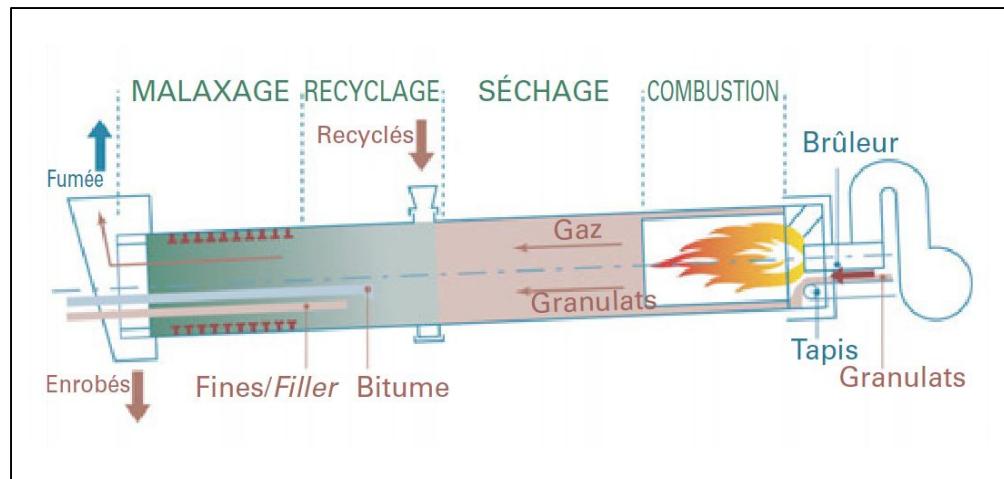


Figure-A III-1 Exemple d'une centrale d'enrobage
continue avec recyclage à équicourant
Tirée de Serfass (2007, p.6)

ANNEXE IV

BILAN THERMIQUE DES ENROBÉS À BASSE TEMPÉRATURE CONFECTIONNÉS

L'annexe présente le calcul détaillé des bilans thermiques des EBE confectionnés afin de permettre de valider si les valeurs expérimentales suivent les notions théoriques des échanges d'énergie thermique.

1. Notions de calcul d'échange thermique

Tout d'abord, l'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un matériau est établie selon l'équation :

$$Q = M * C_p * \Delta T \quad (\text{A IV-1})$$

où la variable « Q » représente l'énergie en kilojoules (kJ), « M » représente la masse du matériau en kilogramme (kg), « C_p » représente la capacité de chaleur massique du matériau (appelé également constante de chaleur spécifique) en $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$. Cette variable correspond à la quantité d'énergie nécessaire pour éléver d'un degré Celsius la température d'un matériau pour chaque unité de masse de ce matériau. Finalement, « ΔT » représente l'augmentation de température du matériau en degré Celsius ($^\circ\text{C}$), soit la température finale moins la température initiale ($T_f - T_i$). La formule peut donc s'écrire :

$$Q = M * C_p * (T_f - T_i) \quad (\text{A IV-2})$$

La capacité de chaleur massique dépend du type de matériau. Pour l'eau et la vapeur d'eau, ce coefficient dépend de la température. Donc, des coefficients moyens standards qu'on retrouve fréquemment dans la littérature ont été pris. Les capacités de chaleur massique des matériaux utilisés sont présentées dans le Tableau-A IV-1 :

Tableau-A IV-1 Capacité thermique massique des matériaux utilisés dans les enrobés
(constante pour des conditions normales de température et de pression)

Matériaux	Capacité de chaleur massique (kJ/kg*°C)
Bitume	2,093
Granulats (inclusif filler)	0,835
GBR (correspondant à un enrobé)	0,920
Eau (phase liquide)	4,187
Eau (phase d'évaporation)	2 257
Eau (phase vapeur à $\pm 102^{\circ}\text{C}$)	2,032

Étant donné que la phase d'évaporation de l'eau s'effectue à température constante, le terme ΔT devient nul. Également, la constante « C_p » est remplacée par la valeur « L_v » qui correspond à la capacité de chaleur massique d'évaporation de l'eau. L'équation pour la quantité d'énergie nécessaire lors de la phase de transformation de l'eau en vapeur devient donc :

$$Q = M * L_v \quad (\text{A IV-3})$$

Le calcul se fait par rapport à la masse utilisée lors du malaxage pour la confection des éprouvettes à la PCG. Pour les enrobés avec le PG 58-28, une masse de 5,4843 kilogrammes (excluant la masse d'eau) a été utilisée lors du malaxage. Pour les EBE avec le bitume PG 64-34, une masse de 5,4810 kilogrammes (excluant la masse d'eau) a été calculée.

2. Bilan thermique des EBE lors du malaxage

En fonction des proportions de la formulation, les différentes masses sont présentées dans le Tableau-A IV-2 selon les deux types de bitumes. Également, les températures initiales et finales mesurées lors du malaxage des matériaux sont inscrites.

Tableau-A IV-2 Températures (en °C) lors du malaxage et masses (en kg) des différents matériaux utilisés dans les EBE pour la confection des éprouvettes à la PCG

Éléments	ESG10-5828				
	LEA1	LEA3	LEA5	LEA7	LEA9
Température des granulats	162,0	162,0	162,0	162,0	162,0
Température du GBR	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7
Température du bitume	147,0	147,0	147,0	147,0	147,0
Température de l'eau ajoutée	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
Température après malaxage	102,2	97,5	94,6	89,1	87,3
Masse d'eau ajoutée	0,00784	0,02352	0,03919	0,05487	0,07055
Masse des granulats			4,4418		
Masse du GBR			0,7838		
Masse du bitume			0,2586		
Éléments	ESG10-6434				
	LEA1	LEA3	LEA5	LEA7	LEA9
Température des granulats	183	-	183	-	183
Température du GBR	22,7	-	22,7	-	22,7
Température du bitume	168	-	168	-	168
Température de l'eau ajoutée	22,1	-	22,1	-	22,1
Température après malaxage	104,5	-	96,4	-	90,1
Masse d'eau ajoutée	0,00784	-	0,03918	-	0,07053
Masse des granulats			4,4405		
Masse du GBR			0,7836		
Masse du bitume			0,2569		

Il est maintenant possible de calculer le bilan thermique durant le malaxage des EBE. La température d'évaporation de l'eau est supposée à 100 °C. Donc, l'eau nécessite un calcul d'énergie pour sa phase liquide jusqu'à 100 °C et pour sa phase d'évaporation à 100 °C. De plus, l'hypothèse d'aucun échange thermique vers l'extérieur est maintenue. Selon les équations AIV-2 et AIV-3, les quantités d'énergie nécessaires lors du malaxage pour chacun des matériaux sont inscrites au Tableau-A IV-3 pour les EBE avec le bitume PG 58-28 et le Tableau-A IV-4 pour les EBE avec le bitume PG 64-34.

Tableau-A IV-3 Bilan thermique des matériaux lors du malaxage des EBE
avec bitume PG58-28

Matériaux	C _p (kg/kJ°C)	Masse (kg)	T _i (°C)	T _f (°C)	Énergie (kJ)
ESG10-5828-LEA1					
Granulats	0,835	4,4418	162,0	102,2	- 221,8
Bitume	2,093	0,2586	147,0	102,2	- 24,6
GBR	0,92	0,7838	22,7	102,2	57,3
Eau (phase liquide)	4,187	0,00783	22,2	100,0	2,6
Eau (phase évaporation)	2 257	0,00110	-	-	2,5
ESG10-5828-LEA3					
Granulats	0,835	4,4418	162,0	97,5	-239,2
Bitume	2,093	0,2586	147,0	97,5	-26,8
GBR	0,92	0,7838	22,7	97,5	53,94
Eau (phase liquide)	4,187	0,02352	22,2	97,5	7,42
Eau (phase liquide)	4,187	0,01536	97,5	100,0	0,16
Eau (phase évaporation)	2 257	0,00110	-	-	34,7
ESG10-5828-LEA5					
Granulats	0,835	4,4418	162,0	94,6	-249,9
Bitume	2,093	0,2586	147,0	94,6	-28,4
GBR	0,92	0,7838	22,7	94,6	51,6
Eau (phase liquide)	4,187	0,0392	22,2	94,6	11,9
Eau (phase liquide)	4,187	0,02468	94,6	100,0	0,56
Eau (phase évaporation)	2 257	0,02468	-	-	55,7
ESG10-5828-LEA7					
Granulats	0,835	4,4418	162,0	89,1	-270,4
Bitume	2,093	0,2586	147,0	89,1	-31,3
GBR	0,92	0,7838	22,7	89,1	47,9
Eau (phase liquide)	4,187	0,05487	22,2	89,1	15,4
Eau (phase liquide)	4,187	0,04058	89,1	100,0	1,9
Eau (phase évaporation)	2 257	0,04058	-	-	91,6
ESG10-5828-LEA9					
Granulats	0,835	4,4418	162,0	87,3	-277,1
Bitume	2,093	0,2586	147,0	87,3	-32,3
GBR	0,92	0,7838	22,7	87,3	46,6
Eau (phase liquide)	4,187	0,07055	22,2	87,3	19,2
Eau (phase liquide)	4,187	0,05429	87,3	100,0	2,9
Eau (phase évaporation)	2 257	0,05429	-	-	122,5

Tableau-A IV-3 Bilan thermique des matériaux lors du malaxage des EBE
avec bitume PG64-34

ESG10-5828-LEA1					
Granulats	0,835	4,4405	183,0	104,5	-291,1
Bitume	2,093	0,2589	168,0	104,5	-34,1
GBR	0,92	0,7836	22,7	104,5	59,0
Eau (phase liquide)	4,187	0,00784	22,1	100,0	2,6
Eau (phase évaporation)	2 257	0,00164	-	-	3,7
ESG10-5828-LEA5					
Granulats	0,835	4,4405	183,0	96,4	-321,1
Bitume	2,093	0,2589	168,0	96,4	-38,5
GBR	0,92	0,7836	22,7	96,4	53,1
Eau (phase liquide)	4,187	0,02352	22,1	96,4	12,2
Eau (phase liquide)	4,187	0,01536	96,4	100,0	0,4
Eau (phase évaporation)	2 257	0,00110	-	-	64,3
ESG10-5828-LEA9					
Granulats	0,835	4,4405	183,0	94,6	-344,5
Bitume	2,093	0,2589	168,0	94,6	-41,9
GBR	0,92	0,7836	22,7	94,6	48,6
Eau (phase liquide)	4,187	0,0392	22,1	94,6	20,1
Eau (phase liquide)	4,187	0,02468	94,6	100,0	2,4
Eau (phase évaporation)	2 257	0,02468	-	-	129,9

Les deux tableaux montrent que l'énergie nécessaire pour l'évaporation de l'eau est très grande pour une masse équivalente d'un autre matériau. De plus, l'énergie fournie par les granulats et le bitume est beaucoup plus grande que l'énergie reçue par le GBR et l'eau. Étant donné que l'équilibre thermique a été atteint malgré tout, il est possible de voir la présence des pertes vers l'extérieur, principalement en raison de l'air et des équipements utilisés pour le malaxage.

ANNEXE V

PROCÉDURE DE CALIBRATION DU MODÈLE 2S2P1D POUR L'ANALYSE DE L'ESSAI DE MODULE COMPLEXE (TIRÉE DE MEUNIER, 2012)

1. Détermination du paramètre E_0

Ce paramètre est établi dans le plan Cole-Cole (Figure-A V-1) et sa valeur correspond à la valeur limite atteinte par le module lorsque la fréquence tend vers l'infini. Le module tend vers un nombre réel (angle de phase nul) et représente donc un comportement purement élastique, et ce, pour des fréquences très élevées et/ou aux basses températures.

2. Détermination du paramètre E_{00}

Ce paramètre est obtenu à basse fréquence et représente la valeur limite du module lorsque ω tend vers zéro. Pour les enrobés bitumineux, $E_{00} > 0$ et son comportement devient purement élastique. Par contre, pour les bitumes, ce paramètre est nul. L'amortisseur linéaire « η » joue alors le rôle prépondérant à haute température et lorsque la fréquence tend vers zéro. Le comportement s'oriente donc vers un matériau visqueux pur ou newtonien.

3. Détermination des constantes h , k et δ

Ces constantes sont calibrées dans le plan Cole-Cole (Figure-A XVIII-1) et leurs valeurs influencent sur la forme de la courbe (Figure-A XVIII-1). « k » représente la pente à basse température, « h » la pente à haute température et « δ » le facteur influençant la valeur maximale de la courbe.

4. Détermination du paramètre β

Ce paramètre a été introduit dans le modèle pour caractériser le comportement visqueux pur des bitumes à haute température. Si $E_0 = 0$, ce qui est vrai pour les bitumes, la pente du module représenté sur la courbe maîtresse tend vers la valeur 1 si la fréquence tend vers 0. Plus la valeur de « β » est élevée, plus la viscosité η du module est élevée, et par conséquent, plus le module complexe est élevé.

5. Détermination de la constante de temps τ

Cette constante est ajustée selon chaque courbe isotherme dans le domaine même du module versus fréquence. Son évolution en fonction de la température est approchée par une loi WLF, si le principe d'équivalence temps-température est vérifié. « τ_E » devient alors fonction des constantes « C_1 » et « C_2 » de la loi WLF et du paramètre « τ_0 ».

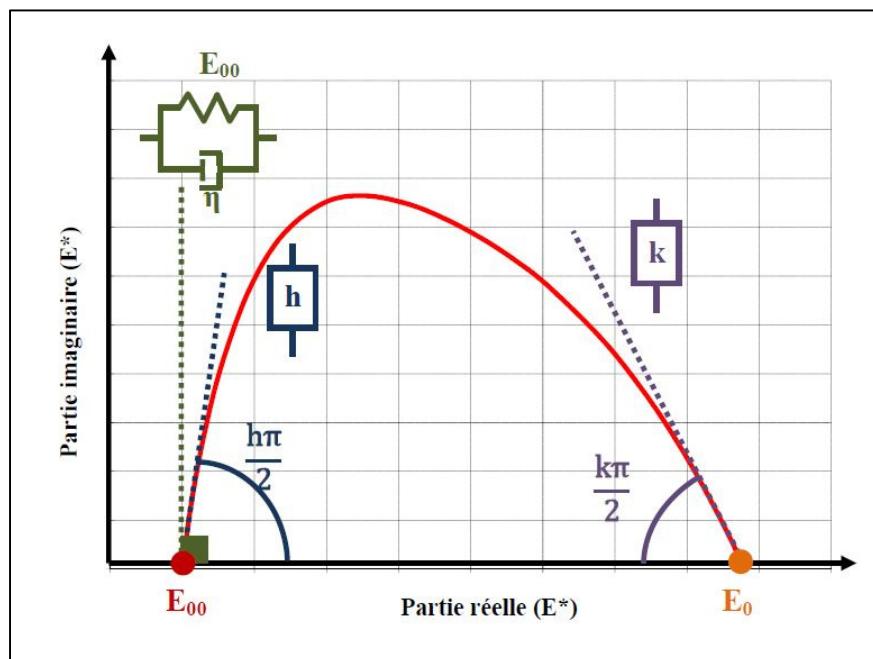


Figure-A V-1 Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur le module complexe représenté dans le plan Cole-Cole
Tirée de Meunier (2012, p. 96)

FORMULE DE MÉLANGE D'ENROBÉ

INFORMATIONS GÉNÉRALES	
Projet :	Type de mélange : ESG-10
Usine :	N° de formule : ESG10-5828-HMA
Localisation : Amos	Type de bitume : PG 58-28

GRANULATS FROIDS												
Calibre	Pierre C-Gravier S-Sable F-Filé	Tamis en mm				Tamis en µm				% util massique brute d ₅₀ app d ₅₀	Densité brute d ₅₀ app d ₅₀	Abs. %
		28,0	20,0	14,0	10,0	5,0	2,5	1,25	0,60			
5 -10 mm	P	Raycar	100	100	90	90	30	20	20	10	0,7	35,0
0 -5 mm	C	Raycar	100	100	100	96	61	39	26	18	13	9,6
0-1,25 mm	S	Bomix	100	100	100	100	98	87	46	11	12	19,0
Filler	F	Calco	100	100	100	100	100	100	100	99	76	2,0
0 -10 mm	GRR	St-Isidore	100	100	95	72	57	45	37	26	15	72
Combiné granulométrique			100	100	97	63	48	39	32	20	10	5,9
												1,05

FORMULATION DU MÉLANGE														
Formule	Tamis en mm				Tamis en µm				% bitume P ₅₀ (%)	F.B.E. (µm)	V ₅₀ (%)	V.A.M. (%)	V.C.B. (%)	Densité brute
	28,0	20,0	14,0	10,0	5,0	2,5	1,25	0,60						
100	100	100	97	63	48	39	32	20	10	5,9	5,35	0,54	7,44	12,2
Spécification	Min.	100	100	100	65	46,1	36,7	26,8	18,1	10,0	4,0	13,3	12,2	91,7
	Max.				92	52	30,7	22,8						
														2,438
														max
														2,578

Caractéristique supplémentaires		Granulat bitumineux reqéré				Essai à la PGG				Essai à l'ométrieur			
Classe du bitume utilisée	58-28	Total granulométrique (T.G.)	516	% d'utilisation	15,0	Nombre girations	% vides	Exigence	Nombr de cycles	% ométrie	Exigence	Nombr de cycles	% ométrie
Classe du bitume en formulation	58-28	Comacité anticipée	-	% de bitume	4,22	10 girations	11,9	≥11,0	1 000 cycles	3,1	≤10,0	3 000 cycles	3,7
Densité du bitume utilisée à 25°C	1,023	Rapport bitume T.G.	1,04	% bitume vierge	4,72	80 girations	6,0	4,0 à 7,0	3 000 cycles	3,7	≤20,0	10 000 cycles	4,7
Densité effectuée des granulats	2,820	Facteur de correction du bitume (%)	-	Tenu à l'eau	Exigence	100 girations	η à	4,0 à 7,0	10 000 cycles	3,7	≤20,0	30 000 cycles	6,8
Volume de bitume effectif (%)	12,2	Surface spécifique totale (m ² /kg)	6,67	Stabilité	≥70	200 girations	4,1	≥2,0	30 000 cycles	6,8			

Effecuté par : Date :
Vérifié par : Date :

FORMULE DE MÉLANGE D'ENROBÉ

ANNEXE VII

FICHES DESCRIPTIVES DES BITUMES PG 58-28 ET PG 64-34

BITUME - ATTESTATION DE CONFORMITÉ		N° de l'attestation de conformité	
INFORMATIONS GÉNÉRALES		TEMPÉRATURES D'UTILISATIONS RECOMMANDÉES	
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Les industries McAsphalt Ltée - Valleyfield		Température minimale	Température maximale
Fabricant et lieu de fabrication Les industries McAsphalt Ltée - Valleyfield		Température d'entreposage	130 °C
Classe de bitume PG 58-28	Nom commercial	Température de malaxage	136 °C
Date de fabrication 25 février 2010	N° de lot 110405-01		150 °C
ESSAIS DE CARACTÉRISATION		ESSAIS DE CONTRÔLE	
Date de la caractérisation 25 février 2010		Date des essais de contrôle 25 février 2010	
Masse volumique à 25 °C (g/cm³) 1.023		Temp. élevée de caractérisation T_e (°C) 59.1	
Masse volumique à 15 °C (g/cm³) 1.028		Module de rigidité S_o (MPa) 120	
Stabilité au stockage (°C) 1.1		Pente m_o 0.441	
TBA moyenne (°C) 39.5		Recouvrance d'élasticité (%) à 10 °C 0.0	
Recouvrance d'élasticité (%) à 10 °C 0.0		ESSAIS DE CONTRÔLE	
Viscosité Brookfield (Pa*s) à 135 °C 0.290		Numéro et nom de la centrale d'enrobage	
Viscosité Brookfield (Pa*s) à 165 °C 0.083		Transporteur	
T_e (°C) 60.8			
T_b (°C) -29.6		N° de la citerne	
Module de rigidité S_o (MPa) 120			
Pente m_o 0.441		Date chargement	
Teneur en cendre (%) 0.074			
Variation de masse au RFTOT (%) -0.096		Quantité livrée	
REMARQUES			
Préparé par		Date	
		26 février 2010	
Approuvé par		Date	
		26 février 2010	
ESPACE RÉSERVÉ AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS			
N° de contrat		Soumis par (organisme de contrôle)	
Prélevé par		Date	
		À l'usage du laboratoire	
N° du réservoir à la centrale d'enrobage		Température (°C)	
		Date de réception	

BITUME - ATTESTATION DE CONFORMITÉ		N° de l'attestation de conformité		
INFORMATIONS GÉNÉRALES		TEMPÉRATURES D'UTILISATIONS RECOMMANDÉES		
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Les Industries McAsphalt Ltée - Valleyfield			Température minimale	Température maximale
Fabricant et lieu de fabrication Les Industries McAsphalt Ltée - Valleyfield		Température d'entreposage	140 °C	175 °C
Classe de bitume PG 64-34	Nom commercial	Température de malaxage	156 °C	170 °C
Date de fabrication 1 mars 2010	N° de lot 100623-02			
ESSAIS DE CARACTÉRISATION		ESSAIS DE CONTRÔLE		
Date de la caractérisation	1 mars 2010	Date des essais de contrôle	28 février 2010	
Masse volumique à 25 °C (g/cm³)	1.018	Temp. élevée de caractérisation T_e (°C)	66.5	
Masse volumique à 15 °C (g/cm³)	1.024	Module de rigidité S_o (MPa)	116	
Stabilité au stockage (°C)	0.3	Pente m_o	0.463	
TBA moyenne (°C)	55.2	Recouvrance d'élasticité (%) à 10 °C	85	
ESSAIS DE CONTRÔLE				
Viscosité Brookfield (Pa*s) à 135 °C	0.691	Numéro et nom de la centrale d'enrobage		
Viscosité Brookfield (Pa*s) à 165 °C	0.251			
T_e (°C)	65.9	Transporteur		
T_b (°C)	-35.6			
Module de rigidité S_o (MPa)	116	N° de la citerne	Date chargement	Quantité livrée
Pente m_o	0.441			
Teneur en cendre (%)	0.063	Notes		
Variation de masse au RTFOT (%)	-0.398			
REMARQUES				
<p> </p> <p> </p>				
Préparé par	Date 2 mars 2010	Approuvé par	Date 2 mars 2010	
ESPACE RÉSERVÉ AU MINISTÈRES DES TRANSPORTS				
N° de contrat		Soumis par (organisme de contrôle)		
Prélevé par	Date	À l'usage du laboratoire		
N° du réservoir à la centrale d'enrobage	Température (°C)	Date de réception		

ANNEXE VIII

RÉSULTATS BRUTS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE

Tableau-A IV-1 Résultats bruts de module complexe pour l'enrobé PG5828-HMA

PG 58-28 HMA											
Temp.	Freq.	 E* 	ϕ	E₁	E₂	Temp.	Freq.	 E* 	ϕ	E₁	E₂
°C	Hz	MPa	(°)	MPa	MPa	°C	Hz	MPa	(°)	MPa	MPa
-31.0	0.01	34533.4	36.8	34527.6	494.9	11.6	0.01	1222.2	46.1	848.1	880.0
-31.0	0.03	31269.0	31.5	31166.9	851.4	11.6	0.03	2203.2	42.4	1627.1	1485.5
-31.0	0.1	31897.1	55.8	31864.3	1015.4	11.6	0.1	3558.8	37.8	2811.7	2181.6
-31.0	0.3	32746.2	1.1	32739.3	613.7	11.6	0.3	5648.6	31.7	4803.6	2971.9
-31.0	1	33426.8	1.2	33419.0	691.8	11.6	1	12350.5	17.4	11785.1	3692.5
-31.0	3	34105.3	40.8	34100.4	487.3	11.6	3	1910.3	41.4	1433.2	1262.8
-31.0	10	34336.3	72.3	34331.6	213.9	11.6	10	3215.9	37.2	2560.0	1946.3
-31.0	20	-	-	-	-	11.6	20	4903.7	32.2	4150.9	2610.6
-20.6	0.01	27371.9	4.3	27293.2	2067.2	22.3	0.01	189.9	45.1	134.1	134.5
-20.6	0.03	32190.5	1.8	32172.2	1032.0	22.3	0.03	315.5	48.6	208.7	236.6
-20.6	0.1	25664.5	5.8	25518.8	2570.4	22.3	0.1	587.2	50.7	372.0	454.3
-20.6	0.3	27760.6	4.0	27680.1	1932.1	22.3	0.3	1065.0	49.8	687.3	813.5
-20.6	1	29205.8	3.5	29152.5	1758.7	22.3	1	2006.5	46.0	1394.7	1442.5
-20.6	3	30277.4	2.8	30241.2	1471.2	22.3	3	5647.9	31.1	4838.1	2913.5
-20.6	10	31202.3	2.1	31181.2	1122.6	22.3	10	396.5	45.8	276.5	284.1
-20.6	20	31886.0	1.6	31871.6	901.5	22.3	20	701.8	47.3	475.9	515.7
-10.2	0.01	17763.7	10.9	17440.7	3371.9	33.7	0.01	42.7	32.0	36.2	22.6
-10.2	0.03	20199.6	8.8	19962.8	3082.4	33.7	0.03	58.2	38.8	45.3	36.5
-10.2	0.1	27443.4	4.1	27369.5	1970.9	33.7	0.1	87.3	45.1	61.6	61.8
-10.2	0.3	17670.6	10.7	17355.1	3283.8	33.7	0.3	150.7	50.0	96.9	115.5
-10.2	1	19900.2	8.4	19688.3	2893.8	33.7	1	268.3	54.0	157.8	217.0
-10.2	3	21742.7	7.4	21561.6	2792.8	33.7	3	541.6	55.3	308.3	445.3
-10.2	10	23936.8	6.1	23799.0	2561.3	33.7	10	2024.8	45.7	1413.7	1449.4
-10.2	20	25701.1	5.1	25597.9	2295.8	33.7	20	119.9	40.3	91.5	77.5
0.7	0.01	7193.5	26.3	6451.3	3182.3						
0.7	0.03	9531.6	21.8	8851.6	3535.3						
0.7	0.1	12306.6	17.4	11742.5	3683.1						
0.7	0.3	20287.8	8.9	20044.8	3129.6						
0.7	1	7724.1	23.7	7074.3	3100.8						
0.7	3	10252.8	19.4	9667.7	3413.2						
0.7	10	12754.1	16.2	12246.7	3560.7						
0.7	20	15468.5	13.1	15066.4	3503.7						

Tableau-A IV-2 Résultats bruts de module complexe pour l'enrobé PG5828-LEA1

PG 58-28 LEA1											
Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa	Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa
-26.6	0.01	25360.0	7.3	25128.5	3208.0	14.3	0.01	390.8	43.4	283.9	268.5
-26.6	0.03	26961.2	4.7	26825.8	2269.1	14.3	0.03	660.4	45.3	464.5	469.4
-26.6	0.1	28006.4	3.3	27958.9	1623.5	14.3	0.1	1116.6	45.3	785.9	793.3
-26.6	0.3	29337.2	2.9	29299.9	1470.4	14.3	0.3	2025.8	42.2	1501.8	1359.6
-26.6	1	30478.8	2.6	30445.9	1369.8	14.3	1	3347.8	37.7	2649.3	2046.4
-26.6	3	31216.2	2.3	31187.3	1231.8	14.3	3	5393.0	31.0	4622.4	2777.8
-26.6	10	31214.8	8.8	30792.2		14.3	10	6804.7	27.6	6027.9	3154.9
-26.6	20	30959.9	31.9	30870.7	1051.3	14.3	20	1069.6	43.6	774.1	738.1
-15.6	0.01	16643.6	11.5	16270.6	3263.8	23.8	0.01	129.8	37.0	103.7	78.1
-15.6	0.03	19168.7	10.1	18854.7	3349.5	23.8	0.03	194.5	42.5	143.5	131.4
-15.6	0.1	21260.3	7.9	21055.0	2939.6	23.8	0.1	309.4	45.9	215.1	222.3
-15.6	0.3	23195.6	6.5	23048.5	2607.8	23.8	0.3	550.9	48.2		
-15.6	1	24848.2	5.3	24741.3	2293.1	23.8	1	979.5	48.7	646.3	736.0
-15.6	3	26424.7	3.9	26357.6	1794.9	23.8	3	1865.1	45.5	1308.0	1329.5
-15.6	10	27201.7	3.8			23.8	10	2634.7	42.1	1954.2	1766.8
-15.6	20	23319.6	184.8	23037.8	1883.3	23.8	20	258.0	39.6	198.9	164.4
-5.6	0.01	7261.6	24.9	6587.7	3055.0	33.8	0.01	52.3	28.9	45.8	25.2
-5.6	0.03	9786.3	20.0	9196.6	3343.7	33.8	0.03	69.1	35.3	56.4	39.9
-5.6	0.1	12130.4	16.7	11620.2	3480.4	33.8	0.1	98.9	40.6	75.1	64.4
-5.6	0.3	14789.2	13.5	14381.0	3450.1	33.8	0.3	161.4	46.6	110.9	117.2
-5.6	1	17059.4	10.9	16750.2	3233.0	33.8	1	271.6	50.4	173.2	209.3
-5.6	3	19573.7	9.1	19326.9	3092.7	33.8	3	524.4	52.5	319.3	415.9
-5.6	10	20736.0	8.0	20528.7	2876.1	33.8	10	794.4	51.5	495.1	621.2
-5.6	20	14198.6	15.6	13660.4	3795.1	33.8	20	101.7	29.9	88.1	50.8
4.4	0.01	1732.4	41.9	1290.2	1156.1						
4.4	0.03	2935.6	38.3	2304.0	1819.0						
4.4	0.1	4553.4	33.0	3817.6	2481.3						
4.4	0.3	6844.0	26.8	6106.8	3089.9						
4.4	1	9169.6	22.1	8494.5	3453.0						
4.4	3	11845.8	17.2	11313.4	3508.5						
4.4	10	13446.9	15.2	12974.6	3526.1						
4.4	20	5220.5	29.9	4526.4	2600.6						

Tableau-A IV-3 Résultats bruts de module complexe pour l'enrobé PG5828-LEA5

PG 58-28 LEA5											
Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa	Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa
-33.6	0.01	28422.9	4.5	27998.8	2125.3	-4.2	0.01	5305.9	27.3	4713.6	2435.8
-33.6	0.03	29337.8	56.2	29211.6	1990.3	-4.2	0.03	7224.0	22.7	6662.9	2791.5
-33.6	0.1	29382.7	1.1	29363.2	586.4	-4.2	0.1	9426.8	18.6	8934.9	3004.8
-33.6	0.3	31063.8	1.9	31046.6	1012.5	-4.2	0.3	11617.6	15.6	11187.8	3130.3
-33.6	1	31307.8	46.0	31300.7	565.0	-4.2	1	14018.4	12.9	13664.3	3130.1
-33.6	3	31631.0	1.4	31621.4	779.4	-4.2	3	16179.0	10.9	15887.1	3058.8
-33.6	10	32226.4	65.9	32223.5	231.4	-4.2	10	18447.9	8.9	18227.5	2839.8
-33.6	20	32695.1	7.5	32681.4	173.3	-4.2	20	19827.7	7.8	19639.7	2699.8
-23.9	0.01	21731.4	7.3	21553.9	2755.8	5.6	0.01	1175.2	42.7	863.7	797.0
-23.9	0.03	23285.4	5.3	23186.2	2138.1	5.6	0.03	1910.1	39.6	1471.8	1217.4
-23.9	0.1	24934.6	4.7	24846.5	2036.5	5.6	0.1	3117.9	34.8	2559.0	1781.1
-23.9	0.3	26329.0	4.3	26252.2	1985.3	5.6	0.3	4619.7	30.0	4000.1	2310.8
-23.9	1	27597.5	3.3	27551.7	1587.9	5.6	1	6654.9	24.9	6035.1	2804.4
-23.9	3	28587.6	2.8	28553.6	1386.3	5.6	3	8762.9	20.8	8192.8	3108.9
-23.9	10	29649.4	2.0	29630.3	1022.6	5.6	10	11254.6	17.0	10765.2	3282.9
-23.9	20	30310.0	50.4	30291.4	702.3	5.6	20	12734.6	15.1	12296.7	3306.4
-14.1	0.01	13743.7	13.0	13393.1	3081.9	15.5	0.01	236.3	45.9	164.3	169.8
-14.1	0.03	15732.4	10.8	15452.7	2953.4	15.5	0.03	391.1	47.4	264.9	287.7
-14.1	0.1	17955.6	9.0	17734.8	2806.9	15.5	0.1	701.9	46.8	480.7	511.4
-14.1	0.3	19785.7	7.6	19611.0	2623.3	15.5	0.3	1210.2	44.5	863.3	848.1
-14.1	1	21776.8	6.3	21646.7	2375.7	15.5	1	2128.5	40.4	1620.2	1380.3
-14.1	3	23414.5	5.3	23314.4	2156.7	15.5	3	3366.0	35.8	2730.2	1968.7
-14.1	10	25111.9	4.2	25044.2	1836.5	15.5	10	5249.7	30.0	4545.9	2625.6
-14.1	20	26110.1	3.6	26050.9	1615.0	15.5	20	6483.6	26.8	5787.3	2922.3

Tableau-A IV-4 Résultats bruts de module complexe pour l'enrobé PG5828-LEA9

PG 58-28 LEA9											
Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa	Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa
-24.7	0.01	21391.8	4.8	21208.7	1632.0	15.0	0.01	226.8	45.8	158.1	162.7
-24.7	0.03	22300.0	5.7	22169.3	2230.8	15.0	0.03	377.0	47.4	255.2	277.5
-24.7	0.1	23757.0	4.6	23676.7	1925.0	15.0	0.1	690.2	46.9	471.3	504.2
-24.7	0.3	24654.0	3.8	24599.8	1632.4	15.0	0.3	1185.4	44.8	841.8	834.6
-24.7	1	25781.7	2.7	25753.3	1198.4	15.0	1	2083.4	40.5	1584.2	1353.2
-24.7	3	26616.5	2.3	26594.8	1070.1	15.0	3	3258.5	36.0	2636.8	1914.3
-24.7	10	27466.2	1.8	27452.6	843.4	15.0	10	5021.4	29.3	4377.8	2459.3
-24.7	20	27940.7	41.4	27927.2	702.4	15.0	20	6197.7	26.3	5558.2	2741.4
-14.8	0.01	13177.5	11.9	12894.2	2717.4	24.8	0.01	79.9	35.8	64.8	46.7
-14.8	0.03	15094.7	9.8	14872.5	2578.6	24.8	0.03	109.0	40.5	82.9	70.8
-14.8	0.1	17044.7	8.4	16860.7	2493.8	24.8	0.1	174.2	45.5	122.1	124.3
-14.8	0.3	18672.0	7.5	18513.4	2426.6	24.8	0.3	285.9	48.2	190.6	213.1
-14.8	1	20478.3	6.0	20365.6	2142.9	24.8	1	527.8	49.3	344.2	400.2
-14.8	3	21921.9	5.1	21835.7	1939.7	24.8	3	934.9	48.4	620.5	699.3
-14.8	10	23228.4	4.0	23171.3	1620.0	24.8	10	1715.4	44.8	1216.6	1209.4
-14.8	20	24152.3	3.5	24103.7	1484.4	24.8	20	2373.2	41.6	1774.3	1575.7
-4.8	0.01	5190.7	27.1	4621.3	2363.6	34.9	0.01	33.1	30.0	28.6	16.5
-4.8	0.03	7036.4	22.4	6506.3	2679.1	34.9	0.03	41.3	34.9	33.9	23.6
-4.8	0.1	9137.1	18.2	8677.4	2861.2	34.9	0.1	57.8	40.4	44.0	37.4
-4.8	0.3	11153.9	15.0	10772.6	2891.0	34.9	0.3	86.0	44.8	61.1	60.6
-4.8	1	13327.5	12.3	13020.5	2844.1	34.9	1	145.1	49.0	95.1	109.6
-4.8	3	15257.1	10.1	15019.8	2679.8	34.9	3	252.2	52.2	154.4	199.4
-4.8	10	17260.8	8.5	17072.4	2540.9	34.9	10	485.6	53.2	290.6	389.1
-4.8	20	18560.9	7.7	18392.4	2484.7	34.9	20	705.0	53.0	424.6	562.8
5.0	0.01	1131.3	43.8	816.7	782.9						
5.0	0.03	1862.7	40.0	1427.6	1196.4						
5.0	0.1	3057.9	35.1	2502.8	1756.9						
5.0	0.3	4520.2	29.7	3924.8	2242.1						
5.0	1	6464.0	24.3	5891.9	2658.3						
5.0	3	8413.2	20.3	7892.3	2914.1						
5.0	10	10656.7	16.2	10230.8	2981.9						
5.0	20	12009.2	14.5	11624.8	3012.0						

Tableau-A IV-5 Résultats bruts de module complexe pour l'enrobé PG6434-HMA

PG 64-34 HMA															
Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa		E ₂ MPa		Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa		E ₂ MPa		
				E ₁	E ₂	E ₁	E ₂				E ₁	E ₂	E ₁	E ₂	
-31.9	0.01	30346.0	2.8	30295.3	1467.7	8.0	0.01	4800.6	30.3	4144.6	2422.3				
-31.9	0.03	31106.2	2.1	31083.8	1150.2	8.0	0.03	6893.7	25.6	6216.0	2980.5				
-31.9	0.1	30984.0	2.5	30955.5	1327.6	8.0	0.1	2794.6	35.0	2288.0	1604.7				
-31.9	0.3	31832.2	1.7	31817.9	955.0	8.0	0.3	4252.2	30.5	3663.3	2158.9				
-31.9	1	32457.0	1.5	32446.4	824.8	8.0	1	5978.5	26.2	5363.4	2641.1				
-31.9	3	33064.4	1.2	33057.3	685.0	8.0	3	8183.9	21.7	7605.2	3022.7				
-31.9	10	33736.8	4.9	33604.6	1259.9	8.0	10	10310.0	18.4	9783.1	3253.8				
-31.9	20	33566.0	0.9	33559.8	427.3	8.0	20	12824.8	15.4	12366.5	3397.6				
-19.5	0.01	22113.7	6.8	21958.2	2617.6	20.5	0.01	486.1	43.8	351.0	336.3				
-19.5	0.03	23982.4	5.7	23864.5	2374.0	20.5	0.03	841.8	44.7	598.2	592.2				
-19.5	0.1	25553.2	4.9	25458.6	2190.4	20.5	0.1	1420.1	43.4	1031.0	976.6				
-19.5	0.3	26977.1	4.0	26910.8	1884.9	20.5	0.3	2453.3	40.2	1873.7	1583.6				
-19.5	1	25578.4	4.9	25486.1	2168.5	20.5	1	744.0	42.8	545.9	505.5				
-19.5	3	27122.1	4.0	27055.1	1901.7	20.5	3	1270.1	41.2	955.8	836.4				
-19.5	10	28367.7	3.3	28319.3	1653.2	20.5	10	2049.5	38.4	1606.8	1272.3				
-19.5	20	29532.8	2.7	29499.1	1409.5	20.5	20	3302.1	34.2	2729.8	1858.0				
-7.1	0.01	9112.1	19.7	8580.2	3067.5	34.3	0.01	79.1	25.3	71.5	33.8				
-7.1	0.03	11499.9	16.1	11050.1	3184.6	34.3	0.03	103.3	31.3	88.2	53.7				
-7.1	0.1	13714.9	13.5	13334.6	3207.0	34.3	0.1	141.2	36.8	113.1	84.5				
-7.1	0.3	16117.5	11.2	15812.1	3122.7	34.3	0.3	221.6	42.5	163.5	149.6				
-7.1	1	18251.6	9.5	18000.6	3016.4	34.3	1	360.5	46.6	247.8	261.8				
-7.1	3	20576.2	7.8	20384.6	2798.3	34.3	3	654.6	48.9	429.9	493.6				
-7.1	10	18116.3	9.5	17869.2	2982.0	34.3	10	206.0	38.2	161.9	127.5				
-7.1	20	20292.7	7.9	20098.1	2802.3	34.3	20	318.8	42.0	237.0	213.1				

Tableau-A IV-6 Résultats bruts de module complexe pour l'enrobé PG6434-LEA1

PG 64-34 LEA1											
Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa	Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa
-32.4	0.01	30143.0	1.9	30122.0	1017.0	7.7	0.01	3935.2	36.0	3183.4	2313.4
-32.4	0.03	30905.2	1.8	30888.8	959.4	7.7	0.03	6101.3	29.2	5324.0	2979.9
-32.4	0.1	30503.1	2.4	30476.2	1279.2	7.7	0.1	2445.5	40.2	1868.1	1578.2
-32.4	0.3	31247.7	1.9	31230.6	1032.2	7.7	0.3	3970.5	34.1	3286.5	2228.0
-32.4	1	31957.7	1.5	31946.1	832.4	7.7	1	5796.0	28.7	5083.5	2784.2
-32.4	3	32535.0	1.2	32528.0	669.9	7.7	3	8152.5	23.2	7494.0	3209.8
-32.4	10	33101.7	40.7	33097.6	384.3	7.7	10	10467.6	19.2	9888.3	3434.1
-32.4	20	33519.4	13.9	33506.4	633.7	7.7	20	13120.6	15.2	12658.4	3447.9
-20.0	0.01	22050.1	6.9	21889.5	2655.6	20.4	0.01	316.1	54.9	181.7	258.6
-20.0	0.03	23955.3	5.7	23836.2	2386.0	20.4	0.03	637.9	53.4	380.3	512.1
-20.0	0.1	25453.3	4.7	25367.3	2077.6	20.4	0.1	1184.9	50.2	758.9	910.0
-20.0	0.3	27040.9	3.6	26986.1	1702.7	20.4	0.3	2196.6	44.8	1559.5	1547.1
-20.0	1	25431.0	4.8	25340.1	2145.9	20.4	1	418.2	51.8	258.5	328.8
-20.0	3	26987.2	4.0	26920.6	1891.7	20.4	3	815.8	49.6	529.2	620.9
-20.0	10	28163.6	3.4	28114.5	1660.0	20.4	10	1390.3	46.4	959.4	1006.1
-20.0	20	29310.9	2.7	29278.3	1379.1	20.4	20	2453.2	41.5	1836.7	1626.2
-7.6	0.01	8856.3	21.2	8257.8	3196.0	33.0	0.01	27.6	47.7	18.5	20.4
-7.6	0.03	11349.0	17.4	10827.3	3401.0	33.0	0.03	44.9	51.3	28.1	35.0
-7.6	0.1	13666.6	14.3	13240.7	3384.8	33.0	0.1	74.8	53.8	44.2	60.4
-7.6	0.3	16223.2	11.6	15890.0	3271.0	33.0	0.3	148.3	56.3	82.3	123.3
-7.6	1	18377.2	9.7	18115.9	3086.2	33.0	1	284.6	56.7	156.3	237.8
-7.6	3	20658.3	7.6	20474.5	2742.9	33.0	3	594.0	55.7	335.0	490.5
-7.6	10	17930.3	9.9	17660.8	3097.4	33.0	10	82.3	52.6	50.0	65.4
-7.6	20	20177.5	8.1	19977.4	2830.5	33.0	20	165.2	54.6	95.6	134.7

Tableau-A IV-7 Résultats bruts de module complexe pour l'enrobé PG6434-LEA5

PG 64-34 LEA5											
Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa	Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa
-23.9	0.01	20373.7	6.3	20248.8	2251.4	16.0	0.01	284.7	48.7	188.0	213.8
-23.9	0.03	21773.5	5.4	21675.6	2061.9	16.0	0.03	512.4	47.2	348.2	376.0
-23.9	0.1	23209.7	4.6	23135.9	1846.0	16.0	0.1	880.3	44.5	628.0	616.8
-23.9	0.3	24424.7	3.7	24372.4	1595.4	16.0	0.3	1415.7	41.7	1056.6	942.2
-23.9	1	25555.0	3.1	25517.3	1385.8	16.0	1	2439.8	37.0	1948.2	1468.7
-23.9	3	26412.5	2.4	26385.8	1108.7	16.0	3	3708.8	32.6	3124.4	1998.3
-23.9	10	27083.3	31.9	27062.9	908.6	16.0	10	5504.5	27.3	4892.5	2522.6
-23.9	20	27781.1	2.0	27759.2	983.3	16.0	20	6670.0	24.0	6079.2	2714.4
-14.4	0.01	13328.6	11.9	13040.6	2755.7	26.4	0.01	67.6	44.7	47.9	47.5
-14.4	0.03	15163.4	10.2	14924.6	2679.9	26.4	0.03	114.9	48.4	76.4	85.8
-14.4	0.1	17084.4	8.5	16894.8	2537.0	26.4	0.1	180.1	50.0	115.7	138.0
-14.4	0.3	18796.9	7.2	18646.9	2369.7	26.4	0.3	305.3	50.6	193.7	236.0
-14.4	1	20530.4	6.1	20415.2	2171.1	26.4	1	584.4	49.3	380.7	443.3
-14.4	3	21934.8	5.2	21844.4	1984.1	26.4	3	1031.1	47.0	703.3	754.0
-14.4	10	23197.3	4.2	23133.1	1718.9	26.4	10	1839.9	42.7	1351.8	1248.2
-14.4	20	24356.7	3.6	24309.0	1517.5	26.4	20	2419.3	41.1	1823.5	1589.3
-4.9	0.01	6054.2	23.9	5536.5	2449.7	34.2	0.01	26.2	46.3	18.1	18.9
-4.9	0.03	7821.0	20.3	7335.3	2713.2	34.2	0.03	41.2	44.2	29.5	28.8
-4.9	0.1	9905.2	16.9	9479.7	2871.6	34.2	0.1	66.8	48.4	44.3	49.9
-4.9	0.3	11856.6	14.0	11502.0	2878.0	34.2	0.3	111.6	50.7	70.7	86.4
-4.9	1	13975.8	11.6	13690.6	2809.1	34.2	1	208.8	52.0	128.5	164.5
-4.9	3	15894.9	9.8	15662.5	2707.2	34.2	3	378.8	52.0	233.4	298.4
-4.9	10	17875.1	8.1	17696.1	2520.4	34.2	10	723.2	50.4	460.8	557.4
-4.9	20	19117.1	7.0	18975.0	2322.5	34.2	20	1023.6	48.7	675.2	769.3
4.8	0.01	1628.6	39.8	1251.8	1041.7						
4.8	0.03	2523.7	35.8	2045.9	1477.6						
4.8	0.1	3880.4	30.8	3331.7	1989.3						
4.8	0.3	5436.7	26.1	4880.3	2396.0						
4.8	1	7426.8	21.5	6909.5	2723.2						
4.8	3	9354.5	18.1	8890.4	2909.8						
4.8	10	11584.5	14.8	11200.3	2958.3						
4.8	20	12935.6	13.1	12599.6	2927.4						

Tableau-A IV-8 Résultats bruts de module complexe pour l'enrobé PG6434-LEA9

PG 64-34 LEA9											
Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa	Temp. °C	Freq. Hz	E* MPa	ϕ (°)	E ₁ MPa	E ₂ MPa
-24.0	0.01	17710.0	6.6	17591.5	2044.9	14.6	0.01	293.4	41.0	221.3	192.7
-24.0	0.03	18968.4	5.7	18875.3	1876.6	14.6	0.03	471.6	43.3	343.1	323.6
-24.0	0.1	20302.7	4.7	20234.1	1664.3	14.6	0.1	814.8	42.7	598.3	553.0
-24.0	0.3	21418.2	3.9	21368.2	1461.7	14.6	0.3	1338.4	40.4	1019.8	866.7
-24.0	1	22407.1	3.3	22369.6	1294.1	14.6	1	2207.6	36.4	1776.4	1310.7
-24.0	3	23284.6	2.7	23258.7	1095.7	14.6	3	3301.2	32.4	2786.0	1770.8
-24.0	10	24055.7	2.1	24039.2	889.9	14.6	10	4826.1	27.3	4288.2	2214.1
-24.0	20	24544.0	1.7	24532.8	739.9	14.6	20	5842.4	24.7	5308.5	2437.8
-14.4	0.01	11223.2	12.9	10940.1	2504.8	26.3	0.01	89.9	31.3	76.8	46.7
-14.4	0.03	12901.6	10.9	12669.0	2438.3	26.3	0.03	117.1	35.4	95.4	67.7
-14.4	0.1	14671.7	9.0	14491.1	2293.3	26.3	0.1	176.2	40.5	134.0	114.5
-14.4	0.3	16185.2	7.8	16036.1	2191.6	26.3	0.3	286.0	44.5	204.2	200.3
-14.4	1	17786.7	6.5	17671.1	2024.2	26.3	1	509.3	46.2	352.5	367.6
-14.4	3	19055.9	5.5	18969.4	1811.0	26.3	3	866.4	45.8	604.3	620.8
-14.4	10	20411.4	4.4	20350.7	1571.3	26.3	10	1528.4	42.5	1127.6	1031.7
-14.4	20	21185.8	3.9	21135.7	1454.9	26.3	20	2030.8	39.4	1566.8	1288.3
-4.8	0.01	4768.0	25.8	4291.5	2077.7	34.5	0.01	57.1	22.1	52.8	21.5
-4.8	0.03	6262.8	21.9	5812.5	2331.6	34.5	0.03	69.8	25.9	62.7	30.5
-4.8	0.1	8079.9	18.0	7683.3	2500.1	34.5	0.1	90.7	30.9	77.8	46.5
-4.8	0.3	9826.5	15.1	9485.2	2567.3	34.5	0.3	123.8	36.6	99.4	73.8
-4.8	1	11733.7	12.4	11457.8	2529.3	34.5	1	195.1	42.7	143.5	132.2
-4.8	3	13396.5	10.4	13178.0	2409.5	34.5	3	315.7	46.8	216.2	230.1
-4.8	10	15185.7	8.8	15007.4	2319.7	34.5	10	574.1	48.1	383.4	427.2
-4.8	20	16282.3	7.7	16136.4	2174.0	34.5	20	806.7	48.2	538.0	601.0
4.9	0.01	1176.4	41.2	884.5	775.6						
4.9	0.03	1880.0	37.7	1486.8	1150.6						
4.9	0.1	2961.4	32.6	2495.5	1594.2						
4.9	0.3	4255.3	27.8	3762.6	1987.5						
4.9	1	5931.1	23.1	5456.7	2324.3						
4.9	3	7605.0	19.3	7177.9	2512.7						
4.9	10	9551.7	16.0	9182.7	2629.2						
4.9	20	10690.5	14.1	10365.8	2613.3						

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aïtcin, Pierre-Claude, Guy Jolicoeur et Michel Mercier. 1992. *Technologie des granulats*, 2^{ième} édition. « Sainte-Foy : Les éditions Le Griffon d'argile, 386.
- Al-Quadi, Imad L., Mostafa Elseifi et Samuel H. Carpenter. 2007. Reclaimed Asphalt Pavement : A Literature Review. Coll. « Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP », FHWA-ICT-07-001. Urbana (Illinois) : Illinois Center of Transportation (ICT), Bureau of Materials and Physicals Research, 23 p.
- Al-Quadi, Imad L., Fini, Eli H., Masson, J.-F. et Kevin M. McGhee. 2008. « Effect of Bituminous Material Rheology on Adhesion ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Resarch Board*, n° 2044, p. 96-104.
- Angelo, John, Eric Harm, John Bartoszek, Gaylon Baumgardner, Matthew Corrigan, Jack Cowser, Thomas Harman, Mostafa Jamshidi, Wayne Jones, Dave Newcomb, Brian Prowell, Ron Sines et Bruce Yeaton. 2008. *Warm-Mix Asphalt : European Practice*. International Technology Scanning Program, FHWA-PL-08-007. Washington (DC) : Office of International Programs, 68 p.
- Association Mondiale de la Route (AIPCR). 2003. *Recyclage des chaussées*. France : La Grande Arche – Paroi Nord, 158 p.
- Bitume Québec. 2008. *Guide de bonnes pratiques : La mise en œuvre des enrobés*, Sainte-Julie, 105 p.
- Bureau de normalisation du Québec. 2007. *Travaux de génie civil – Granulats*, 1^{ère} éd., 2^e modification. Norme du Québec, NQ 2560-114/2007. Sainte-Foy (Qc) : Bureau de normalisation du Québec (BNQ), 67 p.
- Button. J.W., Cindy Estakhri et Andrew Wimsatt. 2007. *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt : Evaluation of Warm-Mix Asphalt New Technology*. SWUTC/07/0-559701. College Station (Texas) : Texas Transportation Institute, 83 p.
- Carter, Alan et Daniel Perraton. 2002. « La mesure du module complexe des enrobés bitumineux ». 2^e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil. (Montréal, 5-8 juin 2002). p. 1-10.

- Carter, Alan, Olivier Mainardis et Daniel Perraton. 2009. *Design of Half-Warm Asphalt Mixes with Additives*. Coll. « Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux », Montréal (Qc) : École de technologie supérieure, 12 p.
- Choquet, F. 1993. « Le vieillissement du bitume ». In *Strategic Highway (SHRP) International Conference*. (The Hague, September 20-24 1993)
- Decker, D. et S.T. J. Young. 1996. « Handling RAP in an HMA Facility ». In *CTAA 1996 Proceedings : 41rd Annual Conference*. (Edmonton, November 1996). Edmonton (Alberta) : Stephen Goodman.
- Delaporte, B., H. Di Benedetto, P. Chaverot et G. Gauthier. 2007. « Linear viscoelastic properties of bituminous materials : from binders to mastics ». Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 76.
- Di Benedetto, Hervé et Chantal De La Roche. 1998. « Modélisation : Écart entre état des connaissances et applications ». *Journée LAVOC*. (Lausanne, Septembre 1998), 28 p. Suisse : École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Di Benedetto, Hervé et Jean-François Corté. 2004. *Matériaux bitumineux routiers 1 : Description et propriétés des constituants*, Editions Lavoisier, Hermès Science, Paris. 234 p.
- Di Benedetto, Hervé et Jean-François Corté. 2005. *Matériaux bitumineux routiers 2 : Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*, Editions Lavoisier, Hermès Science, Paris. 283 p.
- Di Benedetto, H., M. Nugyen, S. Pouget, et Chantal De La Roche. 2008. « Time-Temperature Superposition Principle for Bituminous Mixtures : Three Dimensional Approach and Extension in the Non-Linear Domain. Beijing, avril 2008, ICTI.
- Duveau, Alice. 2009. *Enrobés bitumineux tièdes et semi-tièdes avec enrobés recyclés froids*. Montréal (Qc) : Université de technologie de Troyes, 40 p.
- Doucet, Félix et Bruno Auger. 2010. *Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des Transports du Québec*. RTQ-10-01. Québec : Direction du Laboratoire des Chaussées, 151 p.

Feisthauer, Bruno. 2009. *Le retraitement à froid en place des enrobés bitumineux de type II*. Montréal (Qc) : Université de technologie de Troyes, 199 p.

Forfylow, R.W. et Brend Middleton. 2008. « Experiences with Warm Mix Asphalt – A Contractor Perspective ». In *CTAA 2008 Proceedings : 53rd Annual Conference*. (Saskatoon, Novembre 16-19, 2008). p. 409-432. Laval (Québec) : Stephen Goodman.

Gaudefroy, Vincent, Olard, François, Cazacliu, Bogdan, de La Roche, Chantal, Beduneau, Étienne et Jean Pierre Antoine. 2007. « Laboratory Investigations of Mechanical Performance of Foamed Bitumen Mixes That Use Half-Warm Aggregates ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, n° 1998, p. 89-95.

Gaudefroy, Vincent, Olard, François, Le Quernec, François et Chantal de La Roche. 2008. « Laboratory investigations on the Total Organic Compounds emissions of half-warm mix asphalt technology versus traditional hot mix asphalt ». In *ISAP Congress on Asphalt Pavements and Environment*. (Zurich, 2008).

Gauvain, Pierre. 2006. « Adaptation de la Grave Mousse pour son emploi par l'agence Eurovia de Reims ». Rapport de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, INSA Strasbourg, 42 p.

Hurley G.C. et B.D. Prowell. 2005a. « Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt ». Report 05-06. Auburn University (Auburn) : National Center for Asphalt Technology, 27 p.

Hurley G.C. et B.D. Prowell. 2005b. « Evaluation of Aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt ». Report 05-04. Auburn University (Auburn) : National Center for Asphalt Technology, 30 p.

Jenkins, K.J., J.L.A. de Groot M.F.C. van de Ven et A.A.A. Molenarr. 1999. « Half-warm foamed bitumen treatment, a new process ». In *7th Conference on asphalt pavements for Southern Africa (CAPSA)*, Victoria Falls (août-septembre 1999), p. 1-18

Jenkins, K.J. 2000. « Mix Design Consideration for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen ». Thèse de doctorat, Université de Stellenbosch, Afrique du Sud.

- Kassem, Emad, Masad, Eyad, Bulut, Rifat et Robert Lytton. 2006. « Measurements of Moisture Suction and Diffusion coefficient in Hot-Mix Asphalt and Their Relationships to Moisture Damage ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Resarch Board*, n° 1970, p. 45-54.
- Kim, Yong-Rak, Little, Dallas N., et Robert L. Lytton. 2004. « Effect of Moisture Damage on Material Properties and Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Resarch Board*, n° 1891, p. 48-54.
- Kristjansdottir, Olof, S.T. Muench, L. Micheal et G. Burke. 2007. « Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption ». *Transportation Resarch Record : Journal of the Transportation Resarch Board*, n° 2040 p. 91-99.
- Lacroix, David. 2009. *Formulation et caractérisation des enrobés retraités à froid de type I.*, Montréal (Qc) : Université de technologie de Troyes, 45 p.
- Lamothe, Sébastien. 2010. Propriétés thermomécaniques et caractérisation des enrobés dans le domaine viscoélastique linéaire à l'aide de l'essai de module complexe (E^*). [Notes du cours MGC-922 Les matériaux bitumineux : formulation, fabrication et mise en place]. Montréal : École de technologie supérieure, 18 p.
- Lamothe, Sébastien. 2004 « Enrobé grenu : Influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-ornièrage », Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École de technologie supérieure, 169 p.
- Langlois, Pierre, Anne-Marie Leclerc et Mireille Savard. 2005. *Enrobés : Formulation selon la méthode LC*, Québec : Direction du laboratoire des chaussées, 111 p.
- Lelièvre, A. 1994. *Les enrobés bitumineux*, Édition Griffon d'argile, ISBN 2-89443-016-7, 408 p.
- Li, Feng. 2011. *Evaluation of Asphalt Foaming Characteristics*. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, no° 8, Xitucheng Road, Haidian District, Beijing (Chine).
- Li, Xinjun, Mihai O. Marasteanu, R. Christopher Williams et Timothy R. Clyne. 2008. « Effect of Reclaimed Asphalt Pavement (Proportion and Type) and Binder Grade on Asphalt Mixtures ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Resarch Board*, n° 2051, p. 90-97.

- Manolis, Steven, T. Decoo P. Lum et M. Greco. 2008. « Cold Weather Paving Using Warm Mix Asphalt Technology ». In 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada. (Toronto, 2008), p. 1-15.
- Mansfeld, Richard, Rudolf Barth, Frank Beer, Peter Breitbach, Daniel Gogolin, Friedrich Pass, Martin Radenberg, Gerhard Riebesehl, Siegfried Sadzulewsky et Hans Wölfle. 2009. *Warm mix asphalt : Tips and tricks developed by professionals for professionals*. Coll. « Asphalt Guidelines ». Germany : German Asphalt Paving Association (DAV), 47 p.
- Marcotte, Tomy, Alan Carter, Alice Duveau et Daniel Perraton, 2010. « Mix Design and Characterization of Low Energy Asphalt (LEA) Mixes Containing Reclaimed Asphalt Mixes (RAP) ». In *CTAA 2010 Proceedings : 55rd Annual Conference Saskatoon*. (Saskatoon, Nov. 28-Dec. 01 2010), p. 391-409. Saskatoon (Saskatchewan) : Stephen Goodman.
- Meunier, Mathieu. 2012. « Prédiction de l'ornièrage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 286 p.
- Ministère des Transport du Québec (MTQ). 2009. *Laboratoire des chaussées : Recueil des méthodes d'essai LC*, 13^e éd. Normes – Ouvrages routiers. Québec (Qc) : Les Publications du Québec, 599 p.
- Ministère des Transport du Québec (MTQ). 2012. *Tome VII - Matériaux, section 04 : Liants et enrobés*, 17^e éd. Normes : Ouvrages routiers. Québec (Qc) : Les Publications du Québec.
- Middleton, B. Et R.W. Forfylow. 2009. « Evaluation of Warm-Mix Asphalt Produced with the Double Barrel Green Process ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, n° 2126, p. 19-26.
- Olard, François. 2003. « Comportement thermomécanique des enrobes à basses températures: Relation entre les propriétés du liant et de l'enrobé ». Thèse pour l'obtention du grade de Docteur, Lyon (France), École doctorale des sciences pour l'ingénieur de Lyon, 226 p.

- Olard, F., J.-P. Antoine, B. Héritier, A. Romier et Y. Martineau. 2007a. « LEA (Low Energy Asphalt) : a New Generation of Half-Warm Asphalt Mixtures ». In *International conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials*. (Athens, 2007).
- Olard, F., Le Noan, C. et A. Romier. 2007b. « Innovative low energy asphalt technique for minimizing impacts from asphalt plants to road works ». In AIPCR (World Road Association) Congress : AIPCR Sustainable Development Prize. (Paris, 2007).
- Olard, F., C. Le Noan et A. Romier. 2007c. « Les enrobés à basse énergie EBE et basse température EBT : Bilan des chantiers réalisés en 2005 et 2006 ». *Revue générale des routes et de l'aménagement*, n° 854, (Décembre 2006 et janvier 2007), p. 72-78.
- Olard, F., C. Le Noan, E. Beduneau et A. Romier. 2008. « Low Energy Asphalts for sustainable road construction ». In *4th Eurobitume et Eurasphalt congress*. (Copenhagen, 2008).
- Olard, François et Claude Le Noan. 2008b. « Les enrobés à basse température ». *Routes/Roads*, vol. 1 trimestre 2008, n° 336-337, p.
- Olard, F., E. Beduneau, N. Seignez, S. Dupriet et D. Bonneau. 2009. « Laboratory Performance-Based Assessment of Half-Warm Mix Asphalts with High Recycling Rate by means of the Factorial Experiment Design Approach ». In *Transportation Research Board Annuel Meeting*. Conference Proceeding #09-1190.
- Perraton, Daniel. 2010. *Module complexe – Principe et modèles*. Note technique, v. 02. Montréal : École de Technologie Supérieure, 4 p. 16-23.
- Recycling Asphalt Pavement Expert Task Group (RAPETG). 2006. « Summary of State Specification on RAP ». En ligne. <http://www.morerap.us/files/state-practices/rap-states-specification-review-final.pdf>. Consulté le 20 mars 2013.
- Robitaille, Vincent et Denis Tremblay. 1997. *Mécanique des sols : Théorie et pratique*, 1^{ère} édition. Mont-Royal : Modulo Éditeur, 652 p.
- Romier, Alain, Maurice Audeon, Jac David, Yves Martineau, et François Olard. 2006. « Low-Energy Asphalt with Performance of Hot-Mix Asphalt ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Resarch Board*, n° 1962, p. 101-112.

- Routhier, Martin et Guy Bergeron. 2007. « Enrobé recyclé à chaud en couche de base : Suivi de performance de la route 117 ». *Info DLC : Bulletin d'information technique*, Vol. 12, n°4, juillet 2007, p. 1-2.
- Sauzéat, Cédric, Hervé Di Benedetto, François Olard, et Mai Lan Nguyen. 2008. « Fatigue behaviour of half-warm mix asphalts ». In *ISAP Congress on Asphalt Pavements and Environment*. (Zurich, 2008).
- Serfass, Jean-Pierre. 2007. « Recyclage en central des matériaux de chaussée ». *Technique de l'ingénieur*, n° C 5 620, p. 1-13.
- Trudeau, Stéphane. 2012. « Gestion et entreposage des bitumes en centrales ». Bitume Québec : Formation technique 2012. (Montréal, 4 et 5 décembre 2012), p. 41. Sainte-Julie : Bitume Québec.
- Van de Ven, M.F.C., K.J. Jenkins, J.L.M. Voskuilen et R. Van den Beemt. 2007. « Development of Half-Warm Foamed Bitumen Mixes : State of the Art ». *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 8, n° 2, p. 163-175.
- West, Randy, Andra Kvasnak, Nam Tran, Buzz Powell et Pamela Turner. 2009. « Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, n° 2126, p. 100-108.
- Wielinski, Jason, Adam Hand, et David Michael Rausch. 2009. « Laboratory and Field Evaluations of Foamed Warm-Mix Asphalt Projects ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, n° 2126, p. 125-131.
- Wikipédia. Wikimedia Foundation. 2012. « Thermodynamique ». *Wikipédia : L'encyclopédie libre*. En ligne. <<http://fr.wikipedia.org/wiki/Thermodynamique>>. Consulté le 10 mars 2013.
- Wikipédia. Wikimedia Foundation. 2013. « Conduction thermique ». *Wikipédia : L'encyclopédie libre*. En ligne. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Conduction_thermique>. Consulté le 10 mars 2013.
- Wirtgen Group. 2001. *Bitume mousse – le liant innovateur pour la construction routière*. No. 54-14. Windhagen RFA : Wirtgen GmbH, 32 p.

Wirtgen Group. 2004. *Wirtgen : Manuel du recyclage à froid*, 2e édition. Windhagen (RFA) : Wirtgen GmbH, 273 p.

Xinjun L., Marasteanu M.O., Williams, R.C. et Timothy R. Clyne. 2008 « Effect of Reclaimed Asphalt Pavement (Proportion and Type) and Binder Grade on Asphalt Mixtures ». *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, n° 2051, p. 90-97.G