

Formulation d'enrobés bitumineux de type ESG10 et GB20
avec incorporation de particules de verre

par

Alexandre T.BACHAND

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

MONTRÉAL, LE 4 AVRIL 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Alexandre T.Bachand, 2018



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Michel Vaillancourt, 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. Wahid Meref, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, 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 6 MARS 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier mes parents, Alain et Sylvie qui m'ont toujours appuyé et encouragé durant mon parcours universitaire. Leur présence et leur soutien m'ont permis de pouvoir me concentrer entièrement sur mes études durant ces années.

Je tiens également à remercier mes professeurs ainsi que toutes les personnes qui m'ont aidé à construire ce mémoire et à mieux comprendre les matériaux bitumineux. D'abord, mes directeurs Michel Vaillancourt et Daniel Perraton qui m'ont donné ma chance dans ce projet qui m'ont apporté leur aide, leur soutien ainsi que le partage de leurs grandes connaissances. Je tiens également à souligner le travail de Francis Bilodeau et Sylvain Bibeau, techniciens de laboratoire, pour leur aide précieuse dans la réalisation de mes essais, ainsi qu'à Sébastien Lamothe qui m'a guidé dans mon analyse par son immense maîtrise du sujet et par son souci du détail. Enfin, je voudrais dire un immense merci à Éric Lachance-Tremblay qui m'a pris sous son aile dès le tout début et qui m'a guidé, formé et transmis sa passion des enrobés.

J'aimerais également remercier mes collègues qui m'ont beaucoup apporté tant par leurs conseils que par leur présence dans mes années de maîtrise. D'abord, Youness, Théophile, Laurence, Emmanuel, Mounir ainsi que mon coloc et ami Marc-André avec qui la vie universitaire dépassait le cadre scolaire.

Un dernier merci à Tricentris, à DJL Construction ainsi qu'à Bitumar pour leur généreuse contribution matérielle au projet.

FORMULATION D'ENROBÉS BITUMINEUX DE TYPE ESG10 ET GB20 AVEC INCORPORATION DE PARTICULES DE VERRE

Alexandre T.BACHAND

RÉSUMÉ

Présentement au Québec, la majorité du verre que nous recyclons se retrouve par la suite dans les centres d'enfouissement. En fait, cette situation est essentiellement causée par la présence de verre mixte qui ne peut être exploité pour fabriquer de nouveaux produits, car il est constitué de plusieurs types de verre. Le verre mixte se crée essentiellement lorsque les différentes bouteilles et contenants se brisent et se mélangent lors du transport vers les centres de tri. Étant donné que le prix de vente aux centres de transformation est trop élevé, les entreprises s'en départissent comme ils le peuvent et les centres d'enfouissement sont souvent l'alternative la plus économique. Pour contrer ce problème, un projet d'envergure en collaboration avec la Société des Alcools du Québec (SAQ) et visant la récupération du verre a été mis en place au Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure (ÉTS).

Ce mémoire vise à évaluer la faisabilité d'incorporer des particules de verre dans les enrobés bitumineux afin d'obtenir des propriétés semblables ou meilleures aux enrobés conventionnels. Pour ce faire, deux types d'enrobés ont été étudiés soit, un ESG10 qui est un enrobé utilisé en couche de roulement et un GB20 qui est utilisé comme couche de base. Pour le ESG10 et le GB20, un enrobé conventionnel ainsi que des enrobés contenant 10% de verre recyclé, et dont certains ont subi une réduction de la teneur en bitume, ont été fabriqués. Pour tous les enrobés, la performance a été évaluée selon trois critères : 1) l'aptitude au compactage à la PCG, 2) la résistance à l'orniérage et, 3) le module complexe.

Les résultats expérimentaux ont entre autres montré une meilleure performance à l'orniérage des enrobés avec verre lorsqu'il y a réduction de la teneur en bitume comparativement à l'enrobé de référence. Également, on constate que l'ajout de particules de verre n'a pas d'effets significatifs sur la rigidité de l'enrobé. On remarque aussi que l'aptitude au compactage est semblable entre l'enrobé conventionnel et un enrobé avec verre contenant le même volume de bitume effectif. Globalement, la faisabilité d'incorporer des particules de verre dans un enrobé de type ESG10 et GB20 a été prouvée.

Mots-clés : enrobé bitumineux, verre, recyclé, bitume, PCG, orniérage, module complexe

FORMULATION OF ESG10 AND GB20 TYPE BITUMINOUS COATINGS WITH INCORPORATION OF GLASS PARTICLES

Alexandre T.BACHAND

ABSTRACT

Currently in Quebec, the majority of the glass we recycle is subsequently found in landfills. In fact, this situation is mainly caused by the presence of mixed glass that can not be exploited to make new products. Mixed glass is essentially created when the different bottles and containers break during transportation to the sorting centers. Since the selling price at the processing center is too high, the sorting centers send it directly to landfills, which are often the most economical alternative. To counter this problem, a large-scale project in collaboration with the Société des Alcools du Québec (SAQ) aimed at recovering glass was set up at the Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) of the École de technologie supérieure (ETS).

This master thesis aims to evaluate the feasibility of incorporating glass particles in bituminous mix to obtain similar or better properties to conventional asphalt mixes. To do this, two types of asphalt mix have been studied, namely, an ESG10 which is a mix used in the wearing course and a GB20 which is used as a base layer. For ESG10 and GB20, conventional asphalt and asphalt containing 10% recycled glass, some of which suffered a reduction in bitumen content, were manufactured. For all mixes, the performance was evaluated according to three criteria: 1) the compactibility with the gyratory shear compactor, 2) the rutting resistance, and 3) the complex module.

Experimental results have shown, among other things, that the compaction ability is similar between conventional asphalt and glass mix with the same amount of bitumen. Similar or better rutting performance of glass mixes is also observed compared to the reference asphalt when they have undergone bitumen reduction. In addition, it is found that the addition of glass particles has no significant effects on the stiffness of the asphalt. Overall, the feasibility of incorporating glass particles in ESG10 and GB20 type asphalt has been proven.

Keywords : asphalt, glass, recycled, bitumen, rutting resistance, complex module

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Le verre.....	3
1.1.1 Propriétés du verre.....	4
1.1.2 Situation du verre.....	4
1.1.3 Production du verre dans les centres de tri	6
1.1.4 Les différentes alternatives de récupération du verre	6
1.1.5 L’impact environnemental de la réutilisation des particules de verre	8
1.2 Le verre dans les enrobés bitumineux.....	9
1.2.1 Les propriétés du verre dans les enrobés bitumineux	9
1.2.2 Tenue à l’eau.....	10
1.2.3 Résistance à la fatigue.....	11
1.2.4 Résistance aux déformations permanentes	11
1.2.5 Rigidité.....	12
1.2.6 Propriétés thermiques.....	13
1.2.7 Aptitude au compactage.....	13
1.2.8 Adhérence	14
1.2.9 Visibilité.....	14
1.3 Constituants des enrobés bitumineux.....	15
1.3.1 Les granulats	15
1.3.1.1 Caractéristiques des granulats.....	15
1.3.1.2 La nature pétrographique des granulats	16
1.3.1.3 Les différents essais de contrôle des granulats	17
1.3.2 Le liant	17
1.3.2.1 Le comportement du bitume	17
1.3.2.2 Constituants du bitume	19
1.3.2.3 Vieillessement du bitume : phénomène d’oxydation	20
1.3.2.4 Les bitumes modifiés avec polymères	21
1.4 Caractérisation des enrobés bitumineux	22
1.4.1 Types d’enrobés bitumineux.....	22
1.4.1.1 GB20.....	22
1.4.1.2 ESG10.....	23
1.4.2 Méthode de formulation du laboratoire chaussée (LC)	23
1.4.2.1 Combinés granulaires.....	24
1.4.2.2 Exigences volumiques	25
1.5 Comportement mécanique des enrobés bitumineux	29
1.5.1 Comportement viscoélastique linéaire (VEL)	30
1.5.1.1 Module complexe (E*)	30
1.5.1.2 Représentation graphique des résultats.....	32
1.5.1.3 Principe d’équivalence temps-température (PETT).....	36

	1.5.1.4	Modélisation du comportement des matériaux	37
	1.5.1.5	Facteurs influençant le module complexe.....	39
1.5.2		Déformations permanentes	40
	1.5.2.1	Types d'ornières.....	41
	1.5.2.2	Facteurs influençant les déformations permanentes	42
1.6		La chaux.....	43
	1.6.1	Interaction physicochimique de la chaux dans l'enrobé bitumineux.....	43
	1.6.2	Influence de la chaux sur le comportement des enrobés.....	45
	1.6.2.1	Le vieillissement	45
	1.6.2.2	L'adhésion bitume-granulats	46
	1.6.2.3	Les propriétés thermomécaniques des enrobés modifiés à la chaux.....	47
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE			51
2.1		Objectifs.....	51
2.2		Démarche expérimentale	51
2.3		Plan d'essai du ESG10.....	52
2.4		Plan d'essai du GB20.....	54
CHAPITRE 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL			57
3.1		Description des matériaux utilisés	57
	3.1.1	Caractéristiques des granulats de calcaire.....	57
	3.1.2	Caractéristiques du verre recyclé.....	60
	3.1.3	Description du bitume utilisé	61
3.2		Formulation des enrobés bitumineux.....	62
	3.2.1	Exigences de formulation	62
	3.2.2	Incorporation des particules de verre dans les enrobés.....	63
	3.2.2.1	ESG10	63
	3.2.2.2	GB20.....	64
	3.2.3	Présentation des différents combinés granulaires.....	64
	3.2.3.1	ESG10	64
	3.2.3.2	GB20.....	66
3.3		Confection des enrobés.....	68
	3.3.1	Préparation du matériel de malaxage et des matériaux.....	68
	3.3.2	Malaxage.....	70
	3.3.3	Cure.....	71
3.4		Procédure des différents essais réalisés	71
	3.4.1	Essais volumétriques.....	71
	3.4.1.1	Essai de densité maximale (d_{mm}) de l'enrobé	72
	3.4.1.2	Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG).....	72
	3.4.2	Essais thermomécaniques	73
	3.4.2.1	Détermination du module complexe (E^*).....	73
	3.4.2.2	Résistance à l'orniéage	76
	3.4.3	Tenue à l'eau.....	78

CHAPITRE 4	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	81
4.1	Essais volumétriques.....	81
4.1.1	Densité maximale du mélange (d_{mm})	81
4.1.1.1	ESG10.....	81
4.1.1.2	GB20.....	87
4.1.2	L'aptitude au compactage (PCG).....	89
4.1.2.1	ESG10.....	89
4.1.2.2	GB20.....	92
4.1.2.3	Sommaire	94
4.2	Orniérage.....	94
4.2.1	ESG10.....	94
4.2.2	GB20.....	100
4.2.3	Sommaire	102
4.3	Le module complexe (E^*).....	103
4.3.1	ESG10.....	103
4.3.1.1	Facteur a_{TE}	105
4.3.1.2	Le module complexe normalisé.....	106
4.3.1.3	Le module vitreux (E_0), statique (E_{00}) et le facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E}).....	108
4.3.1.4	Courbes maîtresses.....	111
4.3.1.5	Synthèse des valeurs du modèle 2S2P1D	118
4.3.2	GB20.....	119
4.3.2.1	Facteur a_{TE}	120
4.3.2.2	Le module complexe normalisé.....	121
4.3.2.3	Le module vitreux (E_0), statique (E_{00}) et le facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E}).....	123
4.3.2.4	Courbes maîtresses.....	124
4.3.2.5	Synthèse des valeurs du modèle 2S2P1D	128
4.3.3	Sommaire	129
4.4	Tenue à l'eau.....	129
4.5	Résumé des résultats.....	131
4.5.1	ESG10.....	131
4.5.2	GB20.....	132
CONCLUSION.....		133
RECOMMANDATIONS		135
ANNEXE I	FORMULATION DU MÉLANGE DJL DE L'ENROBÉ DE TYPE ESG10.....	137
ANNEXE II	FORMULATION DJL DU MÉLANGE D'ENROBÉ DE TYPE GB20.....	139
ANNEXE III	FICHE TECHNIQUE DU BITUME 70-28.....	141

ANNEXE IV	FICHE TECHNIQUE DU BITUME PG64-28.....	143
ANNEXE V	FICHE TECHNIQUE DE LA CHAUX HYDRATÉE.....	145
ANNEXE VI	RECOMMANDATION DU TYPE DE BITUME SELON LE TYPE D'ENROBÉ ET LA RÉGION CLIMATIQUE	147
ANNEXE VII	NORME 4202-ENROBÉS À CHAUD FORMULÉ SELON LA MÉTHODE DE FORMULATION DU LABORATOIRE DE CHAUSSÉES.....	151
ANNEXE VIII	COURBE GRANULOMÉTRIQUE DES DIFFÉRENTES CLASSES GRANULAIRES	155
ANNEXE IX	FICHE TECHNIQUE DES CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES DES DIFFÉRENTES CLASSES GRANULAIRES	159
BIBLIOGRAPHIE.....		161

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Comparaison entre le compactage des enrobés bitumineux en chantier et le nombre de girations à la presse à cisaillement giratoire	28
Tableau 2.1	Nombre d'essais effectués et quantités pour chaque type de mélange d'enrobé bitumineux	55
Tableau 3.1	Caractéristiques des granulats utilisés pour l'enrobé ESG10	58
Tableau 3.2	Caractéristiques des granulats utilisés pour l'enrobé GB20	59
Tableau 3.3	Propriétés des différentes classes de verre recyclé mixte	61
Tableau 3.4	Propriétés du bitume PG70-28 et PG64-28	62
Tableau 3.5	Caractéristiques granulométriques des enrobés ESG10 testés.....	65
Tableau 3.6	Caractéristiques granulométriques des enrobés GB20 testés.....	67
Tableau 3.7	Températures ciblées pour la confection des enrobés ESG10 et GB20.....	70
Tableau 3.8	Temps et températures de cure pour les différents enrobés en fonction du type d'essai.....	71
Tableau 3.9	Exigences relatives à l'essai d'aptitude au compactage à la PCG pour un enrobé ESG10 et GB20.....	73
Tableau 3.10	Propriétés des enrobés de type ESG10 utilisés pour les essais de module complexe	76
Tableau 3.11	Propriétés des enrobés de type GB20 utilisés pour les essais de module complexe	76
Tableau 3.12	Exigences du MTMDET quant à la résistance à l'orniérage de l'enrobé ..	78
Tableau 3.13	Caractéristiques des éprouvettes des enrobés ESG10 pour la tenue à l'eau.....	80
Tableau 4.1	Résultats des propriétés volumétriques de l'enrobé bitumineux ESG10...	83
Tableau 4.2	Résultats des propriétés volumétriques pour l'enrobé bitumineux GB20	87

Tableau 4.3	Résultats obtenus à la PCG pour un enrobé bitumineux ESG10	90
Tableau 4.4	Résultats obtenus à la PCG pour un ESG10 de référence et un ESG10 avec verre ayant subi une réduction de 6% de bitume.....	92
Tableau 4.5	Résultats obtenus à la PCG pour un enrobé bitumineux de type GB20	93
Tableau 4.6	Résultats des essais à l'orniérage pour le ESG10	95
Tableau 4.7	Pourcentage des vides intergranulaires (VAM) et des vides intergranulaires comblés par le bitume (VCB) pour les enrobés ESG10 ..	96
Tableau 4.8	Teneur en vides des plaques d'orniérage du ESG10 avant et après les 10 000 cycles.....	98
Tableau 4.9	Comparaison du temps d'écoulement entre les particules fines de verre et de calcaire	99
Tableau 4.10	Résultats du GB20 aux essais d'orniérage.....	100
Tableau 4.11	Résultats à l'orniérage pour les enrobés de type GB20	102
Tableau 4.12	Teneur en vides des plaques d'orniérage du GB20 avant et après les 100 000 cycles.....	102
Tableau 4.13	Constantes de WLF à 10°C relatives aux enrobés ESG10	105
Tableau 4.14	Paramètres k, h, δ et β du modèle 2S2P1D pour l'ESG10	107
Tableau 4.15	Valeurs du module statique (E_{00}), du module vitreux (E_0) ainsi que du facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E}) à 10°C pour les enrobés ESG10 testés	108
Tableau 4.16	Paramètres du modèle 2S2P1D pour les enrobés ESG10.....	119
Tableau 4.17	Constantes WLF à 10°C relatives aux enrobés GB20	120
Tableau 4.18	Paramètres k, h, δ et β du modèle 2S2P1D pour le GB20.....	122
Tableau 4.19	Valeurs du module statique (E_{00}), du module vitreux (E_0) ainsi que du facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E}) à 10°C pour les enrobés GB20 testés	123
Tableau 4.20	Paramètres du modèle 2S2P1D pour les enrobés GB20.....	129
Tableau 4.21	Résultats de l'essai de tenue à l'eau pour les échantillons de ESG10	130

Tableau 4.22	Synthèse des résultats des enrobés de type ESG10	131
Tableau 4.23	Synthèse des résultats des enrobés de type GB20	132

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Évolution annuelle de l'utilisation du verre post-consommation	5
Figure 1.2	Divers types d'emplois alternatifs au verre recyclé existant	7
Figure 1.3	Comportement du bitume en fonction de la température et du niveau de déformation imposé.....	18
Figure 1.4	Variation du volume intergranulaire (VAM) de l'enrobé par rapport à la courbe de masse volumique maximale	25
Figure 1.5	Diagramme de phase volumique de l'enrobé.....	26
Figure 1.6	Comportement des enrobés bitumineux.....	29
Figure 1.7	Variation de la contrainte et de la déformation pour un matériau viscoélastique linéaire.....	31
Figure 1.8	Exemple de courbes isothermes d'un module complexe (Éprouvette ESG10V-bv ^{-6%}).....	33
Figure 1.9	Exemple de courbes isochrones d'un module complexe (Éprouvette ESG10V-bv ^{-6%}).....	34
Figure 1.10	Exemple de courbes du module complexe dans le plan Cole-Cole (Éprouvette ESG10V-bv ^{-6%}).....	35
Figure 1.11	Exemple de courbes du module complexe dans l'espace Black (Éprouvette ESG10V-bv ^{-6%}).....	36
Figure 1.12	Représentation graphique des paramètres du modèle 2S2P1D dans le plan Cole-Cole	39
Figure 1.13	Différents types d'ornières.....	41
Figure 1.14	Relation entre la viscosité du bitume et la proportion d'asphaltène	44
Figure 1.15	Différence entre le pourcentage de vides, pour un volume donné, d'un filler de calcaire et de la chaux hydratée.....	45
Figure 1.16	a) Mastic bitumineux contenant de la chaux à la surface d'un granulat de silice b) Réaction des ions de calcium avec les acides du bitume pour former des sels insolubles	47

Figure 2.1	Organigramme du programme d'essais réalisé sur l'enrobé ESG10.....	53
Figure 2.2	Organigramme du programme d'essais réalisé sur l'enrobé GB20.....	54
Figure 3.1	Trois différents types de classe granulaire de verre recyclé mixte utilisés dans ce projet.....	60
Figure 3.2	Courbe granulométrique des enrobés de type ESG10.....	66
Figure 3.3	Courbe granulométrique des enrobés de type GB20.....	68
Figure 3.4	Malaxeurs utilisés en laboratoire a) Malaxeur utilisé pour les gâchées de moins de 10 kg b) Malaxeur chauffant utilisé pour les gâchées de plus de 10 kg.....	69
Figure 3.5	Éprouvette d'enrobé soumise à l'essai de module complexe.....	75
Figure 3.6	Ornièreur.....	77
Figure 4.1	Évolution de la d_{mm} en fonction de la teneur en bitume pour les différents enrobés ESG10.....	84
Figure 4.2	Valeurs de V_{ba} en fonction de la teneur en bitume pour les différents enrobés ESG10.....	86
Figure 4.3	Évolution de la d_{mm} en fonction de la teneur en bitume pour les différents enrobés GB20.....	88
Figure 4.4	Valeurs de V_{ba} en fonction de la teneur en bitume pour les différents enrobés GB20.....	89
Figure 4.5	Résultats de l'essai PCG pour un ESG10 en représentation logarithmique.....	91
Figure 4.6	Résultats de l'essai PCG pour un GB20 en représentation logarithmique.....	93
Figure 4.7	Résultats à l'orniérage des enrobés de type ESG10.....	96
Figure 4.8	Résultats à l'orniérage des enrobés de type GB20.....	101
Figure 4.9	Module complexe des enrobés ESG10 dans le plan Cole-Cole.....	104
Figure 4.10	Module complexe des enrobés ESG10 dans le diagramme de Black.....	105
Figure 4.11	Relation entre les facteurs de translations a_{TE} et la température pour tous les enrobés ESG10.....	106

Figure 4.12	Module complexe normalisé des enrobés ESG10 a) dans le plan Cole-Cole b) dans le diagramme de Black	107
Figure 4.13	Comparaison des valeurs de E_0 en fonction de la teneur en vides pour les enrobés ESG10 testés	109
Figure 4.14	Comparaisons des valeurs de τ_{0E} en fonction du V_{be} pour les enrobés ESG10 à 10°C	111
Figure 4.15	Courbes maîtresse des enrobés ESG10 selon la norme du module complexe $ E^* $	112
Figure 4.16	Courbe maîtresse de l'angle de phase pour les enrobés ESG10	113
Figure 4.17	Comparaison des écarts entre les normes du module complexe du ESG10V-bv et du ESG10R-br.....	115
Figure 4.18	Comparaison des écarts entre les normes du module complexe des enrobés ayant subi une réduction de bitume et le ESG10V-bv.....	116
Figure 4.19	Comparaison des écarts entre les angles de phase du ESG10V-bv et du ESG10R-br	117
Figure 4.20	Comparaison des écarts entre les angles de phase des enrobés ayant subi une réduction de bitume et le ESG10V-bv.....	118
Figure 4.21	Module complexe des enrobés GB20 dans le plan Cole-Cole.....	119
Figure 4.22	Module complexe des enrobés GB20 dans le diagramme de Black.....	120
Figure 4.23	Relation entre les facteurs de translations a_{TE} et la température pour tous les enrobés GB20	121
Figure 4.24	Module complexe normalisé des enrobés GB20 dans (a) le plan Cole-Cole, (b) le diagramme de Black	122
Figure 4.25	Comparaison des valeurs de τ_{0E} en fonction du V_{be} pour les enrobés de type GB20 à 10°C	124
Figure 4.26	Courbes maîtresses des enrobés GB20 selon la norme du module complexe $ E^* $	125
Figure 4.27	Courbes maîtresses des enrobés GB20 selon l'angle de phase.....	126
Figure 4.28	Différence entre la norme du complexe de l'enrobé GB20V-bv+CH et GB20R-br	127

Figure 4.29	Différences entre l'angle de phase de l'enrobé GB20V-b _v +CH et GB20R-b _R	128
-------------	---	-----

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2S2P1D	Combinaison de deux ressorts, deux patins et un amortisseur
AASHTO	American Association of States Highway and Transportation Officials
Abs	Absorption
ASTM	American Society for Testing and Materials
CREATE	Centre de Recherche en économie de l'Environnement, de l'Agroalimentaire, des Transports et de l'Énergie
Éch.	Échantillon
ESG	Enrobé semi-grenu
ÉTS	École de technologie supérieure
EVA	Ethylène-Vinyle-Acétate
GB	Grave bitume
GNM	Grosseur Nominale Maximale
ITSM	Indirect tensile stiffness modulus
LA	Los Angeles
LC	Laboratoire des chaussées
LCPC	Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées
LCMB	Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux
Max	Maximum
MD	Micro-Deval
MLPC	Matériel du Laboratoire des Ponts et Chaussées
Moy.	Moyenne
MTMDET	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports

MTQ	Ministère des Transports du Québec
MTS	Materials Testing Systems
PETT	Principe d'Équivalence Temps Température
PCG	Presse à Cisaillement Giratoire
PG	Grade de performance d'un bitume (Performance Grade)
SAQ	Société des alcools du Québec
SBS	Styrène-Butadiène-Styrène

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
°	Degré
°C	Degré Celsius
Ø	Diamètre
α	Coefficient de régression du module complexe (sans dimension)
β	Coefficient de régression du module complexe (sans dimension)
δ	Coefficient de régression du module complexe (sans dimension)
η	Viscosité newtonienne d'un amortisseur
φ	Angle de déphasage
μm	Micromètre
σ_o	Contrainte de rupture effective
τ_E	Facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D
ω	Vitesse angulaire
$a_T\text{-Fr}$	Fréquence équivalente
A_o	Coefficient de régression du module complexe (sans dimension)
A_1	Coefficient de régression du module complexe (sans dimension)
A_2	Coefficient de régression du module complexe (sans dimension)
AT	Stabilité des éprouvettes des enrobés bitumineux avec trempage
b%	Pourcentage massique de bitume
C_1	Constante du module complexe
C_2	Constante du module complexe
cm	centimètre

d_{gb}	Densité du granulat brute
d_{ga}	Densité du granulat apparente
d_{ge}	Densité du granulat effectif
d_{mm}	Densité maximale du mélange
d_{mb}	Densité brute de l'enrobé
E^*	Module Complexe
$ E^* $	Norme du Module Complexe
E_{00}	Module statique
E_0	Module vitreux
E_1	Composante élastique
E_2	Composante visqueuse
Fr	Fréquence
g	Gramme
h	Hauteur
Hz	Hertz
i	Nombre complexe
k	Exposant pour analyse des modules complexes
kg	Kilogramme
kPa	Kilopascal
kN	Kilonewton
L	Litre
m	Masse

min	Minute
mm	Millimètre
MPa	Mégapascal
N	Newton
N	Nombre de girations
Pa	Pascal
P _{ba}	Pourcentage de bitume absorbé
s	Écart-type
S _o	Module de rigidité
S.O.	Sans objet
ST	Stabilité des éprouvettes d'enrobé sans trempage
T°	Température
V	Verre
V _{ba}	Volume de bitume absorbé
V _{be}	Volume de bitume effectif
V _i	Volume des vides

INTRODUCTION

Depuis quelques années au Québec, la situation du verre post consommation fait ombrage au tournant environnemental auquel la province tente d'adhérer. En fait, les chiffres montrent qu'en 2015, plus de 67% du verre recueilli par les centres de tri se retrouvait par la suite dans les centres d'enfouissement. Puisque les contenants de verre se brisent dans les bacs de recyclage et lors de la collecte sélective, les différents types de verre se mélangent entre eux pour former ce qu'on appelle le verre mixte. Puisque le verre mixte ne peut être utilisé pour produire de nouveau contenant de verre et que son envoi vers les centres de conditionnement coûte cher aux centres de tri, la solution la plus viable pour eux est d'acheminer directement ce type de verre dans les centres d'enfouissement où il est utilisé comme matériaux de recouvrement et comme chemins d'accès.

Puisque cette alternative représentant une faible valeur ajoutée pour le verre, la SAQ ainsi que différents partenaires tel qu'Éco Entreprise Québec ont décidé d'investir dans la recherche afin de trouver de nouveaux débouchés au verre mixte. D'abord en 2004, en lançant la chaire de recherche portant sur la possibilité d'incorporer du verre dans le béton en collaboration avec l'université de Sherbrooke, mais également en 2013 en finançant un projet de recherche sur l'incorporation du verre dans les structures de chaussée. Ce projet a été mis sur pied au Laboratoire des chaussées et des matériaux bitumineux (LCMB) de l'ÉTS et porte sur la capacité à utiliser le verre comme matériau de fondation ou sous-fondation, ainsi que comme granulats dans les enrobés bitumineux. C'est d'ailleurs dans cette phase, portant sur les enrobés bitumineux, que se penche ce projet de maîtrise.

Ce mémoire porte sur la formulation d'enrobé bitumeux comportant 10% de verre mixte post consommation. L'objectif était principalement de formuler et de comparer les performances mécaniques d'enrobés incorporant du verre par rapport à des enrobés conventionnels et ce, dans le but : 1) d'évaluer la possibilité d'incorporer du verre dans les enrobés bitumineux et 2) de pouvoir formuler des enrobés qui offrent des performances comparables à celles d'enrobés de référence de manière à promouvoir ainsi sa mise en marché. Pour ce faire, deux types

d'enrobés bitumineux ont été choisis afin d'être modifiés et comparés soit, l'enrobé de surface ESG10 et l'enrobé de base GB20. Cette comparaison s'est effectuée au niveau des propriétés volumiques, thermomécaniques et de durabilité suivant les exigences de la méthode de formulation LC, mais également au niveau de la teneur en bitume de chaque type d'enrobé.

La première partie de ce mémoire constitue un survol des différentes notions utiles à la compréhension des enrobés bitumineux, mais également des différentes études et recherches qui ont déjà été réalisées sur le sujet. Dans un deuxième temps, la méthodologie, qui comprend les objectifs et le plan expérimental, est présentée. La présentation des matériaux utilisés, la formulation et la confection des enrobés, ainsi que les procédures d'essais sont ensuite traitées dans un troisième chapitre. Pour terminer, la présentation des résultats ainsi que l'analyse de ceux-ci sont détaillées.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre fait un survol des connaissances et de la littérature traitant des notions qui sont en relation avec ce projet de maîtrise. La revue de littérature est essentielle afin de bien comprendre les paramètres de la recherche, mais également afin de connaître les différentes études et recherches qui ont déjà été réalisées sur le sujet. Dans un premier temps, un résumé des connaissances sur le verre recyclé au Québec ainsi que sur l'impact de son utilisation dans les enrobés bitumineux sont présentés. Ces deux sections permettront notamment de bien comprendre la nécessité du projet de recherche proposé, ainsi que de prendre connaissance des paramètres qui ont déjà été étudiés dans les enrobés avec verre. Ensuite, une brève explication des composants que l'on retrouve dans l'enrobé tel que les granulats et le liant, ainsi que des différents types d'enrobés et de la méthode de formulation présentée. Ces sections englobent des connaissances nécessaires à la compréhension de la formulation d'enrobés bitumineux. Par la suite, certains comportements mécaniques de l'enrobé sont traités afin de mieux comprendre les essais d'orniérage et de module complexe qui ont été réalisés dans le cadre de ce projet. Pour terminer, une description d'un additif essentiel à la bonne tenue des enrobés incorporant du verre, soit la chaux hydratée, et son effet sur ces enrobés est présentée.

1.1 Le verre

Avant d'incorporer des granulats de verre dans les enrobés bitumineux, il est intéressant de bien connaître ce matériau et les enjeux qui l'entourent. Dans cette section, les caractéristiques du verre, la problématique quant à sa récupération, sa transformation dans les centres de tri, ainsi que ses différents débouchés sont traités afin de mieux comprendre ce matériau ainsi que la nécessité de sa récupération.

1.1.1 Propriétés du verre

Le verre est un matériau essentiellement composé de silice amorphe (SiO_2) employé pour fabriquer une multitude de produits. C'est un matériau qui, chauffé à des températures entre 550°C et 1400°C , peut être travaillé afin d'obtenir plusieurs formes pour différents usages. Le verre présente toutefois un comportement fragile à température ambiante. Le verre est un matériau dit inerte, c'est-à-dire qu'il ne réagit pas avec les autres matériaux et qu'il ne se décompose pas. En fait, s'il est recyclé, le verre de même nature peut être réutilisé à répétition pour créer de nouveaux produits (Shelby, 2005). Il existe plusieurs catégories de verre dont les plus communes sont le verre plat et le verre creux. Le verre plat est entre autres connu pour son usage dans la confection des vitres d'automobile, tandis que le verre creux est plutôt utilisé pour les contenants et bocaux. Il existe également différents types de verre creux qui se divisent en quatre sous-catégories : 1) le verre vert 2) le verre brun 3) le verre incolore et, 4) le verre mixte. Le verre mixte est constitué d'un mélange des trois premiers types de verre. Il est formé lorsque des bouteilles ou des contenants de différentes couleurs se brisent et se mélange dans les bacs de recyclage ou lors du transport vers les centres de tri. Le problème avec le verre mixte est qu'il n'est pas recyclable. De ce fait, seuls les verres de mêmes couleurs peuvent se recycler (Recyc-Québec, 2010).

1.1.2 Situation du verre

Depuis 2009, le verre mixte est devenu un problème pour les centres de tri du Québec. En effet, lorsque ceux-ci se départaient de leur verre mixte en 2008, ils obtenaient des entreprises de conditionnement du verre, un montant se situant autour de 4\$/tonne. Toutefois, ce taux est passé à -4\$/tonne en 2009, c'est donc dire que les centres de tri devaient déboursier 4\$/tonne pour se départir de ce type de verre (Recyc-Québec, 2016). La fermeture du plus gros conditionneur de verre au Québec en 2013, qui traitait près de 80% du verre, n'a également pas amélioré la condition (Recyc-Québec, 2012). En fait, la situation n'a cessé d'empirer, car maintenant, depuis 2016, il en coûte environ 28 \$/tonne aux centres de tri afin d'écouler le verre mixte. C'est essentiellement la difficulté à séparer ce type de verre par couleur, ainsi que le manque de ressource pour le faire qui explique ce phénomène. La proportion de verre mixte

récupéré au Québec étant d'environ 75%, les centres de tri ne peuvent pas se permettre d'acheminer ce verre au central de recyclage. Après avoir réalisé un sondage auprès de vingt-quatre centres de tri au Québec, Recyc-Québec relate que 25% du verre a été envoyé afin d'être recyclé, 67% a été envoyé dans les centres d'enfouissement afin d'être utilisé comme matériau de recouvrement journalier et 8% seulement ont été stockés pour des projets visant à récupérer le verre (Recyc-Québec, 2015). On peut donc en conclure que la quasi-totalité du verre mixte sert maintenant de matériau de recouvrement dans les centres d'enfouissement et que la situation ne va pas en s'améliorant (Figure 1.1). Cette solution est considérée comme ayant une faible valeur ajoutée en termes de récupération du verre, car cette étape pourrait être effectuée avec des matériaux de moins grande qualité. Plusieurs projets sont toutefois en cours afin de remédier à la situation et de trouver une façon de réutiliser les particules de verre mixte avec une plus grande valeur ajoutée. Parmi ceux-ci, on retrouve l'incorporation des particules de verre dans le béton pour la construction de trottoir ainsi que dans d'autres ouvrages du genre. Il y a aussi l'incorporation du verre dans les enrobés bitumineux et dans les différentes structures de chaussée qui depuis 2013 au Québec, est une solution mise en valeur à l'ÉTS.

Utilisation du verre	août 2013	Mai 2014	Novembre 2014	Mars 2015
Acheminé aux fins de recyclage	23 %	35 %	37 %	25 %
Ne trouve pas preneur (entreposé)	39 %	3 %	6 %	8 %
Utilisé dans les LET pour matériel de recouvrement journalier et chemin d'accès	38 %	62 %	57 %	67 %

Figure 1.1 Évolution annuelle de l'utilisation du verre post-consommation
Tirée de Recyc-Québec (2015)

1.1.3 Production du verre dans les centres de tri

Il existe une trentaine de centres de tri qui sont situés sur le territoire québécois. Ces usines reçoivent les matières provenant de la collecte sélective et les séparent de manière mécanique et manuelle. Les matières sont ensuite broyées et tamisées pour obtenir la taille recherchée, puis vendues à des entreprises qui s'en serviront pour créer de nouveaux produits (Laroche-Paquet, 2015). Comme mentionné précédemment, le verre représente un défi pour les centres de tri puisqu'il en existe plusieurs types qui arrivent souvent brisés, ce qui les rend plus difficiles à trier. En plus d'être mélangé avec d'autres types de verre, les matières provenant de la collecte sélective contiennent également des résidus indésirables qui nuisent à la valeur de revente du verre. À cause entre autres des étiquettes, des collets et des bouchons des récipients, on retrouve des particules de papier, de plastique et d'aluminium suite au broyage du verre. Plusieurs investissements ont été effectués afin de moderniser les équipements de tri pour pallier à ce problème. D'ailleurs, l'entreprise Machinex de Plessiville a mis en fonction à l'été 2016 un équipement qui transforme le verre en particule par implosion plutôt que par broyage. En fait, les morceaux de verre se frappent les uns contre les autres pour se fracasser et passent ensuite sur des tamis. Cette manière de procéder améliore le tri du verre produisant moins de particules fines et éliminant les résidus indésirables (Dumouchel, 2016). Bien sûr cette méthode ne règle pas le problème du verre mixte, mais il permet de créer un verre plus propre pour les différents débouchés alternatifs, et ce, à un coût de production plus modique.

1.1.4 Les différentes alternatives de récupération du verre

La problématique du verre a obligé certaines entreprises à innover pour trouver des utilisations alternatives au verre mixte. Au Québec, l'incorporation de particules de verre post consommation a d'abord été expérimentée dans les bétons hydrauliques. Puis en 2013, la SAQ a lancé un projet en collaboration avec l'ÉTS visant à introduire les particules de verre mixte dans les structures de chaussée. Depuis, différentes façons d'incorporer le verre ont été étudiées tant au niveau des fondations de la chaussée que dans les enrobés bitumineux. Introduire le verre dans les enrobés permettrait d'en écouler une grande quantité tout en lui donnant à la fois

une plus grande valeur ajoutée que s'il est acheminé vers un centre d'enfouissement. D'autres options peuvent également être envisagées, celles-ci sont présentées dans la Figure 1.2.

Type de débouchés	Avantages	Niveau de maturité	Valeur du produit (par tonne)
Filtres pour l'eau potable, l'eau de piscine et les eaux usées	Résiste mieux à la prolifération des bactéries, réduit le lavage à contre-courant (backwash) et diminue le gaspillage d'eau	Marché en développement	65 \$ à 295 \$
Abrasifs	Pas de métaux lourds ni de silice libre, angles qui augmentent la performance.	Marché en développement, existe depuis ~7 ans	200 \$ à 300 \$
Laine de verre	Produit recyclé, température de fonte plus basse	Existe depuis 10 ans	90 \$
Béton avec poudre de verre pour travaux non structurels (trottoirs, mobilier urbain, murs antibruit, etc.)	Se travaille mieux, plus résistant sur certaines surfaces	Marché en croissance	150 \$ à 200 \$

Figure 1.2 Divers types d'emplois alternatifs au verre recyclé existant
Tirée de Dumouchel (2016)

La consigne

La réalité du verre recyclé a été davantage médiatisée depuis quelques années au Québec. Ainsi, l'idée de consigner les bouteilles de vin a pris de l'importance, car celles-ci représentent 50% du verre retrouvé dans les bacs de récupération. C'est un débat où chacun possède arguments et opinions, mais pour le moment, le gouvernement du Québec maintient le statu quo sur la situation. D'un côté, il y a ceux qui sont en faveur de la consigne des bouteilles de vin. D'abord, parce qu'ils considèrent que ce serait une façon simple de conscientiser les gens au recyclage puisque le prix de la consigne serait situé entre 20 et 25 cents pour une bouteille de 750 ml (Lessard, 2015). Ils allèguent que la consigne permettrait de trier les bouteilles par couleur ce qui éviterait de générer du verre mixte et tous les inconvénients que cela engendre. De l'autre côté, il y a ceux qui affirment que la consigne ne réglerait rien du tout et que la solution est ailleurs. D'abord, parce que les bouteilles de vin ne représentent pas l'entièreté du verre recyclé dans les foyers. En effet, il y a également les bocaux et récipients alimentaires qui devront toujours dépendre de la collecte sélective. Bacs+ (2017), une filiale d'Éco Entreprise Québec, croit même que la consigne empirait la situation actuelle, car en diminuant

la quantité de verre à trier, il n'y aurait plus d'avantages à faire des investissements dans les centres de tri. En définitive, elle croit que la réelle solution est la modernisation des centres de tri pour répondre à la demande et que la collecte sélective reste la meilleure solution. De plus, le projet de consigne, qui avait été mis de l'avant à l'été 2015, a été peu à peu abandonné à la suite du rapport du centre de recherche CREATE de l'université Laval. Celui-ci concluait entre autres que le meilleur système était probablement celui déjà existant. Malgré le refus d'adhérer à la consigne, les entreprises québécoises ne restent toutefois pas inactives dans leurs tentatives de palier aux problèmes du verre. En effet, des investissements sont faits dans les centres de tri, ainsi que dans la recherche afin de trouver des solutions viables et écologiques pour le verre.

1.1.5 L'impact environnemental de la réutilisation des particules de verre

Le verre post-consommation mixte peut être utilisé comme matériau de construction en l'incorporant notamment dans le béton hydraulique ou dans les structures de chaussée. Par conséquent, il est important de savoir si celui-ci peut avoir un impact sur l'environnement lorsqu'il est employé ainsi. En fait, c'est surtout lorsqu'il est utilisé comme couche de fondation ou encore lorsqu'il est entreposé à l'extérieur qu'il pourrait y avoir un risque que les composants chimiques à sa surface créent du lixiviat et contaminent les sols. Une étude de Imteaz et al. (2012) visant à connaître l'impact du verre comme matériau de construction a été réalisée en 2012. Celle-ci consistait à tremper les particules de verre dans l'eau, dans une solution acide et dans une solution basique pour y observer la quantité et le type de constituants recueillis. L'étude conclut entre autres que le verre engendre une certaine concentration de sulfate (820 mg kg^{-1}) et de chlorure (730 mg kg^{-1}) sans toutefois dépasser la limite acceptable établie à 3000 mg kg^{-1} pour les contaminants inorganiques. Elle conclut également que le seul métal lourd contenu dans les mélanges de verre pouvant être problématique est le fer avec une concentration de 77 mg/kg , soit 27 mg/kg de plus que la limite permise. Toutefois, la quasi-totalité de cette concentration provient du trempage en solution acide. Le verre peut donc être employé sans problèmes comme matériau de construction et c'est encore plus vrai lorsqu'il est

incorporé dans l'enrobé bitumineux ou dans le béton lorsque les particules de verre ne sont pas en contact direct avec les sols ou l'environnement.

1.2 Le verre dans les enrobés bitumineux

Il existe déjà plusieurs recherches vis-à-vis l'utilisation du verre dans les enrobés bitumineux et ce, depuis plus d'une quarantaine d'années. En fait, les premiers signes d'intérêt visant l'incorporation du verre dans l'enrobé sont apparus à la fin des années 60. Au total, quarante-cinq routes à vitesse réduite ont été construites entre 1968 et 1988 au Canada et aux États-Unis (Halstead, 1992). Toutefois, à cause du prix du verre qui a augmenté, l'idée est quelque peu tombée dans l'oubli (Watson, 1988). Un nouvel engouement est ensuite apparu vers la fin des années 80 et a relancé le projet du verre, particulièrement sur la côte est-Américaine. Des routes ont été construites et des recherches en laboratoire ont été réalisées afin de tirer des conclusions quant aux avantages et aux inconvénients de l'utilisation du verre dans les enrobés bitumineux. Depuis quelques années, avec la situation du verre mixte, les études sur la capacité d'incorporer ce matériau dans les routes ont repris afin de trouver des solutions et des alternatives viables. Cette section présente les résultats et les conclusions des précédentes études par rapport à l'impact du verre sur les différentes propriétés des enrobés bitumineux.

1.2.1 Les propriétés du verre dans les enrobés bitumineux

Le verre est un matériau qui est concassé et tamisé dans les centres de tri. On peut donc retrouver plusieurs tailles de particules de verre selon les besoins. La taille des particules aura un impact sur les propriétés des enrobés bitumineux. En fait, on indique que la taille maximale du granulat de verre devrait être 4,75mm (Wu, Yang & Xu, 2004). L'emploi d'un verre plus grossier risque d'endommager les pneus des véhicules et la cohésion avec le bitume est moins efficace étant donné une surface spécifique plus faible (Wu et al. 2004). Les particules de verre grossier (>4,75mm) ont également des chances de se fragmenter lors de la fabrication et de la mise en place d'un enrobé bitumineux ou, lorsqu'il sera soumis aux charges des véhicules. Les particules de verres plus fines, par contre, ont moins tendance à se fragmenter permettant une meilleure adhérence avec le bitume (Wu et al. 2004). Une étude comparative entre des

particules de granulats de calcaire et celles de granulats de verre indiquent également que les particules fines de verres sont moins friables, moins sensibles à l'usure et par conséquent, plus durables (Bernard, 2015).

Notons finalement que plusieurs études ont également cherché à déterminer le pourcentage optimal de verre pouvant être incorporé dans l'enrobé. Dans presque tous les cas, les enrobés contenant un pourcentage se situant entre 10% et 15% offraient les meilleures performances vis-à-vis des différents essais (Wu et al. (2004), Sajed & Shafabakhsh (2014), Arabani, Mirabdolazimi & Ferdowsi (2012), Airey, Collop & Thom (2004), Lachance-Tremblay, Vaillancourt & Perraton (2016)).

1.2.2 Tenue à l'eau

Plusieurs études montrent qu'un enrobé bitumineux incorporant des particules de verre est plus vulnérable en présence d'eau à cause, notamment, du manque d'adhésion entre le bitume et les matériaux siliceux tel que le verre (Apeageyi, Grenfell & Airey (2015), West, Page & Kenneth (1993), Halstead (1992), Lachance-Tremblay et al. (2016)). Ce phénomène est principalement dû à la nature siliceuse des granulats de verre qui ont une moins bonne affinité physio-chimique avec le bitume. Ces études montrent et recommandent d'ailleurs l'emploi d'un additif comme la chaux hydratée pour éviter le phénomène de désenrobage.

Dans la plupart des cas, l'évaluation de la tenue à l'eau se fait de façon visuelle ou par mesure de la perte d'une propriété mécanique (Lachance-Tremblay, Perraton, Vaillancourt & Di Benedetto, 2017). Lachance-Tremblay et al. (2017) ont toutefois voulu comparer la tenue à l'eau entre des enrobés avec 20% de verre et des enrobés standards, en évaluant l'impact sur le module complexe d'éprouvettes soumises à des cycles de trempages et de gel-dégel. Dans les deux types d'enrobé testés, l'ajout de 2% de chaux hydratée a été préconisé. Les résultats ont montré que globalement le module complexe de l'enrobé avec verre était plus faible que celui de l'enrobé standard après trois cycles de gel-dégel pour la majorité des températures et

fréquences testées. Toutefois, les modules complexes étaient similaires lorsque les éprouvettes étaient soumises à dix cycles de gel-dégel.

1.2.3 Résistance à la fatigue

Au niveau de la résistance à la fatigue, certaines études montrent que le verre n'a pas de réel effet sur ce comportement et que la nature des granulats influence peu la résistance en fatigue (Airey et al. (2004), Lachance-Tremblay et al. (2016)).

D'autres études montrent toutefois une amélioration de la résistance en fatigue de l'enrobé de verre. Arabani et al. (2012) expliquent qu'un mélange avec 15% de verre concassé améliore la résistance à la fatigue, car le verre, ayant une plus grande angularité, fait en sorte que les granulats sont plus ancrés, ce qui engendre un squelette granulaire dans lequel les granulats sont plus interverrouillés. Cette structure est alors meilleure pour empêcher les déplacements en cisaillement ce qui limite la propagation de fissures. Toutefois, bien que cette hypothèse soit logique, Arabani et al. (2012) utilisent également de la chaux dans ses mélanges et il a été prouvé que l'effet chimique de la chaux sur le bitume augmente la résistance à la fatigue d'un enrobé (Little & Petersen, 2005).

1.2.4 Résistance aux déformations permanentes

Une étude récente a montré qu'un enrobé contenant 10% de verre offrait de moins bonnes performances à l'orniérage qu'un enrobé sans verre et ce, pour le même volume de bitume effectif (V_{be}) (Lachance-Tremblay et al. 2016). En fait, certains enrobés avec verre soumis à l'essai d'orniérage de type MLPC ne respectent pas les exigences du MTMDET. Lachance-Tremblay et al. (2016) expliquent en partie ce phénomène par le fait que les particules de verre sont plus lisses, ce qui crée moins de friction au niveau du squelette granulaire et du même coup, plus de possibilités de mouvements pour les granulats.

Une autre étude menée par Airey et al. (2004) va dans le même sens en montrant une moins bonne résistance à l'orniérage pour des enrobés dont le verre représentait 50% de la masse

totale des granulats en se référant à l'essai "Confined Repeated Load Axial Test (CRLAT)" (T_{essai} :40°C). La texture lisse des granulats de verre est encore une fois mise de l'avant pour expliquer ce comportement.

Toutefois, Sajed & Shafabakhsh (2014) montrent que l'ajout de verre augmente la résistance à l'orniérage jusqu'à une teneur optimale de 15%. Cette amélioration des performances serait due à la plus grande angularité des particules de verre qui offrirait plus de contact entre les granulats et solidifierait le squelette granulaire.

1.2.5 Rigidité

Des chercheurs ont étudié l'influence de l'ajout du verre dans des enrobés incorporant de la chaux hydratée vis-à-vis le module de rigidité en considérant la méthode *Indirect Tensile Stiffness Modulus* (ITSM). Les résultats des essais, qui ont été effectués pour différentes teneurs en verre (0%, 5%, 10%, 15%, 20%), ont montré que l'ajout de verre augmente la rigidité de l'enrobé jusqu'à une valeur optimale en verre de 15% (Arabani (2010), Sajed & Shafabakhsh (2014)). Les études mentionnent entre autres que ce phénomène est dû à la grande angularité des particules de verre qui crée une friction entre les granulats ce qui augmente la rigidité de l'enrobé. Dans le cas des teneurs en verre dépassant la teneur optimale, le module de rigidité diminue avec l'augmentation de la proportion en verre. Bien que l'angularité des granulats puisse avoir un effet quant à l'augmentation du module de rigidité, il faut noter que la chaux hydratée est utilisée et que celle-ci donne une plus grande rigidité au mastic et une meilleure adhésion entre le bitume et l'ensemble des particules.

Airey et al. (2004), ont également fait l'étude du module de rigidité suivant la méthode ITSM. D'abord, les résultats ont montré que l'enrobé avec verre, ne contenant pas de chaux, avait une rigidité très semblable, quoique légèrement plus faible, à celle d'un enrobé de référence avec calcaire. Airey et al. (2004) ont également fait subir un vieillissement contrôlé par trempage en laboratoire aux éprouvettes d'enrobés. Les résultats ont montré que, suite au vieillissement, l'accroissement du module de rigidité d'un enrobé avec verre était nettement moins grand que

celle d'un enrobé conventionnel. Selon les auteurs, cette situation pourrait être due au fait que les particules de verre absorbent moins le bitume que les granulats de calcaire. De ce fait, lors du vieillissement, les constituants légers et plus volatiles du bitume ne vont pas s'incruster dans les pores du granulat comme c'est le cas avec les granulats de calcaire. Ces mêmes constituants jouent un rôle dans la rigidité et comme mentionné précédemment, seul le bitume qui n'est pas absorbé par les granulats a un impact sur les propriétés des enrobés.

Une autre étude, plus récente, sur la raideur des enrobés montre que l'ajout de verre n'a pas de réelle influence sur la rhéologie de l'enrobé (Lachance-Tremblay et al., 2016). En fait, les conclusions de l'étude indiquent que l'ajout de verre diminuerait légèrement la rigidité des enrobés.

1.2.6 Propriétés thermiques

Au niveau thermique, on affirme que les enrobés bitumineux avec verre gardent plus longtemps la chaleur que les enrobés conventionnels. C'est entre autres à cause de la nature isolante et de la basse conductibilité thermique des granulats de verre (Dickson, 1973). Cette propriété devient pratique lors de la mise en place de l'enrobé par temps froid. Toutefois, il est également un désavantage lors de la mise en place par temps chaud, car le mélange se solidifiant moins rapidement, devient instable lors du passage du rouleau compacteur (Hughes, 1990).

1.2.7 Aptitude au compactage

Il a été montré que l'aptitude au compactage des enrobés s'améliorait avec l'augmentation de la proportion de verre dans l'enrobé (Hughes, 1990). Suivant une étude sur des enrobés testés à la presse à cisaillement giratoire (PCG), les résultats ont montré que l'augmentation de la proportion de verre a une influence positive quant à l'aptitude au compactage de l'enrobé (Lachance-Tremblay et al., 2016). Pour ce qui est de la différence entre la compaction d'un enrobé sans verre et avec verre, on constate que les enrobés avec verre contiennent des pourcentages de vides plus bas dans toutes premières girations de l'essai PCG, mais que pour

un pourcentage en verre de 10%, le pourcentage de vides à 200 girations est plus élevé que pour le mélange de référence. Cette amélioration de la compaction pourrait être due, d'une part, à la texture plus lisse des particules de verre permettant ainsi un meilleur mouvement relatif entre les particules du squelette granulaire (Hughes, 1990) et, d'autre part, au fait que les enrobés de verre gardent leur chaleur plus longtemps (voir §1.2.6).

1.2.8 Adhérence

Suite à un essai au pendule *Skid Resistance Tester* (SRT), les résultats ont montré que la rugosité de la surface d'un enrobé avec verre était très similaire à celle d'un enrobé conventionnel (Lachance-Tremblay et al., 2016). Toutefois, certaines études énoncent que l'utilisation d'un trop grand pourcentage de particules de verre nuit à l'adhérence du pneu à la chaussée (Halstead, 1992; Dembecki, 1992; West et al., 1993). De trop grosses particules de verre auraient également un effet néfaste sur l'adhérence pneu/chaussée (Dembecki, 1992). Des études montrent également que les particules de verre à la surface ont tendance à se détacher de l'enrobé en service (West et al., 1993; Watson, 1992; Foster, 1970). Le phénomène d'adhésivité entre les granulats et les granulats de silice comme le verre est davantage traité dans la section 1.6.1 de la revue de littérature.

1.2.9 Visibilité

Lorsque le verre est incorporé dans l'enrobé et que les véhicules circulent sur la chaussée, la surface est polie par les pneus des véhicules, ce qui retire le bitume des particules de verre et de calcaire qui sont, dès lors, exposées à la surface. Cette situation peut faire en sorte que le soleil reflète sur ces particules exposées et donne un effet d'éblouissement aux usagers (Dembecki, 1992). Le problème se manifeste également la nuit lorsque la lumière des phares des véhicules est réfléchi par les particules de verre. Toutefois, ces éblouissements étaient surtout perçus sur des routes où le pourcentage de verre dans l'enrobé était de 50% et plus et pour des particules de verre de taille plus grossière, allant jusqu'à 10 mm.

1.3 Constituants des enrobés bitumineux

L'enrobé bitumineux est constitué de deux principaux éléments soit le liant et les granulats. Les granulats, comme le liant, possèdent plusieurs caractéristiques qui influencent le comportement des enrobés. Celles-ci sont traitées dans la présente section.

1.3.1 Les granulats

Dans un mélange d'enrobé, les granulats représentent environ 95% du poids, le reste étant du liant. Ce sont des particules de matières solides qui peuvent provenir de pierre ou de matériaux recyclés (Aitcin et al., 1992).

1.3.1.1 Caractéristiques des granulats

La propriété première des granulats dans les enrobés est de redistribuer les charges dans les couches inférieures de la chaussée et des sols d'infrastructure. Toutefois, pour bien gérer et absorber ces charges, l'angularité, la forme et la surface du granulat sont importantes pour former un squelette granulaire solide qui résiste aux charges (Di Benedetto & Corté, 2004).

La forme

La forme du granulat peut être définie comme étant cubique, aplatie ou encore allongée. Elle aura un impact sur le squelette granulaire d'un enrobé bitumineux. Par exemple, un granulat trop allongé et plat risque de se briser lors du malaxage, du compactage, ou encore lors du passage du trafic (Di Benedetto & Corté, 2004). L'essai LC21-265 permet de déterminer le pourcentage de particules plates et allongées d'un échantillon de granulat.

L'angularité

L'angularité des granulats est également un facteur essentiel pour que l'enrobé supporte bien les charges. L'emploi de matériau concassé venant de carrières est recommandé puisque, contrairement aux granulats naturels qui sont arrondis, les granulats concassés possèdent une

angularité élevée. Cette angularité permet aux granulats de bien s'ancrer entre eux, ce qui limite les déplacements relatifs et offre une meilleure résistance à l'orniérage. (Di Benedetto & Corté). Les particules à angularité élevée permettent également d'obtenir une meilleure macrotexture à la surface de l'enrobé. Celle-ci permet une meilleure évacuation des eaux de surface, mais permet également une meilleure déformation des pneus sur la surface de l'enrobé, ce qui entraîne une adhérence supérieure pour les véhicules (Perraton, 2015).

La surface

La surface du granulat joue également un rôle important lors de la confection d'un enrobé. Elle peut être lisse ou rugueuse, ce qui aura un impact sur la microtexture. Un enrobé avec une texture superficielle plus rugueuse aura davantage de micro-aspérité à la surface du granulat. Ces micro-aspérités offrent une meilleure microtexture ce qui permet d'obtenir des enrobés qui offrent une meilleure adhérence pneus-chaussée (Perraton, 2015). La surface du granulat aura également un impact sur le squelette granulaire et sur l'efficacité des points de contact entre les particules (Lamothe, 2004). Une surface plus lisse facilite la compaction, mais offre une moins bonne résistance à l'orniérage étant donné qu'elle permet davantage de mouvements entre particules.

1.3.1.2 La nature pétrographique des granulats

La nature pétrographique des granulats influe également sur les propriétés de l'enrobé bitumineux. Elle englobe les caractéristiques minéralogiques et chimiques qui sont déterminantes sur les performances à court et long terme des granulats. On note qu'un granulat contenant plus de 65% de (SiO_2) aura un caractère acide, tandis que sous les 55%, celui-ci aura un comportement basique (Di Benedetto & Corté, 2004). Cette différence influence grandement la relation et les interactions entre les granulats et le bitume. Les matériaux de calcaire par exemple, ont un caractère basique et possèdent une bonne cohésion contrairement aux matériaux siliceux, comme le verre, qui sont essentiellement formés de SiO_2 et dont l'adhésion avec le bitume laisse à désirer. Toutefois, Di Benedetto & Corté (2004) affirment que l'adhérence entre le pneu d'un véhicule et les granulats de calcaire est moins efficace. Les

matériaux siliceux peuvent donc être utilisés dans la couche de roulement afin d'obtenir une meilleure adhérence (Di Benedetto et Corté, 2004).

1.3.1.3 Les différents essais de contrôle des granulats

Les matériaux qui sont utilisés dans les enrobés doivent être durables et capables de conserver leurs propriétés durant plusieurs années. De ce fait, différents essais sont effectués sur les granulats afin de déterminer leur durabilité. Les plus communs sont l'essai Los Angeles et l'essai Micro Deval. L'essai Los Angeles (LC21-400) détermine la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement des gros granulats. L'essai Micro-Deval (LC21-101), quant à lui, détermine la résistance à l'usure par attrition. Ce dernier simule la dégradation des granulats lorsqu'ils se frottent les uns contre les autres. Il existe également d'autres essais servant à valider le bon comportement des granulats, comme l'essai de résistance au polissage (LC21-102), l'essai de détermination du pourcentage de friabilité des granulats fins (LC21-080) et l'essai de détermination du pourcentage de particules fracturées du gros granulat (LC21-100).

1.3.2 Le liant

Le liant est la substance qui maintient les granulats entre eux dans un enrobé bitumineux : il donne la cohésion à l'enrobé. Dans les enrobés à chaud, c'est très souvent le bitume qui joue ce rôle. C'est une substance noire obtenue par la distillation de pétrole brute. Le liant représente souvent moins de 6% massiques des constituants de l'enrobé (10-15% volumique), mais a un impact très important au niveau de ses propriétés viscoélastiques et de sa rigidité. Il donne également des propriétés d'étanchéité à l'enrobé en comblant les vides entre les granulats et en empêchant l'eau de s'y infiltrer.

1.3.2.1 Le comportement du bitume

Le bitume peut se retrouver sous plusieurs formes dépendamment de sa température. À très basse température, sous la température de transition vitreuse (t_g °C), le bitume est à l'état solide

et présente un comportement fragile tandis qu'à très haute température ($>80^{\circ}\text{C}$), il se comporte comme un liquide Newtonnien peu visqueux. Le comportement du bitume dépend également de la durée d'application des charges sur celui-ci (Di Benedetto & Corté, 2004). La Figure 1.3 montre l'évolution de la consistance du bitume suivant la température et le niveau de déformation imposé.

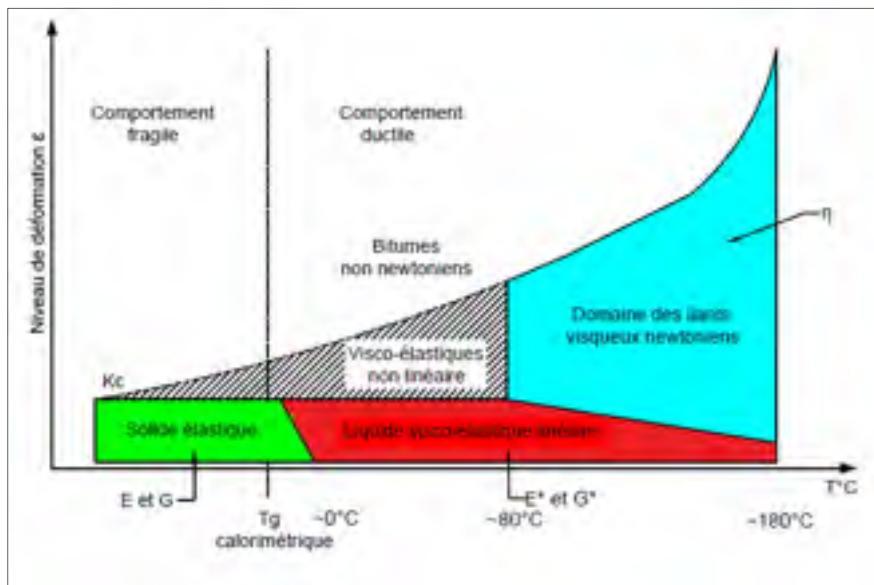


Figure 1.3 Comportement du bitume en fonction de la température et du niveau de déformation imposé
Adaptée de Di Benedetto et Corté (2004)

Ces changements de consistance affectent nécessairement le comportement des enrobés. À des températures sous la température de transition vitreuse (t_g) et sous des sollicitations de courtes durées, l'enrobé aura un comportement fragile et sera plus sujet à la fissuration et à la rupture. Toutefois, à des températures supérieures à 60°C et soumis à des sollicitations de longue durée, il risque d'être plus vulnérable à l'orniérage (Di Benedetto et Corté, 2005). Ces plages de température varient d'un type de bitume à l'autre selon leur viscosité Brookfield. Au Québec, on utilise le système de classification Superpave pour indiquer la plage de température dans laquelle un bitume peut se comporter efficacement. Il s'agit de l'appellation PG H-L où PG signifie Performance Grade. La valeur H représente la température limite élevée du bitume, c'est la température à partir de laquelle le bitume risque de présenter des déformations

irréversibles. La valeur L est la température négative limite inférieure du bitume à partir de laquelle il est susceptible de fissurer par retrait thermique (Trudeau, 2015).

1.3.2.2 Constituants du bitume

Le bitume est un hydrocarbure constitué d'asphaltène et de maltène. Le maltène est constitué des saturés, d'aromatiques et de résines. Ces quatre composants chimiques jouent tous un rôle dans la constitution d'un bitume.

Asphaltènes

Les asphaltènes sont des composants qui affectent grandement les propriétés rhéologiques du bitume. En fait, leur augmentation produit un bitume plus dur, plus visqueux, de plus faible pénétration et de point de ramollissement plus élevé (Shell, 1995). Leur quantité ainsi que leurs caractéristiques varient selon le type de pétrole utilisé (Speight, 2004). Ils contiennent également plusieurs composants chimiques comme le carbone, l'hydrogène, l'azote, le soufre et l'oxygène. Les asphaltènes sont des composants très polaires, ce qui veut dire qu'ils contiennent des molécules de charges positives et négatives (Di Benedetto & Corté, 2004).

Résines

Les résines contribuent à l'adhésion et la ductilité du bitume (Young et al., 1998). Elles sont à l'état solide ou semi-solide et sont composées en grande partie d'hydrogène et de carbone, mais contiennent aussi une faible quantité d'oxygène, de soufre et d'azote. Leur rôle est d'agir comme agent de dispersion ou de "peptisation" des asphaltènes, c'est-à-dire qu'il sépare les asphaltènes pour ne plus qu'il y ait d'interactions entre eux. Elles sont également très polaires et possèdent donc de fortes propriétés adhésives (Di Benedetto & Corté, 2004).

Aromatiques

Les aromatiques sont les constituants qu'on retrouve en plus grande proportion dans le bitume avec une teneur variant de 40% à 65%. Ils sont constitués de carbone et d'hydrogène, mais également de soufre. Ce sont des composés naphthéniques aromatiques constitués de chaînes

carbonées non polaires où dominent les systèmes aromatiques insaturés (Di Benedetto & Corté, 2004).

Saturés

Les saturés contribuent à la viscosité et à la fluidité du bitume (Young, 1998). Ils se trouvent à l'état d'huile visqueuse et comme tous les autres composants, ils sont constitués de carbone et d'hydrogène. Ils sont également formés d'hydrocarbure aliphatiques à chaîne droite ou ramifiée et représente entre 5% et 20% du bitume (Di Benedetto & Corté, 2004).

1.3.2.3 Vieillessement du bitume : phénomène d'oxydation

Dès le début de son utilisation jusqu'à la fin de sa vie utile, le bitume subira un durcissement et par conséquent, deviendra plus fragile et plus susceptible à la fissuration. Ce qu'on appelle le vieillissement du bitume peut être causé par plusieurs facteurs extérieurs naturels, mais également lors de la fabrication des enrobés.

En fait, la période où le bitume connaît sa période de vieillissement la plus importante est lors de la fabrication et de la mise en place des enrobés bitumineux. Les températures élevées lors du malaxage, la durée du malaxage, ainsi que la présence d'air font en sorte que le bitume s'oxyde beaucoup plus (Di Benedetto & Corté, 2004).

Une fois en place dans la chaussée, le bitume de l'enrobé continuera de s'oxyder et de durcir, notamment à cause des températures chaudes, des rayons ultraviolets du soleil, du vent et de l'eau (Di Benedetto & Corté, 2004). Dans le processus de vieillissement de l'enrobé, l'épaisseur du film de bitume, de l'ordre de 5 à 10 microns, joue un rôle déterminant car même si l'oxygène pénètre à quelques millimètres de profondeur dans l'enrobé, il ne pénètre généralement pas plus qu'à 5 microns de profondeur à la surface du bitume (Di Benedetto & Corté, 2004). Normalement un enrobé qui a une teneur en bitume suffisante possédera un film de bitume supérieur à 5 microns ce qui évitera que tout le film de bitume soit ainsi oxydé.

Au niveau chimique, l'oxydation du bitume modifie les proportions de certains de ses composants, ce qui conduit à son durcissement (Di Benedetto & Corté, 2004). En fait, lors de l'oxydation, il y a augmentation ou création de composés carboxyliques et oxysulfurés (Petersen, 2000). La trop grande concentration de ces composés polaires augmentent la viscosité du bitume, car il se crée une immobilisation des molécules. C'est-à-dire que, sous une contrainte appliquée, les molécules contenues dans le bitume sont plus restreintes dans leurs mouvements tant la concentration de composés carboxyliques et oxysulfurés est élevée (Petersen, 2000). Puisqu'ils ne peuvent plus se déplacer sous la contrainte, le bitume devient plus visqueux et a plus de risques de se fissurer.

1.3.2.4 Les bitumes modifiés avec polymères

Il est également possible d'utiliser des polymères pour améliorer les propriétés du bitume. Les principaux polymères qui sont incorporés dans les bitumes utilisés dans la construction de chaussées sont les styrène-butadiène-styrène (SBS), qui sont des élastomères, ainsi que les polymères éthylène-vinyle-acétate (EVA) qui sont des plastomères (Di Benedetto et Corté, 2004). La différence entre les polymères élastomères et plastomères est leur comportement sous contraintes. Les élastomères ont des propriétés élastiques et supportent de grandes déformations avant la rupture, tandis que les plastomères ont des propriétés plastiques et subissent des déformations permanentes sous contraintes. Au niveau des propriétés du bitume, l'ajout d'un élastomère apporte des capacités d'allongement et de résistance en traction. Avec ce type de polymère, le bitume possède également une température de ramollissement aux billes-anneaux ($T_{B\&A}$) plus élevée et présente une susceptibilité thermique plus faible (la valeur de H-L augmente). Tabatabaei (2013) a également montré que les bitumes avec un polymère de type SBS sont moins sensibles au vieillissement que les bitumes non-modifiés. Pour ce qui est des polymères plastomères, ils améliorent également la susceptibilité thermique et augmentent la consistance du bitume à haute température (Di Benedetto & Corté, 2004). Tayfur et al. (2005) ont montré que l'augmentation de la diminution thermique due au polymère SBS a pour effet d'augmenter les performances à l'orniérage comparativement à un bitume non modifié.

1.4 Caractérisation des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumeux sont constitués de granulats et de liants et possèdent plusieurs fonctions au sein de la chaussée. Les plus essentielles sont 1) d'assurer un confort de roulement et une sécurité aux usagers, 2) de supporter les charges des véhicules dus au trafic et, 3) de protéger les couches inférieures des facteurs atmosphériques extérieurs comme l'eau, le soleil et les cycles de gel-dégel (Perraton, 2015). Un enrobé doit également bien résister aux différentes sollicitations thermiques et mécaniques que l'on peut retrouver dans les chaussées, c'est-à-dire qu'il doit posséder une bonne résistance à l'orniérage, à la fissuration thermique, à la fissuration par fatigue, au désenrobage, à l'oxydation et à l'arrachement. Il doit également posséder une bonne microrugosité et macrorugosité pour fournir une bonne adhérence pneus/chaussée (MTQ, 2005).

1.4.1 Types d'enrobés bitumineux

Il existe plusieurs types d'enrobés bitumineux qui assurent différentes fonctions au sein de la chaussée. On retrouve : 1) les enrobés de base, 2) les enrobés de liaison et, 3) les enrobés de surface ou de roulement. Les enrobés de base apportent la rigidité au revêtement et réduisent ainsi les contraintes dans les couches inférieures. Ils sont généralement couverts d'une couche de roulement. Les enrobés de liaison sont employés pour rendre la chaussée plus étanche, limiter la propagation de fissure et créer une protection thermique. Les enrobés de surface, quant à eux, assurent un confort de roulement, l'imperméabilité de la chaussée et la sécurité des usagers. Les enrobés bitumineux les plus employés au Québec sont la grave bitume (GB) de grosseur nominale (GNM) de 20mm (GB20) et l'enrobé semi-grenu de GNM de 10mm (ESG10), lesquels sont respectivement un enrobé de base et un enrobé de surface (MTQ, 2005).

1.4.1.1 GB20

La GB20 est un enrobé bitumineux essentiellement utilisé en couche de base. En 2014, la GB20 représentait 18,6% du tonnage total posé sur les routes du Québec, ce qui le place au second rang des enrobés les plus utilisés (Paradis, 2015). Il possède une faible teneur en bitume

(3,0% à 4,5%) ce qui lui confère une bonne résistance à l'orniérage. Toutefois, ce faible taux en bitume le rend plus sensible à la fissuration et à l'arrachement, c'est pourquoi il est indispensable que la couche de GB20 soit mise en couche de base et recouverte d'une couche intermédiaire ou de surface (MTQ, 2005). En fait, depuis 2008, la GB20 est essentiellement le seul enrobé à être posé comme couche de base au Québec sur le réseau du MTQ (Paradis, 2015).

1.4.1.2 ESG10

L'ESG10 était l'enrobé le plus répandu au Québec en 2014, représentant 55% du tonnage total posé sur les routes par le MTMDET (Paradis, 2015). La granulométrie de cet enrobé semi-grenu fait en sorte que la surface de roulement est plus fermée et plus dense, ce qui le rend plus imperméable qu'un enrobé grenu (MTQ, 2005)

1.4.2 Méthode de formulation du laboratoire chaussée (LC)

La méthode de formulation du laboratoire chaussée (LC) du MTMDET a été créée à partir de données empiriques recueillies au Québec depuis 1993, mais également à partir de la méthode française du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), ainsi qu'avec la méthode Superpave qui est issue du programme américain *Strategic Highway Research Program* (SHRP) (MTQ, 2005). Cette méthode établit des exigences quant au combiné granulaire, aux propriétés volumétriques, ainsi que pour la résistance à l'orniérage. Son but premier est de créer un enrobé contenant la plus grande teneur en bitume tout en ayant une bonne résistance à l'orniérage (Perraton, 2015). Lors d'une formulation selon la méthode LC, la première étape est de créer un squelette granulaire qui respecte les exigences selon le type d'enrobés. Une fois cette étape accomplie, chaque type d'enrobé est assujéti à deux critères quant aux exigences de la méthode LC du MTMDET: 1) obtenir un pourcentage de volume de bitume effectif (V_{be}) donné, spécifique au type d'enrobé et, 2) respecter un pourcentage de vides interstitiels (V_i) en fonction d'une énergie de compactage établie. Ces deux paramètres font partie de la première

phase de formulation LC tandis que la validation de la résistance à l'orniérage représente la deuxième phase.

1.4.2.1 Combinés granulaires

Les exigences liées aux combinés granulaires servent à assurer le maintien des propriétés de l'enrobé quant à son type et son usage. Ces exigences sont exprimées sous forme de points de contrôle sur certains tamis qui indiquent le pourcentage passant maximum et minimum. Il existe également une zone de restriction qui est établie sur certains tamis, mais celle-ci reste une recommandation et non une exigence. Pour représenter la granulométrie du squelette granulaire d'un enrobé, la méthode LC réfère à la relation % passant et la dimension des tamis élevée à la puissance 0,45. Lorsque le combiné granulaire est conforme aux proportions exprimées par la relation de Fuller-Thompson, la représentation de la distribution granulaire dans l'espace % passant-Tamis^{0,45} est une droite reliant l'origine au point (0,0) à la valeur de 100% passant du tamis exprimant la grosseur de particule maximale de l'enrobé. Cette droite correspond donc à la courbe de masse volumique maximale (CMVM) d'un combiné granulaire à granulométrie continue (MTQ, 2005). En comparant l'écart entre la CMVM et la granularité de l'enrobé pour différents tamis, on peut entre autres avoir une bonne idée quant au volume de vides du squelette granulaire (VAM) comme présenté à la Figure 1.4. Plus la courbe granulométrique d'un combiné granulaire se rapproche de la CMVM, plus son VAM sera faible. Le VAM constitue le volume des vides entre les granulats de l'enrobé compacté. C'est la somme du volume des vides interstitiels (V_i) et du volume de bitume effectif (V_{be}). De ce fait, un enrobé ayant un VAM trop faible devra sacrifier une certaine proportion de son volume d'air ou de sa teneur en bitume. Une diminution du volume d'air risque de rendre l'enrobé propice au fluage, tandis qu'une diminution de la teneur en bitume aura pour effet de diminuer la durabilité et la résistance au désenrobage de l'enrobé (Mc Leod, 1959). Toutefois, un combiné granulaire avec un VAM plus faible comporte plusieurs contacts entre les granulats ce qui rend l'enrobé plus résistant à l'orniérage (MTQ, 2005).

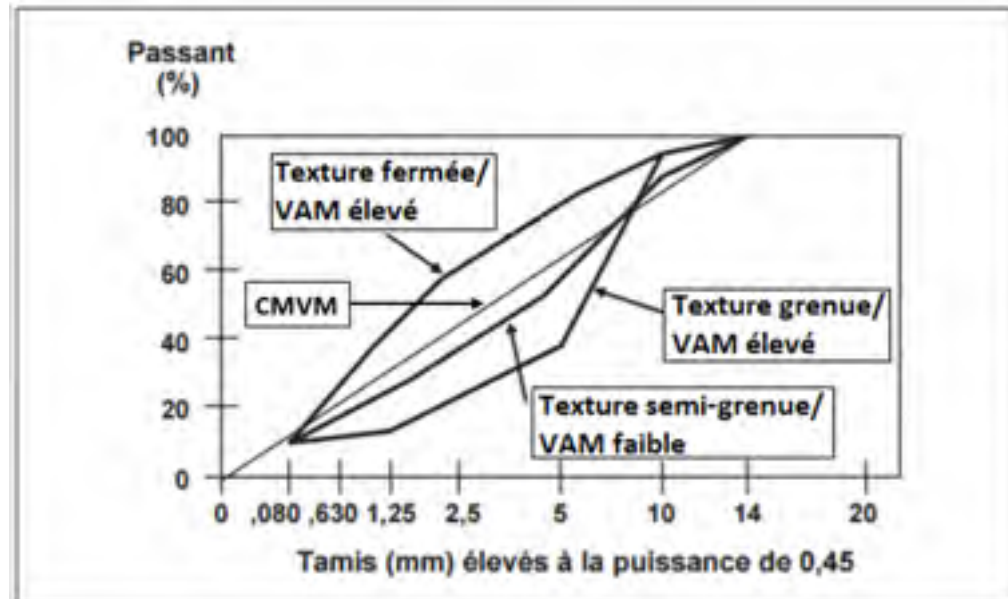


Figure 1.4 Variation du volume intergranulaire (VAM) de l'enrobé par rapport à la courbe de masse volumique maximale
Tirée de MTQ (2005)

La Figure 1.4 nous informe également sur la texture que possédera l'enrobé. Une courbe sous la droite CMVM représente un enrobé grenu ou semi-grenu dépendamment si celle-ci est plus près de la droite ou non. Une macrotexture grenue ou semi-grenue apporte entre autres à l'enrobé une meilleure adhérence pneus/chaussée (Perraton, 2015), un meilleur drainage (Bitume Québec, 2013), ainsi qu'une meilleure absorption acoustique (Meunier, 2013). Une courbe granulométrique au-dessus de la droite CMVM aura toutefois une texture fermée.

1.4.2.2 Exigences volumiques

Au niveau de la teneur en bitume et de l'aptitude au compactage de l'enrobé, la méthode LC impose des exigences volumétriques. En fait, ce système volumétrique permet d'incorporer la notion de densité afin de mieux comparer différents enrobés entre eux confectionnés avec différentes sources de granulats. Le diagramme des phases présenté à la Figure 1.5 montre tous les différents volumes des constituants d'un enrobé. Les exigences volumétriques de la méthode LC se basent en partie sur le volume de bitume effectif (V_{be}), pour déterminer la

teneur en bitume, et sur le volume de vides interstitiels (V_i) pour évaluer l'aptitude au compactage de l'enrobé. Ces deux phases volumiques sont d'ailleurs élaborées dans la présente section.

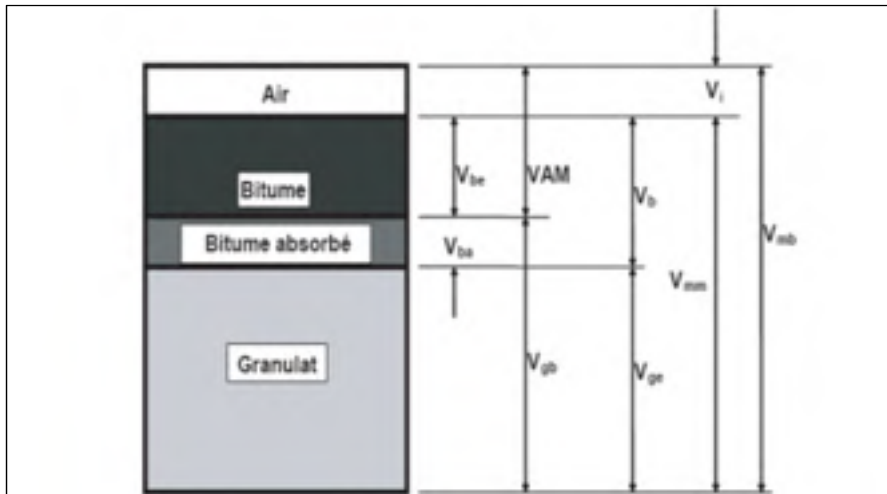


Figure 1.5 Diagramme de phase volumique de l'enrobé
Tirée de Perraton (2015)

Où

VAM	Volume de vides intergranulaires
V_b	Volume de bitume
V_{ba}	Volume de bitume absorbé
V_{be}	Volume de bitume effectif
V_{gb}	Volume du granulat brut
V_{ge}	Volume du granulat effectif
V_i	Volume des vides interstitiels
V_{mb}	Volume brut de l'enrobé
V_{mm}	Volume maximal de l'enrobé

Volume de bitume effectif

Le volume de bitume effectif (V_{be}) est le volume de bitume dans l'enrobé qui n'a pas été absorbé par les pores des granulats et qui entoure les particules du squelette granulaire. Ce volume de bitume joue un rôle déterminant sur les propriétés et les performances de l'enrobé. En effet, Mc Leod (1959) a montré que le volume de bitume absorbé par les pores des granulats (V_{ba}) n'avait aucune influence sur la stabilité, la durabilité ou autres propriétés de l'enrobé. Le V_{be} est représenté en pourcentage par rapport au volume de l'enrobé sans vide interstitiel (V_i). Les exigences du MTMDET spécifient un V_{be} propre à chaque type d'enrobé. Ce pourcentage a été établi dans le but d'avoir une teneur en bitume pas trop élevée afin d'obtenir une résistance à l'orniérage acceptable, mais assez élevée pour permettre de remédier aux problèmes de fissuration, de désenrobage, d'oxydation, d'arrachement et d'adhérence (MTQ, 2005). Ces types de détériorations peuvent également être vérifiés au moyen de différents essais qui ne sont toutefois pas exigés par la méthode LC. La valeur de V_{be} imposée permet donc de formuler un enrobé avec une teneur en bitume qui assurera une certaine fiabilité vis-à-vis ces détériorations sans avoir à effectuer les essais. D'ailleurs, la méthode française AFNOR, n'exige pas un V_{be} cible. Toutefois, cette norme demande de respecter des critères de performance au niveau du module complexe et de la résistance à la fatigue (Di Benedetto et Corté, 2005).

Vides interstitiels

Les vides interstitiels (V_i) sont les vides d'air emprisonnés entre les granulats. Ils sont exprimés en pourcentage de volume par rapport au volume total d'un enrobé compacté. Ces vides interstitiels influencent les propriétés de l'enrobé sur plusieurs aspects. On recommande généralement d'obtenir un pourcentage de vides se situant entre 4% et 7% après le compactage de l'enrobé en chantier (MTQ, 2005). Lorsque le pourcentage d'air est trop grand, l'eau peut pénétrer plus facilement dans l'enrobé et ainsi diminuer sa durabilité (Mc Leod, 1959). Dans le cas de la résistance à l'orniérage, un trop grand pourcentage de vides engendrera de l'orniérage de post-compactage, c'est-à-dire que l'enrobé continuera de se compacter au passage répété des véhicules lourds (Lamothe, 2004). Un enrobé avec un pourcentage de vides trop faible sera quant à lui susceptible à l'orniérage par fluage. En fait, les vides agissent

comme amortisseur, c'est-à-dire que lors d'un fort trafic, les vides absorbent une partie des contraintes en se comprimant, ce qui retarde le fluage (Lamothe, 2004). Les vides sont également importants lors des dilatations thermiques de l'enrobé. Lors des changements de température, la dilation du bitume pourra se faire en remplissant une partie des vides, et ce, sans risque de ressuage, de perte de stabilité, ainsi que de l'action lubrificatrice du bitume (Lamothe, 2004). Outre son pourcentage final de vides, il est également important que le pourcentage d'air diminue aisément lors du passage du rouleau compacteur. Une réduction rapide du volume d'air indique que l'enrobé est plus malléable ce qui facilite la mise en œuvre.

En laboratoire, l'aptitude au compactage est évaluée avec la presse à cisaillement giratoire (PCG) en suivant l'évolution des vides interstitiels en cours de compactage d'un enrobé. Son taux de chargement, ces girations ainsi que l'angle du moule tentent de reproduire le mieux possible l'effet d'un rouleau compacteur (Perraton, 2015). Les exigences se basent sur trois grandeurs de girations. Le premier contrôle se fait à 10 girations et représente le niveau de compaction que l'enrobé devrait minimalement avoir à la sortie de la paveuse. Le deuxième contrôle représente le N_{design} et correspond à un nombre de girations qui s'apparente à l'énergie de compactage qui prévaut lors de la mise en place d'enrobé. Il correspond à la compaction finale après le passage répété des rouleaux compacteurs. Le dernier contrôle est réalisé à 200 girations et équivaut à la compaction de l'enrobé à la fin de sa durée de vie (Perraton, 2015). Le Tableau 1.1 représente le pourcentage maximal de V_i à ces trois points de contrôle.

Tableau 1.1 Comparaison entre le compactage des enrobés bitumineux en chantier et le nombre de girations à la presse à cisaillement giratoire

Girations	10	N_{design}	200
Équivalence en chantier	Sortie de la paveuse	Suite au passages du compacteur	À la fin de la durée de vie de l'enrobé
Teneur en vides	$\geq 11\%$	4-7%	$\geq 2\%$

1.5 Comportement mécanique des enrobés bitumineux

Le comportement mécanique des enrobés bitumineux dépend de son comportement rhéologique, c'est-à-dire, de sa déformation sous un chargement en fonction du temps (Perraton, 2015). Il existe quatre principaux comportements pouvant être identifiés en fonction de l'amplitude de déformation de l'enrobé et du nombre de cycles de chargement (Figure 1.6) (Di Benedetto & Corté, 2005).

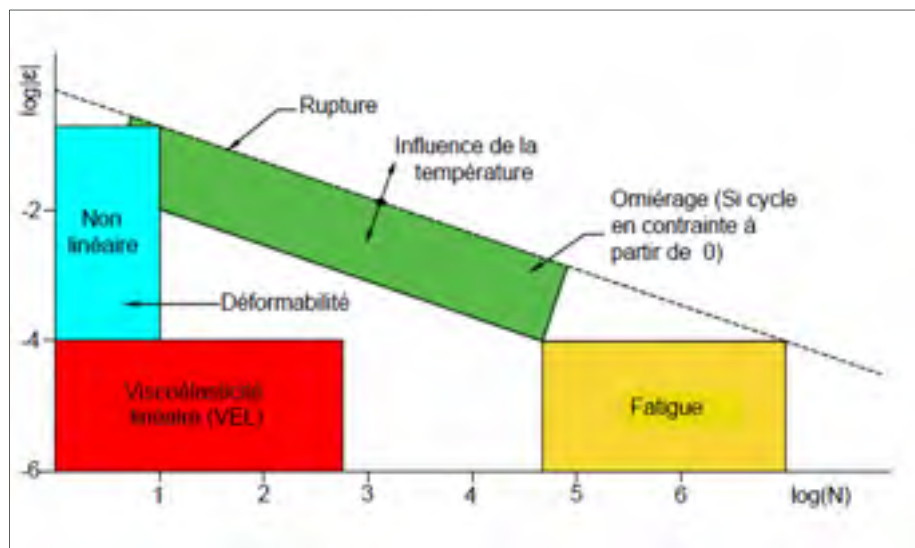


Figure 1.6 Comportement des enrobés bitumineux
Adapté de Di Benedetto & Corté (2005)

- comportement non-linéaire : lorsque l'enrobé est soumis à un faible nombre de chargements et à un très faible pourcentage de déformation;
- comportement viscoélastique linéaire : lorsque l'enrobé est soumis à quelques centaines de cycles et un faible pourcentage de déformation ($<10^{-4}$);
- fatigue : lorsque qu'il y a endommagement de l'enrobé suite à des chargements de plusieurs milliers de cycles à de faibles déformations;
- déformations permanentes : lorsqu'il y a des déformations permanentes et irréversibles dans l'enrobé suite à des amplitudes de déformation près de la rupture.

1.5.1 Comportement viscoélastique linéaire (VEL)

Dans un enrobé bitumineux, la fréquence de chargement ainsi que la température ont un effet sur son module de rigidité, son module complexe (E^*). Pour bien connaître le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé, il est possible de mesurer expérimentalement son module complexe.

1.5.1.1 Module complexe (E^*)

Le module complexe (E^*) indique la rigidité d'un matériau. Il peut être déterminé avec un essai soumettant l'enrobé bitumineux à des sollicitations sinusoïdales sous différentes fréquences et températures, tout en restant dans le domaine des petites déformations. Un matériau réagira différemment aux sollicitations dépendamment de sa rhéologie. Dans un matériau purement élastique, la déformation due à la contrainte sera instantanée et se conformera à l'équation suivante, $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$ ou ω exprime la pulsation. Toutefois, dans un matériau viscoélastique il y aura un retard sur la contrainte. Ce retard est exprimé par l'angle de phase ϕ_E qui peut varier entre 0° et 90° , l'équation devient donc du même coup ($\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)$) (Lamothe, 2014). Dans un matériau purement élastique, l'angle de phase sera de 0° , tandis que pour un matériau purement visqueux, l'angle sera de 90° (Carter & Perraton, 2002). Pour ce qui est de la contrainte du matériau, elle respecte l'équation $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$ en prenant en compte que la déformation succède la contrainte (Figure 1.7).

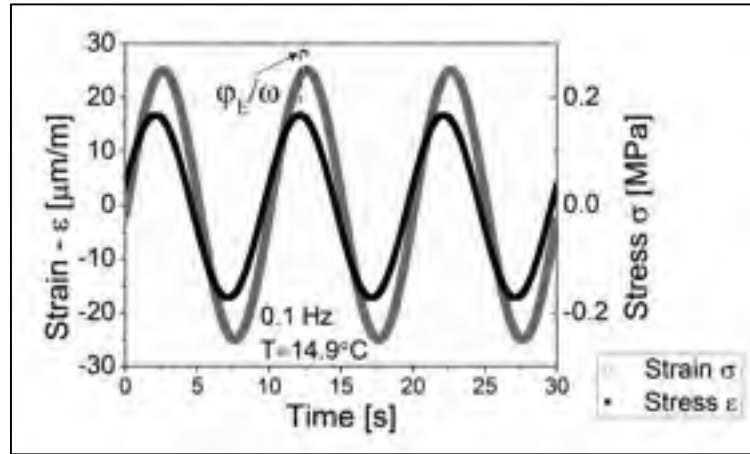


Figure 1.7 Variation de la contrainte et de la déformation pour un matériau viscoélastique linéaire
Tirée de Ramirez et al. (2015)

En établissant les fonctions suivantes,

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (1.1)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{i(\omega t - \phi_E)} \quad (1.2)$$

Le module complexe peut être défini sous la forme

$$E^*(t) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} \quad (1.3)$$

Ce qui mène à l'équation suivante

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\phi_E(\omega)} = |E^*| e^{i\phi_E(\omega)} \quad (1.4)$$

Où

- E^* module complexe;
- $|E^*|$ norme du module complexe; qui peut se calculer avec $|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$
- σ_0 amplitude de contrainte;
- ε_0 amplitude de déformation;
- ω pulsation ($2\pi F$) (rad/s);
- ϕ_E angle de phase ($\phi_E = \omega \cdot t_{lag}$);
- i partie imaginaire d'un nombre complexe ($i = \sqrt{-1}$);
- t_{lag} temps de déphasage exprime par $t_{lag} = \phi_E / \omega$

Le module complexe peut également être défini par l'équation suivante

$$E^* = E_1^2 + E_2^2 \quad (1.5)$$

Où

- E_1 Partie réelle du module complexe, appelée module élastique
- E_2 Partie imaginaire du module complexe, appelée module de perte

Ces deux composantes peuvent se calculer avec les équations suivantes :

$$E_1 = |E^*| \cos \phi_E \quad (1.6)$$

$$E_2 = |E^*| \sin \phi_E \quad (1.7)$$

La composante E_1 permet de quantifier l'énergie emmagasinée lors du chargement d'un matériau. La composante E_2 , quant à elle, indique l'énergie dissipée lorsqu'il y a un frottement interne lors d'une sollicitation. Lorsque l'éprouvette subit des chargements cycliques, l'énergie dissipée est transmise dans le matériau sous forme de chaleur entre autres et augmente ainsi sa température (Carter et Perraton, 2002).

1.5.1.2 Représentation graphique des résultats

Suite à l'essai de module complexe, les valeurs recueillies telles que E_1 , E_2 , ϕ_E et $|E^*|$ peuvent être exprimées selon différentes courbes dans différents espaces. Ces différentes représentations permettent d'observer différentes caractéristiques du matériau.

Courbes isothermes

Les courbes isothermes sont exprimées en traçant la norme du module complexe ($|E^*|$) en fonction des fréquences de sollicitation à chacune des températures d'essai (Figure 1.8). Dans cette représentation, l'évolution de la pente suivant la fréquence de sollicitation permet d'estimer la susceptibilité cinétique du matériau bitumineux, c'est-à-dire, la variation du module selon la fréquence de sollicitation (Di Benedetto et Corté, 2005).

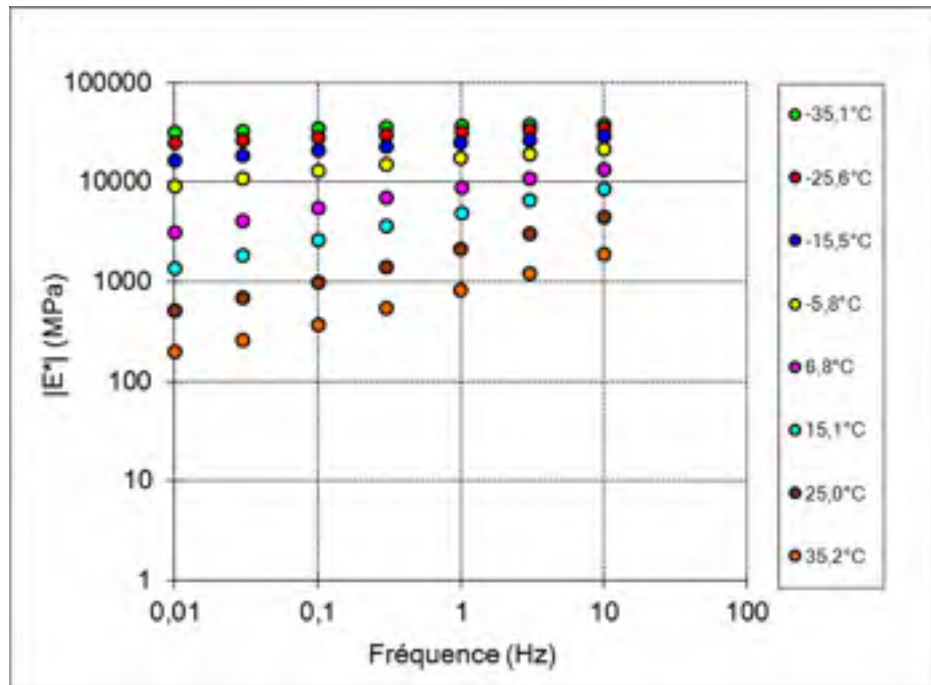


Figure 1.8 Exemple de courbes isothermes d'un module complexe (Éprouvette ESG10V-bv^{-6%})

Courbes isochrones

Les courbes isochrones sont exprimées en traçant la norme du module complexe ($|E^*|$) en fonction des températures à chacune des fréquences d'essais (Figure 1.9). Cette représentation permet de vérifier la susceptibilité thermique du matériau, c'est-à-dire, sa variation de module en fonction du changement de température (Di Benedetto & Corté, 2005).

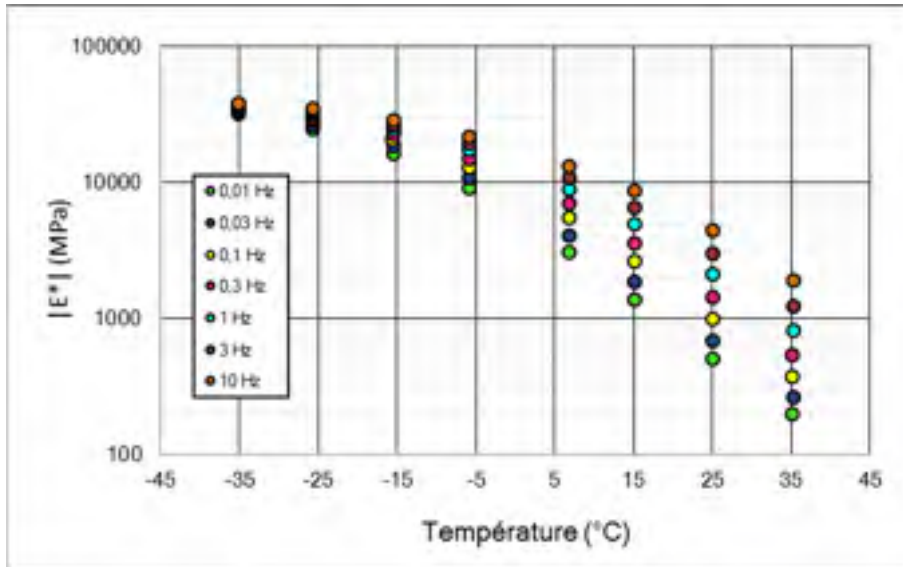


Figure 1.9 Exemple de courbes isochrones d'un module complexe (Éprouvette ESG10V-bv^{-6%})

Courbe dans le plan Cole-Cole

La courbe dans le plan Cole-Cole est exprimée dans un plan où la composante réelle E_1 du module complexe est fonction de la composante imaginaire E_2 . La Figure 1.10 donne un exemple de représentation de l'évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole. Lorsque le principe d'équivalence temps-température (PETT) est applicable, les points expérimentaux vont former une courbe unique dans le plan Cole-Cole qui est caractéristique du matériau (Di Benedetto & Corté, 2005). Cette courbe aux allures d'arc indique qu'elle ne dépend ni de la température et ni de la fréquence (Carter & Perraton, 2002).

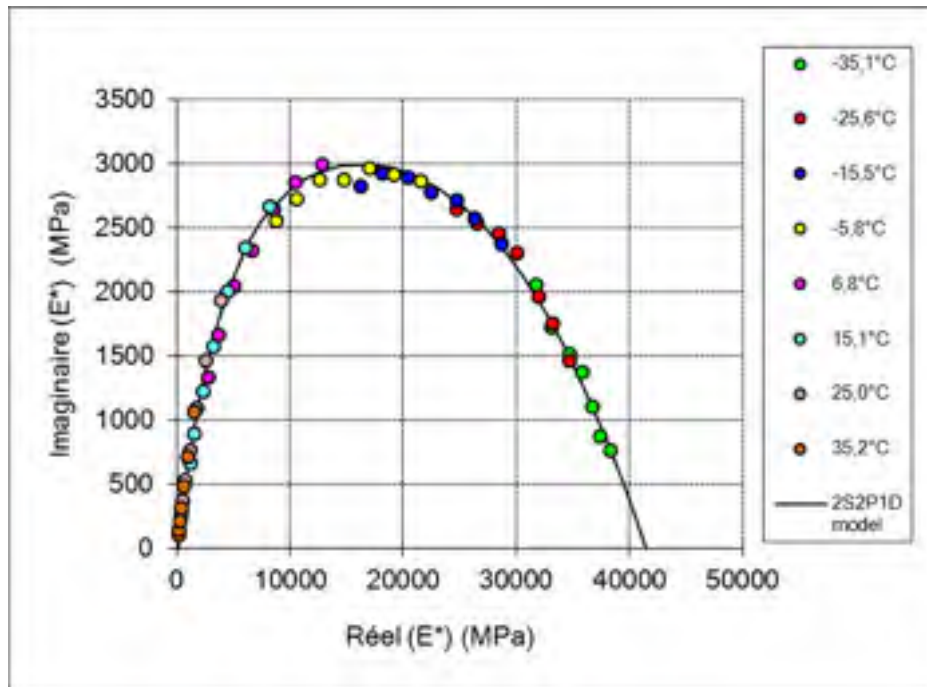


Figure 1.10 Exemple de courbes du module complexe dans le plan Cole-Cole (Éprouvette ESG10V-bv^{-6%})

Courbe dans l'espace de Black

On peut représenter l'évolution du module complexe en traçant la norme du module complexe ($|E^*|$) en fonction de l'angle de phase (ϕ_E) pour chaque température d'essai (Figure 1.11). Comme c'est le cas avec la représentation dans le plan Cole-Cole, si les points expérimentaux forment une courbe unique, c'est que le principe d'équivalence temps-température est respecté (Di Benedetto & Corté, 2005). Cette courbe est utilisée pour observer la réduction de l'angle de phase avec la température.

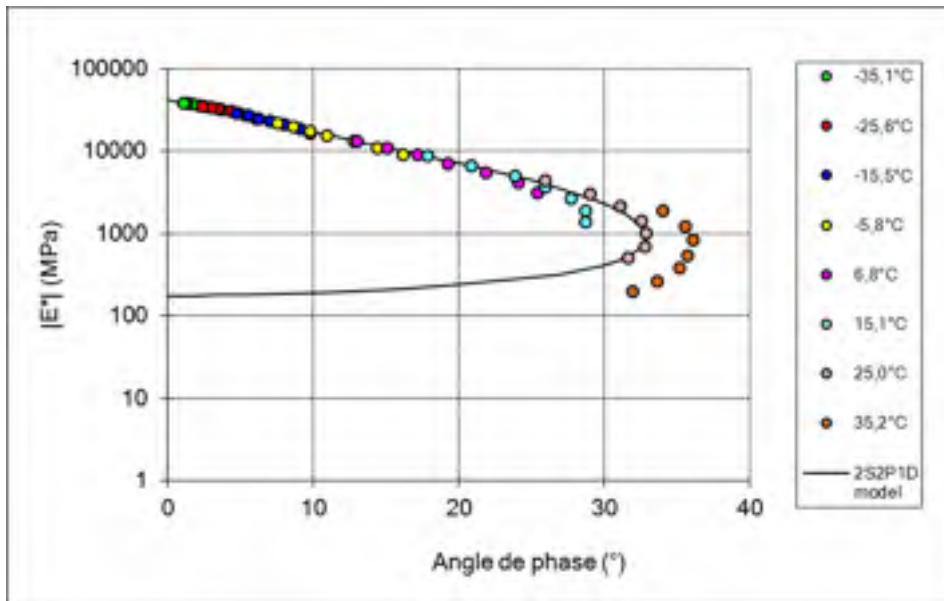


Figure 1.11 Exemple de courbes du module complexe dans l'espace Black (Éprouvette ESG10V-bv^{-6%})

1.5.1.3 Principe d'équivalence temps-température (PETT)

Le principe d'équivalence temps-température (PETT) d'un matériau bitumineux peut être validé lorsqu'on observe les courbes dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black. En fait, si les points expérimentaux de ces deux représentations forment une courbe unique dans chacun de ces plans, c'est qu'ils ne dépendent ni de la fréquence et ni de la température et respectent le principe d'équivalence temps-température. Ce principe signifie que l'augmentation de la fréquence de sollicitation a un effet équivalent à une diminution de température et vice-versa. En général, les matériaux "thermorhéologiquement simples" adhèrent à ce principe. Celui-ci-ci signifie également que la courbe du module peut être dirigée par une seule variable "g" comme l'exprime l'équation (1.8) (Perraton et Olard, 2013).

$$E^*(\omega, t) = E^*(g(\omega, t)) \quad (1.8)$$

En ayant une variable commune, cela permet de créer une courbe dite "courbe maîtresse" qui est exprimée en traçant la norme du module complexe en fonction de la fréquence équivalente.

Ces fréquences équivalentes s'obtiennent en multipliant chaque fréquence par le facteur de translation « a_T » (1.9). Du coup, en faisant la translation parallèle des courbes isothermes vers leur nouvelle valeur, on retrouve une courbe unique à une température de référence choisie (Olard, 2003). Cette courbe maîtresse permet entre autres d'obtenir des valeurs de module à des fréquences inatteignables avec les essais (Di Benedetto & Corté, 2005). La relation de William, Landel et Ferry (WLF) permet d'exprimer la relation entre les facteurs de translations (a_T) et la température, soit :

$$\text{Log}(a_T) = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{(T-T_{ref})+C_2} \quad (1.9)$$

Où

C_1, C_2	Constantes dépendantes de la valeur de température de référence (T_{ref})
a_T	Facteur de translation, égale à 1 lorsque $T = T_{ref}$
$T_{(ref)}$	Température de référence
T	Température testée dans le programme expérimental

Toutefois, l'emploi de certains bitumes avec polymère ou contenant une forte teneur en paraffines peuvent ne pas avoir cette équivalence (Carter & Perraton, 2002). Dans ces cas, les points ne sont pas parfaitement représentés par une seule courbe unique dans l'espace de Black. La Figure 1.11 illustre bien cette situation. En effet, on constate que les points expérimentaux associés aux hautes températures (15,1; 25,0 et 35,2°C) s'écartent de la courbe en formant des "virgules" distinctes à chacune de ses températures d'essai.

1.5.1.4 Modélisation du comportement des matériaux

La modélisation d'un matériau bitumineux dans le domaine des petites déformations peut se faire à partir d'un modèle rhéologique qui met en lien différents éléments de la mécanique. Par exemple, dans le modèle établi par Huet-Sayegh, le comportement élastique du matériau est représenté par une série de ressorts et le comportement visqueux par des amortisseurs. Des chercheurs ont également affiné ce modèle par l'ajout d'un amortisseur linéaire (Olard & Di

Benedetto, 2003). Ce nouvel agencement permet d'obtenir de meilleurs résultats à faible fréquence et à haute température. Cet ajout a donné lieu au modèle 2S2P1D (2 *Springs*, 2 *Parabolics*, 1 *Dashpot*) qui est aujourd'hui très répandu pour faire l'analyse des liants, des mastics et des enrobés bitumineux. Le module complexe selon ce modèle est représenté par l'équation (1.10) suivante :

$$E^*_{2S2P1D}(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (1.10)$$

Où

- k, h exposants, tel que $0 < k < h < 1$;
- E_{00} valeur du module statique, soit lorsque ω tend vers 0
- E_0 valeur du module vitreux, soit lorsque ω tend vers ∞
- β, δ constantes sans dimension
- τ_E temps de relaxation qui dépend seulement de la température de calcul
comme exprimé dans l'équation (1.11)

$$\tau_E(T) = a_{TE}(T) \cdot \tau_{0E} \quad (1.11)$$

La fonction de certains de ces paramètres est illustrée à la Figure 1.12 La plupart permettent d'ajuster une courbe dans le plan Cole-Cole afin que celle-ci s'ajuste le mieux possible avec les valeurs des points expérimentaux.

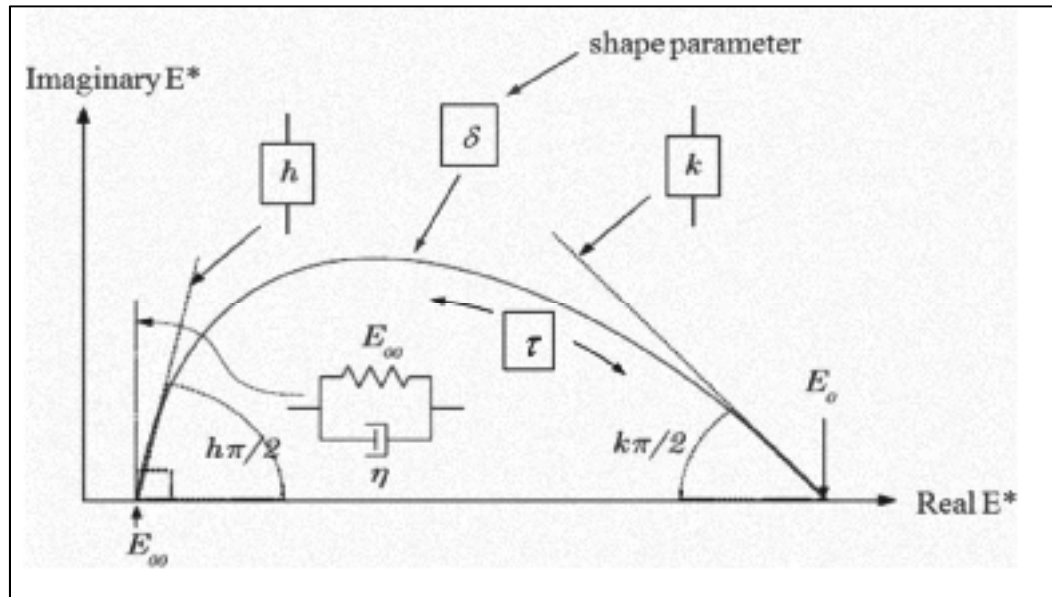


Figure 1.12 Représentation graphique des paramètres du modèle 2S2P1D dans le plan Cole-Cole
Tirée de Ramirez et al. (2015)

1.5.1.5 Facteurs influençant le module complexe

Outre les paramètres d'essais comme la fréquence, la température et le nombre de sollicitations qui ont une influence directe sur la valeur du module complexe, la composition du matériau influence également la valeur du module.

Le liant

La teneur en liant a une influence sur la valeur du module complexe. Plus l'enrobé aura une teneur en bitume élevée et plus le module sera élevé. Toutefois, lorsque la valeur optimale de teneur en bitume est atteinte, son augmentation aura l'effet inverse et diminuera le module (Di Benedetto & Corté, 2005). La nature du bitume joue également un rôle dans la variation du module. En fait, plus un bitume est dur et plus la norme du module complexe sera élevée (Di Benedetto & Corté, 2005). En fait, un bitume qui indique un PG avec une température haute (H) élevée sera plus rigide à des températures élevées, tandis qu'un bitume ayant une

température basse (L) plus grande sera moins rigide à de basses températures (Doucet & Auger, 2010).

Les granulats

La nature et la forme des granulats ont une faible influence sur le module complexe (Di Benedetto & Corté, 2005). Toutefois, lorsque l'enrobé est soumis à de hautes températures ou de basses fréquences et que le bitume possède un comportement moins visqueux, les granulats jouent un rôle plus important dans la valeur du module (Di Benedetto & Corté, 2005).

La teneur en vides

Lorsque la teneur en vides de l'enrobé bitumineux diminue, sa rigidité augmente et sa susceptibilité thermique diminue (Di Benedetto & Corté (2005), Doucet & Auger (2010)). Étant donné que les éprouvettes fabriquées en laboratoire pour l'essai de module complexe peuvent posséder des teneurs en vides différentes, il existe des formules empiriques qui permettent de connaître la valeur du module à diverses teneurs en vides et pourcentages de liant. Parmi ces formules on note entre autres les relations de Moutier, de Heukelom et Klomp, de Francken et de Ugé (Di Benedetto et Corté, 2005). Ainsi, lors de l'analyse, la variation de teneur en vides peut être prise en compte et corriger pour fins de comparaison.

1.5.2 Déformations permanentes

Les déformations permanentes dans une chaussée se traduisent souvent par la formation d'ornières. Ces ornières ont une forme parabolique et se retrouvent principalement dans les pistes de roues d'une chaussée. Elles peuvent provenir du tassement des couches de fondation, qui cause des ornières à grand rayon, ou encore de la déformation dans la couche d'enrobé bitumineux qui cause plutôt des ornières à faible rayon (Di Benedetto & Corté, 2005). Au niveau de la couche d'enrobé bitumineux, les ornières sont plus susceptibles d'évoluer lorsqu'une de ces trois situations est présente soit : 1) la température est élevée, 2) le poids des véhicules, ainsi que la pression des pneus sont élevés et, 3) la vitesse du trafic est lente (Di

Benedetto & Corté, 2005). Il existe deux types d'ornières qui peuvent se produire sur les enrobés bitumineux soit, les ornières par déformation plastique et les ornières d'usure.

1.5.2.1 Types d'ornières

Les ornières par déformation plastique peuvent se classer en deux catégories, 1) Les ornières de consolidation, 2) les ornières par fluage (Figure 1.13) (Di Benedetto et Corté, 2005). La différence entre les deux est en relation avec la teneur en vides de l'enrobé après sa compaction. Un enrobé n'ayant pas été suffisamment compacté et contenant trop de vides interstitiels risque de causer des ornières de consolidation. En fait, l'enrobé continue de se compacter sous la charge des véhicules lourds jusqu'à ce que le squelette granulaire puisse résister aux charges (Lamothe, 2004). Les ornières par fluage sont, quant à elles, dues à la surcompaction de l'enrobé lors de sa mise en œuvre. Puisque l'enrobé ne peut se compacter davantage, il se déplace ce qui cause des bourrelets autour de l'ornière (Lamothe, 2004).

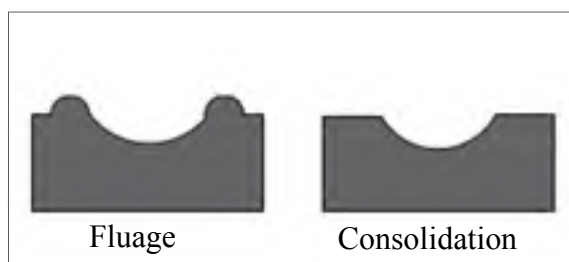


Figure 1.13 Différents types d'ornières
Adaptée de Lamothe (2016)

Les ornières d'usure sont moins fréquentes que les ornières par déformation plastique. Elles sont causées par l'abrasion de l'enrobé, c'est-à-dire que le passage de véhicules crée le polissage, l'arrachement ou le désenrobage de l'enrobé (Di Benedetto et Corté, 2005). L'emploi de pneus à clou, qui sont principalement employés dans les pays nordiques, sont souvent très dommageables et participent à accentuer ce type d'ornière.

1.5.2.2 Facteurs influençant les déformations permanentes

Le liant

Bien que la teneur en vides ait une influence certaine sur le type d'ornièrre, c'est le caractère fluide du bitume qui détermine les déformations permanentes (Di Benedetto & Corté, 2005). En effet, le déplacement des granulats n'est possible que parce que le liant permet à ceux-ci de se déplacer. C'est pourquoi une faible viscosité du bitume, causée par des températures élevées et de faibles vitesses de sollicitation, aura un plus grand impact sur les déformations permanentes. Cette faible viscosité permet aux granulats de glisser plus facilement les uns contre les autres ce qui crée un réarrangement du squelette granulaire. La teneur en bitume a aussi un impact marqué sur les performances à l'orniérage (Meunier, 2013). En fait, plus il y a de bitume et plus celui-ci comblera les vides intergranulaires ce qui permettra davantage le déplacement des granulats.

Squelette granulaire

Le squelette granulaire joue également un rôle dans la résistance de l'enrobé sur les déformations permanentes. Comme c'est le déplacement irréversible des granulats qui cause l'orniérage, l'angularité des granulats est très importante. En effet, des granulats ayant une plus grande angularité permettront un blocage plus important entre les particules et résisteront mieux aux déformations (Lamothe, 2004). La surface des particules aura également un effet sur la résistance à l'orniérage. Dans la même logique que pour l'angularité des granulats, des particules à surface rugueuse limiteront davantage le mouvement relatif entre les particules par rapport aux particules à surface lisse. Le dosage en filler a lui aussi un impact considérable sur l'orniérage. Une teneur élevée en filler comblera les vides entre les particules ce qui aura pour effet de renforcer la structure. Toutefois, une teneur trop élevée aura pour effet de desserrer le squelette granulaire et de modifier l'agencement optimal des granulats ce qui risque d'engendrer de l'orniérage par fluage (Lamothe, 2014)

1.6 La chaux

La chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est un matériau solide issu de la combinaison chimique entre la chaux vive (CaO) et l'eau (H_2O). De plus amples recherches quant à son utilisation dans les enrobés bitumineux se sont mises en branle dans les années 70 pour trouver des solutions à certains problèmes de la route (Lesueur, Petit & Ritter (2013)). Depuis, plusieurs études ont été réalisées afin de connaître toute la contribution que ce filler actif peut apporter aux enrobés bitumineux autant au niveau du vieillissement que de l'adhérence entre le bitume et les granulats.

1.6.1 Interaction physicochimique de la chaux dans l'enrobé bitumineux

La chaux hydratée est un filler actif qui modifie le comportement du bitume. Bien qu'il augmente sa rigidité comme le fait un filler de calcaire, il modifie également sa microstructure en créant des interactions physicochimiques. Comme la chaux est une base forte hautement réactive, elle réagit facilement avec les éléments acides contenus dans le bitume (Little & Petersen, 2005). Ainsi, en venant s'accrocher à la surface des particules de chaux, les acides sont retirés du bitume en presque totalité et de façon irréversible. Cette suppression a un effet sur le comportement et sur les arrangements moléculaires du bitume (Little & Petersen, 2005). En fait, comme on retrouve des éléments acides dans les asphaltènes, l'annihilation de ces composants acides a pour effet de réduire également la proportion des asphaltènes qui en contiennent (Petersen, 2000). Cette diminution fait en sorte de diminuer l'augmentation de la viscosité (Figure 1.14) et modifie certains comportements dans l'enrobé (Little & Petersen, (2005), Branthaver et al. (1993)).

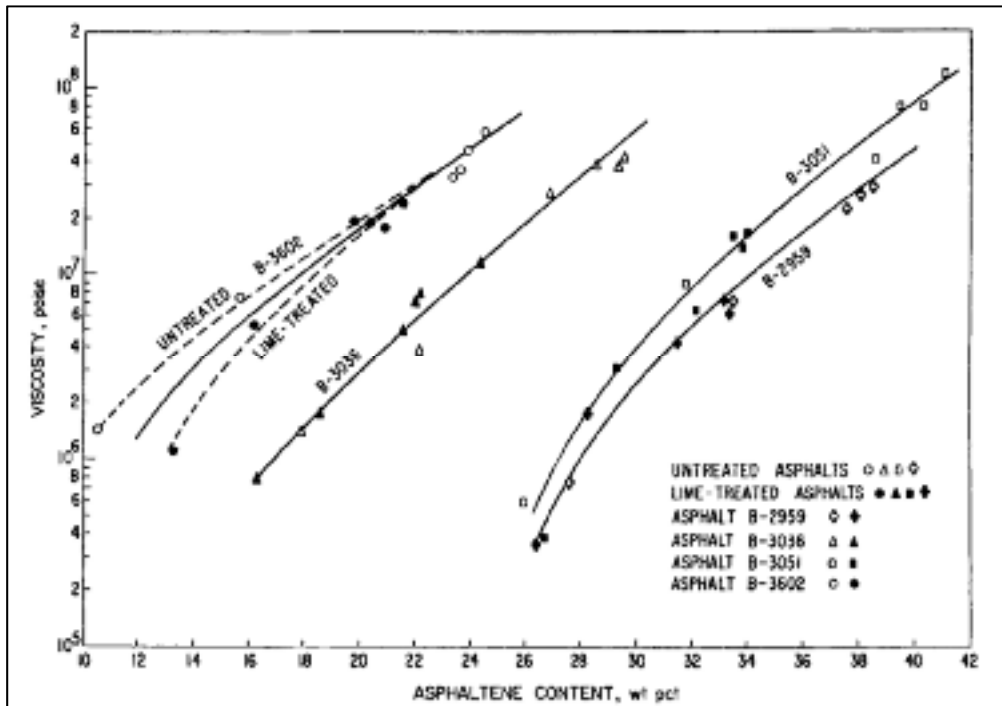


Figure 1.14 Relation entre la viscosité du bitume et la proportion d'asphaltène
Tirée de Petersen (2000)

La porosité des particules de chaux hydratée est également vue comme un facteur important dans le changement de propriétés du bitume dû à l'ajout de chaux (Lesueur, 2010). En fait, les particules de filler de calcaire contiennent en moyenne de 30-34% de vides, tandis que pour la chaux, ce pourcentage se situe entre 60-70% (Figure 1.15). Par conséquent, le remplacement en équivalence de masse d'un filler de calcaire par de la chaux augmente la fraction volumique des particules solides ce qui augmente également la viscosité. Lesueur (2010) avance également l'hypothèse que l'augmentation de rigidité des mélanges avec chaux à haute température serait due l'engorgement du bitume dans les pores des particules de chaux. La fraction volumique solide serait alors plus grande, ce qui augmenterait la rigidité ainsi que la viscosité de l'enrobé.

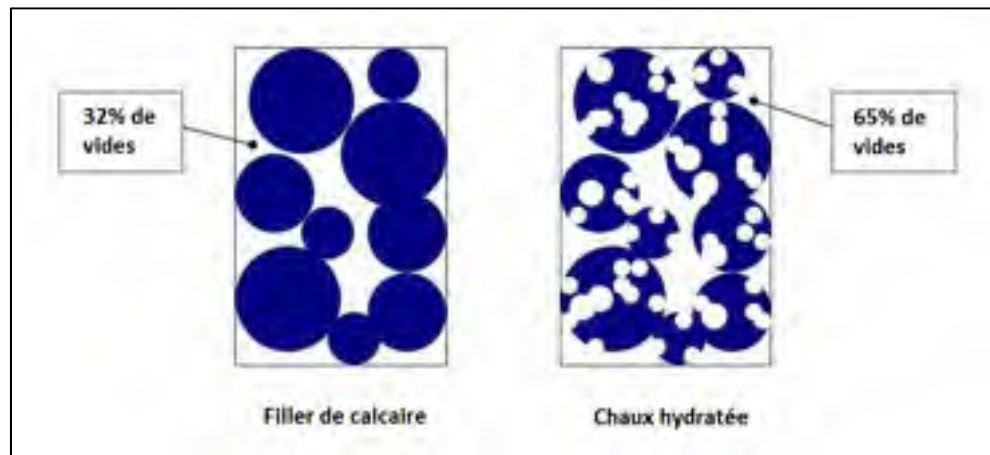


Figure 1.15 Différence entre le pourcentage de vides, pour un volume donné, d'un filler de calcaire et de la chaux hydratée
Adaptée de Lesueur (2010)

1.6.2 Influence de la chaux sur le comportement des enrobés

Des études ont montré que l'ajout de chaux comme filler changeait le comportement des enrobés bitumineux de façon bénéfique sur trois grands aspects.

- elle diminue le vieillissement du bitume de l'enrobé;
- elle offre une meilleure adhésion entre le bitume et les particules de granulat et;
- elle améliore certaines propriétés mécaniques de l'enrobé.

La majorité des études ont également montré que le pourcentage optimal massique de chaux serait entre 1,5% et 2,0% de la masse des granulats (Khodaii, Tehrani, Haghshenas (2012), Aragao, Lee, Kim & Karki (2010), Al-Tameemi, Wang & Albayati (2015)).

1.6.2.1 Le vieillissement

Lorsqu'il y a oxydation du bitume, certains composés polaires sont formés dans le liant. Si la concentration de ces composés est trop élevée, il y aura augmentation de la viscosité du bitume et une plus grande susceptibilité à la fissuration (voir § 1.3.2.3) (Petersen, 2000). Les particules de chaux en contact avec le bitume ont pour effet de réduire les composants tensioactifs du

bitume en les absorbant à sa surface (Petersen, 2000). En fait, on remarque que ce ralentissement se produit surtout lorsqu'on atteint des températures au-dessus de 88°C (Johansen, Branthaver & Robertson, 1995). En effet, au-dessus de cette température, les particules de chaux deviennent plus actives et leur diffusion au sein du bitume plus efficace. On peut également avancer qu'au final, la chaux ne ralentit le vieillissement du bitume que lorsque celui-ci atteint des températures qui sont utilisées lors de la fabrication et de la mise en place de l'enrobé. Toutefois, comme mentionné à la section 1.3.2.3, c'est lors de ces étapes que le bitume subit une oxydation plus importante. C'est donc dire que cet ajout n'affecte pas le vieillissement de l'enrobé suite à sa mise en place, mais joue tout de même un rôle important sur la diminution de l'oxydation lors de sa fabrication. On note également que les bitumes ayant une plus forte polarité et un plus haut taux d'asphaltènes réagissent plus fortement à l'ajout de chaux hydraté (Plancher & Petersen, 1976).

1.6.2.2 L'adhésion bitume-granulats

L'adhésion entre le bitume et les granulats est essentiellement causée par la force d'interaction entre ceux-ci. Cette force d'interaction dépend de la pétrographie du granulat (Bagampadde, Isacson & Kiggundu (2006), Huang, 2002). En fait, c'est le niveau de charge électrostatique en surface des granulats qui détermine le degré d'attraction avec le bitume. Ce degré d'attraction est généré par l'effet de surface entre le bitume et le granulat. L'interaction du bitume avec une particule de calcaire, par exemple, sera considérablement supérieure à l'interaction avec une particule de silice comme le verre (Curtis, 1993). Il existe deux tensio-actifs présents dans le bitume qui peuvent interagir avec les particules d'un granulat, les tensio-actifs cationiques et les tensio-actifs anioniques. Dans le cas d'un granulat de calcaire (CaCO_3) les tensio-actifs cationiques et anioniques se lient avec les ions de calcium qui se trouvent à la surface. Toutefois, dans le cas d'un granulat siliceux (SiO_2), qui a une charge de surface négative, seuls les tensio-actifs cationiques du bitume pourront réagir avec les ions de silice, tandis que les tensio-actifs anioniques, étant également de charge négative, ne pourront pas former de liens chimiques et seront ainsi plus susceptibles de disparaître au contact de l'eau (Curtis, 1993). L'ajout de chaux hydratée (Ca(OH)_2) au bitume favorise la précipitation d'ions

de calcium à la surface des particules du granulat (Figure 1.16a). Ces ions de calcium pourront ensuite se lier aux composés acides du bitume pour former des sels insolubles dans l'eau (Ca^{2+}). Ces sels augmentent ainsi l'interaction entre le bitume et le granulat en venant modifier l'état de surface et en venant créer des points d'ancrage supplémentaires (Figure 1.16b) (Lesueur, 2010). Étant donné que la tenue à l'eau dépend directement de cette interaction, l'ajout de chaux peut grandement améliorer un enrobé contenant des granulats de silice.

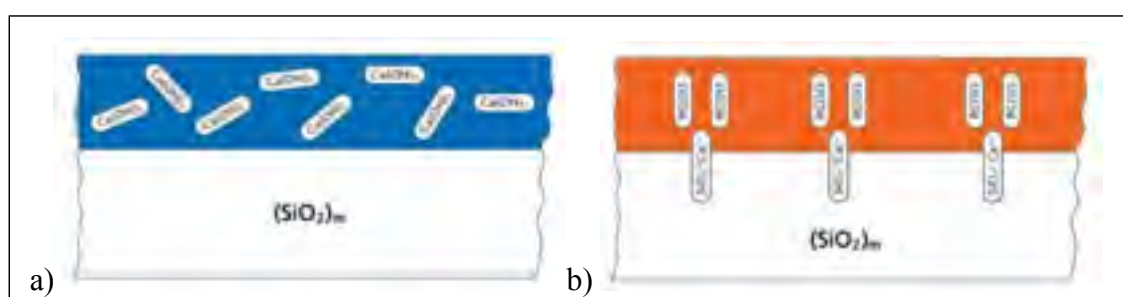


Figure 1.16 a) Mastic bitumineux contenant de la chaux à la surface d'un granulat de silice b) Réaction des ions de calcium avec les acides du bitume pour former des sels insolubles
Tirée de Lesueur et al. (2013)

1.6.2.3 Les propriétés thermomécaniques des enrobés modifiés à la chaux

Il a été montré dans plusieurs études que la chaux hydratée incorporée dans l'enrobé améliore leurs propriétés thermomécaniques et change leurs comportements. Les conclusions de ces études vis-à-vis certains comportements sont exposées dans cette sous-section.

Rigidité

Pour ce qui est de l'impact de la chaux sur la rigidité de l'enrobé, il a été montré que, par rapport à un enrobé utilisant uniquement du filler de calcaire, l'enrobé incorporant de la chaux hydratée obtient un module complexe plus élevé et un angle de phase plus faible pour une température et une fréquence de sollicitation donnée (Phan, Di Benedetto, Sauzéat & Lesueur, 2016). Ces changements ont été davantage observés à de hautes températures et de basses fréquences ce qui montre encore une fois que l'augmentation de la rigidité d'un enrobé avec

chaux dépend de la température. En fait, Pham et al. (2016) observe une différence de la norme de module complexe de 500% supérieure à un enrobé sans chaux pour une température de 52°C à 0,003 Hz et de seulement 18% supérieurs à 15°C et 10Hz. Johansson (1998), a également observé qu'à une température de -20°C, l'enrobé avec chaux adoptait un comportement similaire à un enrobé avec filler de calcaire.

Aragao et al. (2010) ont quant à eux montré que la variation de la teneur en chaux n'affectait pas la norme du module complexe. Toutefois, leurs résultats montrent que l'augmentation de la teneur en chaux augmentait la rigidité des mastics et la norme du module complexe de cisaillement ($|G^*|$).

Résistance en fatigue

Les enrobés incorporant de la chaux hydratée possèdent également une bonne résistance en fatigue. En effet, comme mentionné précédemment, la chaux a pour effet de réduire le comportement visqueux de l'enrobé, ce qui aide à dissiper les contraintes pour empêcher la propagation des fissures de façon plus efficace qu'avec le filler de calcaire (Little & Petersen (2005), Johanson & Isacson, (1996)). De plus, étant donné que la chaux permet une meilleure adhésion bitume-granat, les liens entre ceux-ci sont plus forts et l'enrobé peut subir davantage de contraintes avant la rupture (Little & Petersen, 2005). Arago et al. (2010) ont montré toutefois qu'au-dessus d'une proportion optimale en chaux de 1,5% massique, l'enrobé devient trop fragile et offre de moins bonnes performances en fatigue.

Résistance à l'orniérage

Des études montrent que la chaux hydratée augmente la résistance à l'orniérage (Aragao et al. (2010), Ozen (2011), Al-Tameemi et al. (2015)). L'orniérage se produit généralement à de hautes températures, lorsque le bitume dans l'enrobé perd de sa rigidité et présente moins de cohésion. Il est ainsi plus facile pour les granulats de se déplacer et de causer des déformations permanentes. Dans le cas d'un enrobé avec chaux, on observe une augmentation de la rigidité à haute température, par rapport à un enrobé avec filler de calcaire. Comme mentionner précédemment, ce phénomène pourrait être expliqué par le remplissage des particules de chaux

par le bitume à haute température qui augmente la fraction volumique solide dans l'enrobé (Lesueur, 2010). Comme la fraction de bitume effectif diminue, les déplacements entre les granulats sont plus restreints ce qui diminue le risque d'orniérage.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Le présent projet de recherche vise à évaluer la faisabilité d'incorporer le verre mixte dans les enrobés bitumineux. Ce chapitre présente les différents objectifs et hypothèses du projet, ainsi que la méthodologie envisagée afin d'atteindre ces objectifs.

2.1 Objectifs

De façon plus générale, ce projet vise d'abord à évaluer la possibilité d'incorporer des particules de verre recyclé dans les enrobés bitumineux. De manière plus concrète, il vise à connaître les propriétés volumétriques et le comportement thermomécanique des enrobés contenant des particules de verre, afin de formuler un enrobé qui offre des propriétés égales ou supérieures à un enrobé conventionnel. Le seul fait de formuler un enrobé qui répond aux critères de performance ne suffit pas. L'enrobé de verre doit représenter une alternative économiquement viable et un gain environnemental par rapport aux enrobés conventionnels afin de favoriser sa commercialisation.

2.2 Démarche expérimentale

Dans le cadre de ce projet, deux types d'enrobés bitumineux ont été formulés, soit un enrobé de surface, le ESG10 et, un enrobé de base, le GB20. Rappelons que suivant les directives de la méthode LC du MTMDET, les teneurs en bitume sont distinctes pour ces deux enrobés pour un volume de bitume effectif (V_{be}) spécifié de 12,2% et 10,2% pour le ESG10 et le GB20 respectivement. L'étude menée sur ces deux enrobés ayant des fonctions distinctes dans le revêtement d'une chaussée bitumineuse permettra ainsi d'observer si l'ajout de verre s'adapte mieux à l'un ou à l'autre.

En s'appuyant sur les critères d'aptitude au compactage et de résistance à l'orniérage, Lachance-Tremblay et al. (2016) ont établi que la proportion optimale de particules de verre

pouvant être incorporée dans un enrobé était de l'ordre de 10%. Cependant, les résultats des travaux de Lachance-Tremblay ont mis en perspective des performances à l'orniérage qui étaient non conforme aux exigences de la méthode LC pour l'enrobé incorporait des particules de verre et avec une teneur en bitume équivalente au V_{be} cible. Dans ce contexte, le comportement des enrobés de verre incorporant 10% (%volumique), et formulé suivant les exigences de la méthode LC, est alors comparé dans un premier temps à celui d'enrobés de référence. Dans un deuxième temps, des enrobés de verre des familles ciblées (ESG10 et GB20) sont testés, cette fois, en réduisant leur teneur en bitume, se détachant ainsi des exigences de la méthode LC quant au V_{be} . Ce choix est fondé sur le fait que la réduction du bitume améliore la résistance à l'orniérage de l'enrobé. En mesurant l'ensemble des principales propriétés thermomécaniques de ces enrobés de verre à teneur en bitume réduite, il devient possible de s'enquérir de leurs performances. En fait, il est établi que l'enrobé de verre requiert généralement une moins grande quantité de bitume que l'enrobé sans verre puisque les granulats de verre ont un potentiel d'absorption plus faible que les granulats conventionnels. Cet état de fait est déjà un élément important dans le recours aux particules de verre dans les enrobés. Or, s'il s'avère de surcroît qu'une réduction additionnelle de la teneur en bitume, au-delà de celle nécessaire pour palier à la différence d'absorption des granulats, est bénéfique pour l'atteinte des performances cibles des enrobés de verre, cela permettrait de produire un enrobé plus économique et de fait, plus facile à introduire sur le marché.

Les essais qui seront effectués sur les enrobés étudiés ont pour but de caractériser l'enrobé sur divers aspects. On retrouve des essais volumétriques soit, l'essai de densité maximale du mélange (d_{mm}) et l'essai d'aptitude au compactage (PCG), ainsi que des essais thermomécaniques regroupant le module complexe et la résistance à l'orniérage et, enfin la tenue à l'eau.

2.3 Plan d'essai du ESG10

L'enrobé de type ESG10 a été testé suivant quatre différentes formulations :

- 1) un ESG10 de référence, sans ajout de verre avec une teneur en bitume (b_R) permettant d'atteindre la valeur cible du $V_{be} / 12,2\%$ (ESG10R- b_R);
- 2) un ESG10 avec 10% de verre et une teneur en bitume (b_V) permettant d'atteindre la valeur cible du $V_{be} / 12,2\%$ (ESG10V- b_V);
- 3) un ESG10 avec 10% de verre et une teneur en bitume réduite de 6% par rapport à celle du ESG10V- b_V (ESG10V- $b_V^{-6\%}$);
- 4) un ESG10 avec 10% de verre et une teneur en bitume réduite de 17% par rapport à celle du ESG10V- b_V (ESG10V- $b_V^{-17\%}$).

À partir des résultats de ces quatre enrobés ESG10, une cinquième formulation (ESG10V- $b_V^{-6\%}$ +CH) a été confectionnée dans le but d'optimiser l'enrobé ESG10V- $b_V^{-6\%}$. Celle-ci possède également un ajout de 2% de chaux hydratée pour améliorer la tenue à l'eau du mélange. L'organigramme des essais effectués selon le type d'enrobé est présenté à la Figure 2.1.

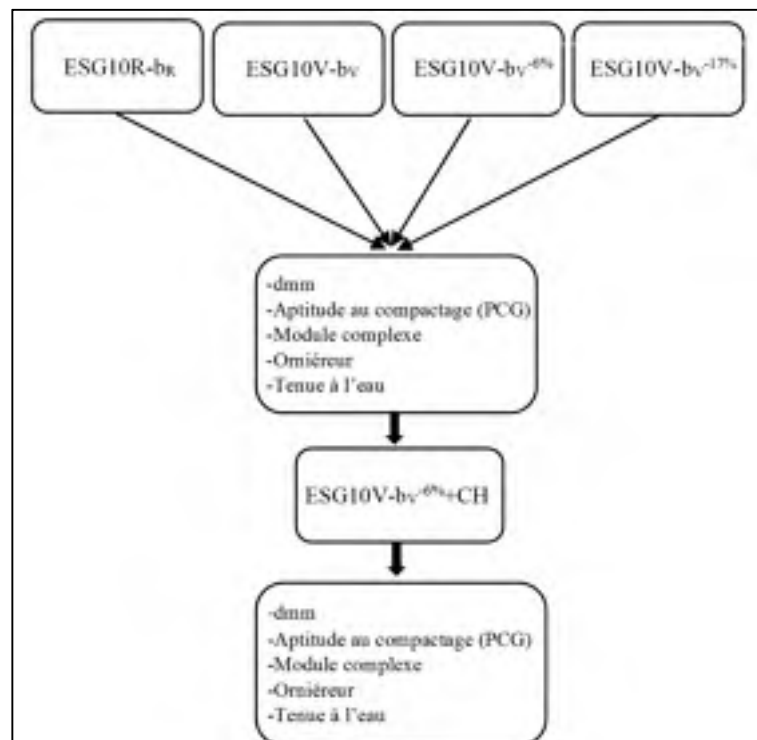


Figure 2.1 Organigramme du programme d'essais réalisé sur l'enrobé ESG10

2.4 Plan d'essai du GB20

L'enrobé GB20 a été étudié sous quatre différentes formulations :

- 1) un GB20 de référence, sans ajout de verre avec une teneur en bitume (b_R) permettant d'atteindre la cible du $V_{be} / 10,2\%$ (GB20R- b_R);
- 2) un GB20 avec 10% de verre, 2% de chaux et une teneur en bitume (b_V) permettant d'atteindre la cible du $V_{be} / 10,2\%$ (GB20V- b_V +CH);
- 3) un GB20 avec 10% de verre, 2% de chaux et une teneur en bitume réduite de 10% par rapport à celle du GB20V- b_V +CH (GB20V- $b_V^{-10\%}$ +CH);
- 4) un GB20 avec 10% de verre, 2% de chaux et une teneur en bitume réduite de 20% par rapport à celle du GB20V- b_V +CH (GB20V- $b_V^{-20\%}$ +CH).

Étant donné les bons résultats obtenus avec l'ajout de chaux hydratée dans les enrobés ESG10, la chaux a été ajoutée dans tous les enrobés de série GB20 contenant du verre. La Figure 2.2 montre l'organigramme des essais effectués pour tous les GB20.

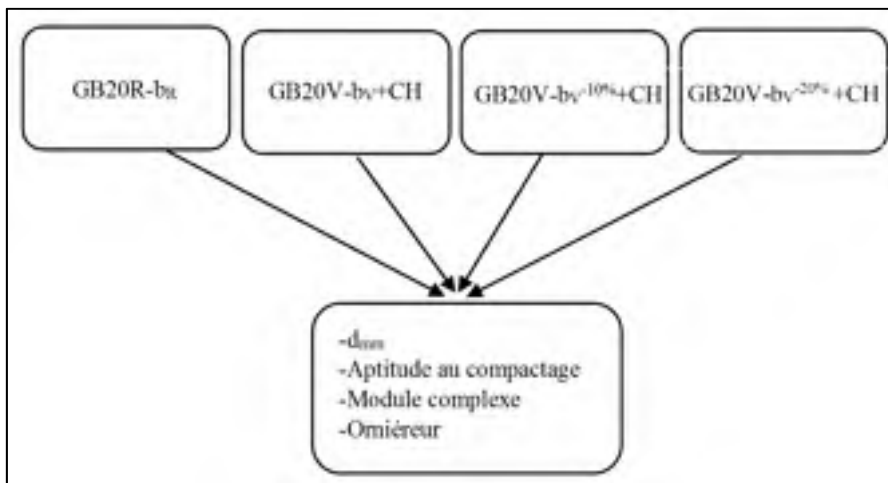


Figure 2.2 Organigramme du programme d'essais réalisé sur l'enrobé GB20

Le Tableau 2.1 présente le nombre de répétitions effectués pour chaque essai et pour chaque mélange d'enrobé bitumineux testé.

Tableau 2.1 Nombre d'essais effectués et quantités pour chaque type de mélange d'enrobé bitumineux

Gâchée		#	1	2	3	4	5
		Essais	d _{mm}	Aptitude au compactage	E*	Orniérage	Tenue à l'eau
ESG10	ESG10R-b _R	Nombre d'essais	3	2	1	2	2
		Masse (g)	3 600	10 600	7 000	25 000	5 000
		Corps d'épreuve	Matériau lâche	PCG (φ150x115mm)	PCG (φ150x170mm)	Plaques (500x180x50mm)	PCG (φ100x130mm)
	ESG10V-b _V	Nombre d'essais	3	2	1	2	
		Masse (g)	3 600	10 600	7 000	25 000	
		Corps d'épreuve	Matériau lâche	PCG (φ150x115mm)	PCG (φ150x170mm)	Plaques (500x180x50mm)	
	ESG10V-b _V ^{-6%}	Nombre d'essais	3	2	1	2	2
		Masse (g)	3 600	10 600	7 000	25 000	5 000
		Corps d'épreuve	Matériau lâche	PCG (φ150x115mm)	PCG (φ150x170mm)	Plaques (500x180x50mm)	PCG (φ100x130mm)
	ESG10V-b _V ^{-17%}	Nombre d'essais	3	2	1	2	
		Masse (g)	3 600	10 600	7 000	25 000	
		Corps d'épreuve	Matériau lâche	PCG (φ150x115mm)	PCG (φ150x170mm)	Plaques (500x180x50mm)	
	ESG10V-b _V ^{-6%+CH}	Nombre d'essais	3	2	1	2	2
		Masse (g)	3 600	10 600	7 000	25 000	5 000
		Corps d'épreuve	Matériau lâche	PCG (φ150x115mm)	PCG (φ150x170mm)	Plaques (500x180x50mm)	PCG (φ100x130mm)
GB20	GB20R-b _R	Nombre d'essais	3	2	1	2	
		Masse (g)	6 600	10 600	7 000	50 000	
		Corps d'épreuve	Matériau lâche	PCG (φ150x115mm)	PCG (φ150x170mm)	Plaques (500x180x100mm)	
	GB20V-b _V +CH	Nombre d'essais	3	2	1	2	
		Masse (g)	6 600	10 600	7 000	50 000	
		Corps d'épreuve	Matériau lâche	PCG (φ150x115mm)	PCG (φ150x170mm)	Plaques (500x180x100mm)	
	GB20V-b _V ^{-10%+CH}	Nombre d'essais	3	2	1	2	
		Masse (g)	6 600	10 600	7 000	50 000	
		Corps d'épreuve	Matériau lâche	PCG (φ150x115mm)	PCG (φ150x170mm)	Plaques (500x180x100mm)	
	GB20V-b _V ^{-20%+CH}	Nombre d'essais	3	2	1	2	
		Masse (g)	6 600	10 600	7 000	50 000	
		Corps d'épreuve	Matériau lâche	PCG (φ150x115mm)	PCG (φ150x170mm)	Plaques (500x180x100mm)	

CHAPITRE 3

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

La formulation d'un enrobé bitumineux est un processus qui nécessite plusieurs étapes. Celles-ci commencent d'abord par la caractérisation des matériaux utilisés dans la fabrication, suivis par la fabrication des enrobés et se termine avec la réalisation de différents essais qui définiront les propriétés de l'enrobé. Le programme expérimental vise d'abord à présenter les différents matériaux utilisés pour la confection des enrobés bitumineux étudiés, ainsi que leurs propriétés. S'en suit une explication des procédures de fabrication et de malaxage des enrobés pour les différents essais. Pour conclure, une brève description des essais réalisés dans le cadre du projet sera présentée.

3.1 Description des matériaux utilisés

Cette section définit les caractéristiques des trois principaux matériaux utilisés dans la confection des enrobés, soit les granulats de calcaire, les granulats de verre et le bitume.

3.1.1 Caractéristiques des granulats de calcaire

Les granulats de calcaire qui ont été utilisés ont tous été échantillonnés à la carrière Mont-Bruno située à Saint-Bruno-de-Montarville. Toutefois, les classes granulaires 0-5 non-lavé et 0-1,25 proviennent respectivement des carrières St-Philippe et St-Roch-de-Richelieu. Étant donné un manque de ressources matérielles durant le projet, les granulats ont été recueillis sur deux années. Les granulats qui ont servi à fabriquer les enrobés de type ESG10 ont été échantillonnés en juin 2015, tandis que ceux qui ont servi à fabriquer les enrobés GB20 ont été échantillonnés en juillet 2016. La granulométrie, l'absorption ainsi que la densité ont été déterminées dans les laboratoires de l'ÉTS, tandis que les caractéristiques intrinsèques ont été fournies par les responsables de la carrière (Annexe IX). Les Tableaux 3.1 et 3.2 présentent une synthèse des propriétés physiques des granulats de calcaire.

Tableau 3.1 Caractéristiques des granulats utilisés pour l'enrobé ESG10

	Classe granulaire	5-10	0-5 non lavé	0-5 lavé	0-1,25	filler
	Provenance	St-Bruno	St-Philippe	St-Bruno	St-Roch-de-Richelieu	St-Bruno
	Nature minéralogique	Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire
	Type	Pierre	Criblure	Criblure	Sable	Fine
	Densité brute (d_{gb})	2,778 ³	2,694 ²	2,753 ²	2,600 ¹	2,700
	Absorption (%)	0,23 ³	0,92 ²	0,71 ²	1,07 ¹	1,00
	Tamis (mm)	(%) Passant				
Granulométrie	14	100				
	10	90	100	100		
	5	2,0	96	94		
	2,5	2,0	67	56	100	
	1,25	1,0	44	31	99	
	0,63	1,0	30	19	95	
	0,315	1,0	21	11	42	100
	0,16	1,0	15	7,0	8,0	97
	0,08	0,6	10,2	4,2	1,3	88
Caractéristiques intrinsèques	Micro-Deval (MD)(%) (LC 21-400)	13	39	10,6	20	S.O
	Los Angeles (LA)(%) (LC 21-070)	4	S.O	S.O	S.O	S.O
	MD+LA (%)	17	S.O	S.O	S.O	S.O
	Friabilité (%) (LC 21-101)	S.O	22,2	12,0	28,8	S.O
¹ Norme LC-21-065						
² Norme LC 21-066						
³ Norme LC 21-067						

Tableau 3.2 Caractéristiques des granulats utilisés pour l'enrobé GB20

	Classe granulaire	14-20	10-14	5-10	0-5 non lavé	0-5 lavé	0-1,25	filler
	Provenance	St-Bruno	St-Bruno	St-Bruno	St-Bruno	St-Philippe	St-Roch-de-Richelieu	St-Bruno
	Nature minéralogique	Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire
	Type	Pierre	Pierre	Pierre	Criblure	Criblure	Sable	Fine
	Densité brute (d _{gb})	2,791 ³	2,785 ³	2,839 ³	2,719 ²	2,747 ²	2,609 ¹	2,700
	Absorption (%)	0,23 ³	0,27 ³	0,35 ³	0,85 ²	0,74 ²	0,93 ¹	1,00
	Tamis (mm)	(% Passant)						
Granulométrie	28	100						
	20	85	100					
	14	34	88	100				
	10	10	21	92	100	100		
	5	1,0	18	4,0	97	89		
	2,5	1,0	13	1,0	69	55		
	1,25	1,0	1,0	1,0	47	32	100	
	0,63	1,0	1,0	1,0	34	20	96	
	0,315	1,0	1,0	1,0	24	12	63	100
	0,16	1,0	1,0	1,0	28	8,0	11	97
	0,08	0,3	0,6	0,8	11,1	4,3	1,2	88
Caractéristiques intrinsèques	Micro-Deval (MD)(%) (LC 21-400)	10	9	13	39	10,6	20	S.O
	Los Angeles (LA)(%) (LC 21-070)	4	4	4	S.O	S.O	S.O	S.O
	MD+LA (%)	14	14	17	S.O	S.O	S.O	S.O
	Friabilité (%) (LC 21-101)	S.O	S.O	S.O	22,2	12,0	28,8	S.O
¹ Norme LC 21-065								
² Norme LC 21-066								
³ Norme LC 21-067								

3.1.2 Caractéristiques du verre recyclé

Les particules de verre recyclé ont été échantillonnées au centre de tri Tricentris de Lachute. Au total, trois classes granulaires de verre ont été employées dans les différents enrobés. Elles sont classées selon la grosseur de particules qu'elles contiennent d'après l'appellation ASTM soit: 1) 10-16 (1,18-2,36mm), 2) 16-30 (0,60-1,18mm) et 3) 30-90 (0,16-0,60mm) (Figure 3.1).



Figure 3.1 Trois différents types de classe granulaire de verre recyclé mixte utilisés dans ce projet

Les propriétés ainsi que les caractéristiques granulométriques sont présentées au Tableau 3.3. Il est à noter que la densité et l'absorption des particules de verre des classes 10-16 et 16-30 ont été déterminées selon la norme NQ 2560-065/89 : *Détermination de la densité et de l'absorption du granulat fin*. Tandis que la norme NF EN 1097-7 : *Détermination de la masse absolue du filler-Méthode au pycnomètre*, a été utilisée afin de connaître les propriétés de la classe granulaire du verre de type 30-90. Le pourcentage de débris pouvant se retrouver dans le verre comme le papier, le carton et le plastique a également été identifié en chauffant chaque

type de verre dans un four à ignition à une température de 540°C. Cependant, à cette température, les traces de céramique et de pierre pouvant être contenues dans le verre n'ont pas pu être quantifiées.

Tableau 3.3 Propriétés des différentes classes de verre recyclé mixte

Propriétés		Verre 10-16 (1,18-2,36mm)	Verre 16-30 (0,6-1,18mm)	Verre 30-90 (0,16-0,60mm)
Nature minéralogique		Silice	Silice	Silice
Densité (d _{gb})		2,492	2,490	2,508
Absorption (%)		0,23	0,21	0,14
Impuretés (%)		1,10	0,72	0,42
Granulométrie	Tamis (mm)	(%) Passant		
	2,5	100	100	100
	1,25	6,3	97	100
	0,63	0	4,2	98
	0,315	0	0	16
	0,16	0	0	0
	0,08	0	0	0

3.1.3 Description du bitume utilisé

Les bitumes utilisés pour la confection des enrobés proviennent de l'usine Bitumar de Montréal. Pour l'enrobé de type ESG10, un bitume de PG 70-28 avec polymère SBS a été utilisé, tandis que pour le GB20, un PG 64-28 avec polymère SBS a été utilisé. Les classes de bitume ont été choisies selon les recommandations du MTMDET pour la zone climatique 1 qui regroupe notamment les régions administratives de Montréal, Laval et de la Montérégie (Annexe VI). Les caractéristiques de chacun des bitumes, provenant des fiches techniques du fournisseur, sont présentées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Propriétés du bitume PG70-28 et PG64-28

Grade de bitume		70-28	64-28
Polymère		SBS	SBS
Fournisseur		Bitumar	Bitumar
Lieu de fabrication		Montréal	Montréal
Essai de caractérisation	Normes	Résultats	
Masse volumique (g/cm ³) à 25°C	ASTM D70	1,019	1,023
TBA (°C)	ASTM D36	58,2	44,8
Viscosité Brookfield (Pa·s) à 135°C	AASHTO	1,097	0,414
Viscosité Brookfield (Pa·s) à 165°C	T316	0,312	0,121
Température élevée de caractérisation T _e (°C)	AASHTO T315	73,8	64,8
Température basse de caractérisation T _b (°C)	AASHTO	-32,8	-28,8
Module de rigidité S ₀ (60) MPa	T313	54	110
Température de malaxage (°C)	Charte Viscosité/ Température	156-170	149-163
Température d'entreposage (°C)		137-175	118-175

3.2 Formulation des enrobés bitumineux

Dans ce projet, des formulations existantes de ESG10 et de GB20, provenant de l'entreprise Construction DJL (Annexe I et II), ont été utilisées afin de créer des enrobés de référence qui respectent les exigences du MTMDET quant à la granularité, mais aussi quant aux propriétés volumétriques et de résistance à l'orniérage tel que spécifiées dans la méthode de formulation LC. Ces formulations ont ensuite été modifiées afin d'y incorporer des particules de verre tout en conservant le plus de similitudes possibles avec la formulation de référence. Les exigences quant à la formulation, les étapes de l'incorporation des particules de verre, ainsi que les différents combinés granulaires utilisés dans ce projet sont présentés dans cette section.

3.2.1 Exigences de formulation

Lors de la formulation d'enrobé, la méthode LC spécifie certains paramètres granulométriques suivant le type d'enrobé. Le Tableau 4202-1 (Annexe VII) indique des points de contrôle granulométriques auxquels chacun des enrobés doit se conformer, ainsi qu'une zone de

restriction qui demeure une recommandation du MTMDET. La méthode de formulation LC fixe également le nombre minimal de classes granulaires distinctes à utiliser. Dans le cas du GB20, trois classes distinctes sont exigées alors qu'il n'en faut que seulement deux pour l'ESG10. Une fois la granulométrie déterminée, l'enrobé doit se conformer à un pourcentage de V_{be} cible qui diffère pour chaque type d'enrobés bitumineux. L'enrobé doit également satisfaire les exigences d'aptitude au compactage (PCG), de résistance à l'orniérage et de tenue à l'eau. Ces derniers essais ainsi que les exigences sont traités plus en détail à la sous-section 3.4.

3.2.2 Incorporation des particules de verre dans les enrobés

La méthode d'incorporation des particules de verre dans les enrobés diverge en fonction du type d'enrobé. Celles-ci sont expliquées dans les sous-sections suivantes.

3.2.2.1 ESG10

Dans le cas du ESG10, l'incorporation de verre dans l'enrobé s'est faite par une substitution de 10% du volume total des granulats de calcaire. C'est-à-dire qu'une quantité de pierre de la classe 0-5 lavée a d'abord été tamisée. Puis, connaissant le volume retenu sur chaque tamis, un volume de pierre calcaire contenu sur les tamis 0,160, 0,315, 0,630 et 1,25 a été substitué par des particules de verre de même taille. Cette manipulation a pour but de remplacer précisément les granulats de calcaire par des particules de verre tout en respectant les proportions suivantes : 1) 50% de type 10-16 (1,18-2,36mm), 25% de type 16-30 (0,60-1,18mm) et 25% de type 30-90 (0,16-0,60mm). Une fois cette manipulation exécutée, on obtient un granulats 0-5 lavé qui est modifié et dont les particules de verre représentent 28% du volume. Étant donné qu'on utilise une proportion de 35,6% pour cette classe granulaire dans le combiné du ESG10, on obtient ainsi un combiné granulaire incorporant 10% de son volume en particules de verre. Cette façon de procéder est plus ardue, mais a pour but de limiter les écarts entre la granulométrie de l'enrobé de référence et celle des enrobés de verre. De cette façon, la granularité du combiné ne devient pas un facteur à considérer lors de l'analyse des résultats.

3.2.2.2 GB20

Dans le cas du GB20, c'est plutôt un ajustement des proportions des classes granulaires qui a été effectué. En fait, nous avons réduit tout simplement la proportion de certaines classes granulaires afin de pouvoir y incorporer 10% du volume total en verre tout en minimisant l'impact sur la granulométrie. Cette méthode, contrairement à celle employée pour les enrobés ESG10 avec verre, ne permet pas de conserver la granularité du combiné de l'enrobé de référence, car en réduisant complètement la proportion d'une classe de granulat, on enlève des particules de taille qui ne seront pas remplacées par le verre. Toutefois, cette méthode est beaucoup plus rapide et beaucoup plus pratique si on envisage la production en centrale d'enrobage des enrobés de verre. Pour l'enrobé GB20, la portion de verre 10-16 (1,18-2,36mm) représente 44%, la portion de verre 16-30 (0,60-1,18mm) représente 22% et la portion de verre 30-90 (0,16-0,60mm) représente 34%.

3.2.3 Présentation des différents combinés granulaires

Les différentes propriétés granulométriques de chacun des enrobés sont exprimées dans les Tableaux 3.5 et 3.6 tandis que les courbes granulométriques des différents enrobés sont présentées à la Figure 3.2 et 3.3 avec leurs points de contrôle quant à la distribution granulaire, ainsi que les zones de remplacement du verre.

3.2.3.1 ESG10

Dans le cas du ESG10, les proportions associées aux différentes classes de granulat sont sensiblement les mêmes, et ce, même si les granulométries de la pierre, fournies par la carrière DJL de St-Bruno, étaient différentes de celles obtenues en laboratoire (Annexe I). Le combiné granulométrique sans verre et avec verre est à toute fin pratique identique étant donné le mode d'incorporation du verre. La Figure 3.2 montre d'ailleurs une seule courbe granulométrique pour représenter les deux enrobés avec 10% de verre et l'enrobé de référence. L'enrobé contenant du verre et de la chaux possède quant à lui une granulométrie différente de celle des

deux enrobés étant donné que 2% de chaux ont été ajoutés au combiné granulaire en ajustant les proportions de certaines classes. La modification du pourcentage des classes granulaires avait pour but d'augmenter la proportion de particules passant au tamis 80um tout en gardant une courbe granulométrique similaire aux enrobés sans chaux.

Tableau 3.5 Caractéristiques granulométriques des enrobés ESG10 testés

Type de mélange			ESG10 référence	ESG10 avec verre	ESG10 avec verre + chaux
Proportion (%)	Calcaire (mm)	5-10	39	39,0	39,0
		0-5 lavé	35,6	26,4	25,6
		0-5	14,8	14,8	15,8
		0-1,25	8,9	8,9	6,7
		Filler	1,7	1,7	1,7
		Chaux hydratée	0	0	2,0
	Verre (mm)	1,18-2,36	0	4,6	4,6
		0,60-1,18	0	2,3	2,3
		0,160-0,60	0	2,3	2,3
	Tamis (mm)	14	Passant (%)	100	100
10		96		96	96
5		62		62	63
2,5		41		40	44
1,25		29		29	31
0,63		22		22	22
0,315		13		13	13
0,16		7,5		7,5	8,7
0,08		4,9		4,9	6,4
Densité brute du combiné, d_{gh} combiné			2,741	2,731	2,706

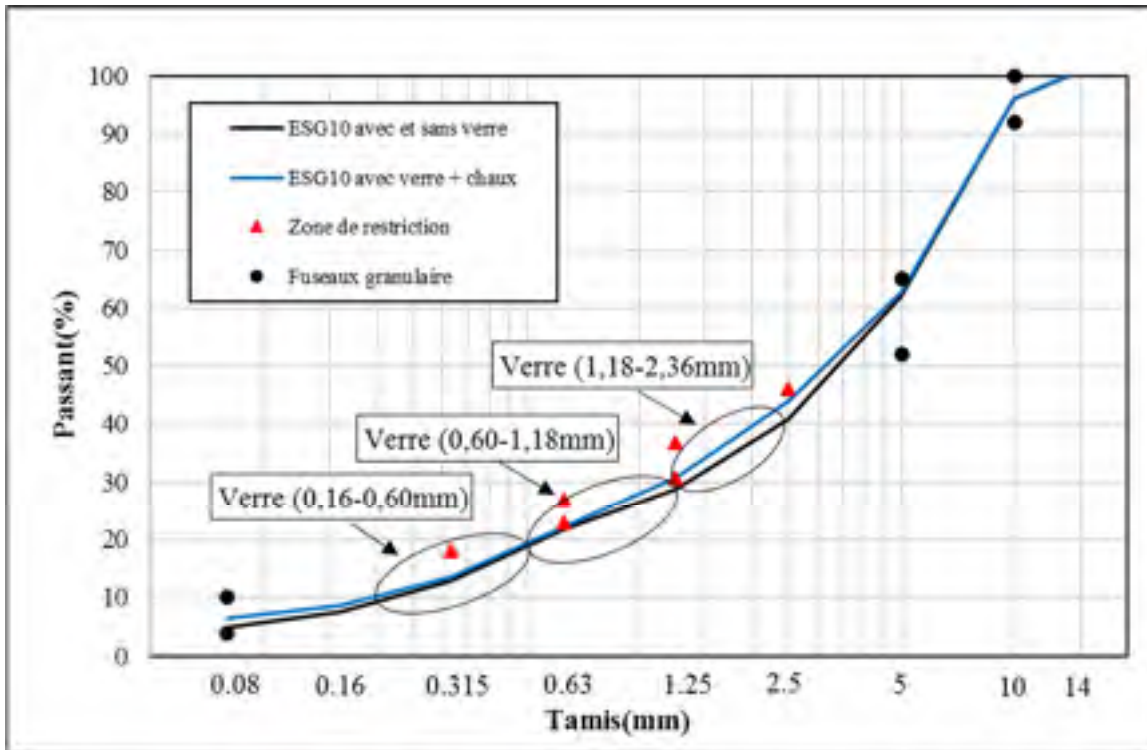


Figure 3.2 Courbe granulométrique des enrobés de type ESG10

3.2.3.2 GB20

La granulométrie de l'enrobé de type GB20 a été formulée différemment par rapport au ESG10. D'abord, au niveau de l'incorporation des particules de verre, comme mentionné précédemment, mais aussi au niveau de la similitude entre la formule de l'entreprise DJL et de notre propre formulation. Étant donné la différence entre les granulométries des classes granulaires des pierres échantillonnées et celles indiquées sur la fiche de la formule de l'enrobé GB20 telle que fournie par l'entreprise DJL, l'emploi des mêmes proportions donnait lieu à un combiné granulaire différent. C'est pourquoi dans ce cas-ci, les proportions indiquées sur la formule de l'enrobé GB20 (Annexe II) diffèrent de celles utilisées dans le cadre de ce projet. Cette façon de procéder a également été employée dans le but d'obtenir le plus de similitudes entre le combiné granulaire de l'enrobé de verre et celui de l'enrobé de référence. Les proportions de l'enrobé avec verre présentées dans le Tableau 3.6 sont celles qui permettaient

d'avoir le combiné granulaire le plus similaire malgré la technique d'incorporation du verre moins précise.

Tableau 3.6 Caractéristiques granulométriques des enrobés GB20 testés

Type de mélange		GB20 référence	GB20 avec verre	
Proportion (%)	Calcaire (mm)	14-20	28,1	22,5
		10-14	13,6	19,0
		5-10	10,5	11,0
		0-5 lavé	31,8	31,9
		0-5	8,8	0
		0-1,25	4,0	2,8
		filler	3,2	1,7
		Chaux hydratée	0	2,0
	Verre (mm)	1,18-2,36	0	4,0
		0,60-1,18	0	2,0
0,160-0,60		0	3,1	
Tamis (mm)	Passant (%)	28	100	100
		20	96	97
		14	80	83
		10	63	64
		5	45	45
		2,5	31	34
		1,25	22	22
		0,63	17	16
		0,315	12	10
		0,16	7,8	6,7
0,08	5,5	5,1		
Densité brute du combiné, $d_{gb\ combiné}$		2,767	2,734	

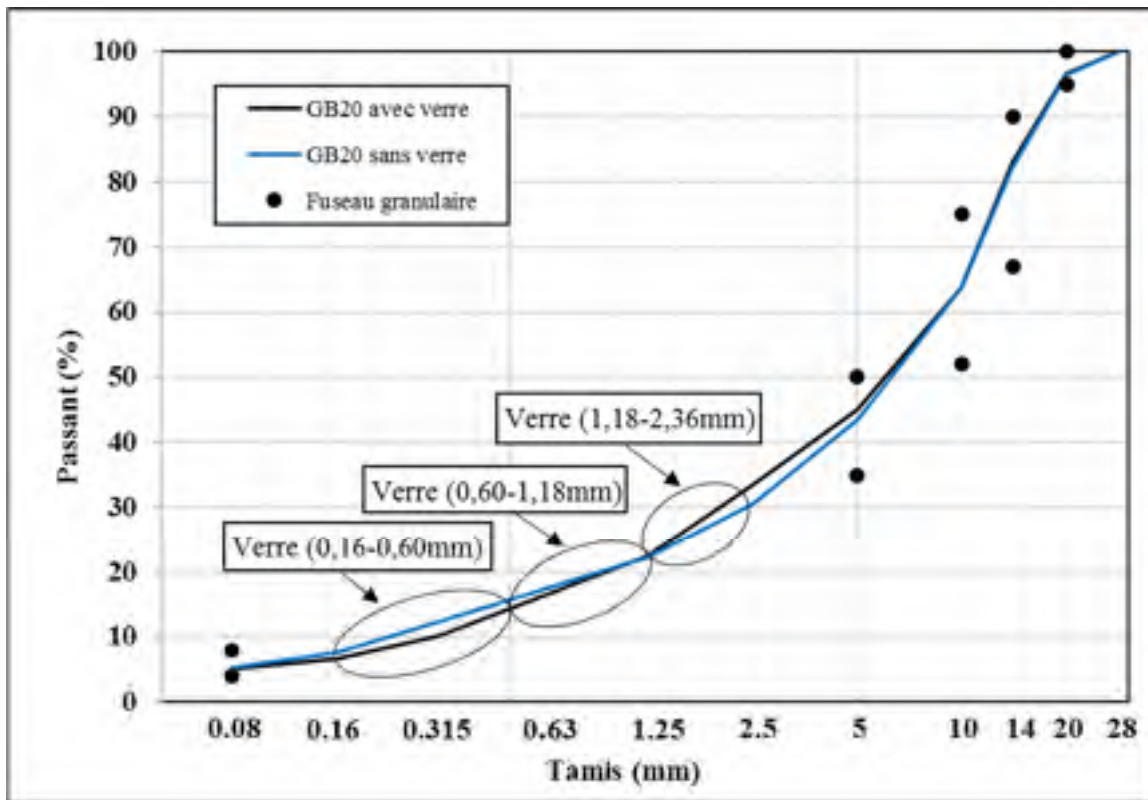


Figure 3.3 Courbe granulométrique des enrobés de type GB20

3.3 Confection des enrobés

Pour ce projet, les différents enrobés bitumineux ont tous été confectionnés en laboratoire. Cette section présente les différentes étapes suivies quant à la préparation des matériaux ainsi que les températures à respecter, le malaxage et finalement la période de cure.

3.3.1 Préparation du matériel de malaxage et des matériaux

Avant le malaxage de l'enrobé, il faut s'assurer que les granulats, le bitume, ainsi que les instruments qui serviront au malaxage possèdent une température donnée. Les préparatifs varient selon la quantité d'enrobé à confectionner. Pour une quantité inférieure à 10 kg, un malaxeur conventionnel a été utilisé (Figure 3.4a). Toutefois, pour une quantité supérieure à 10 kg, l'emploi du malaxeur thermo régulé a été requis (Figure 3.4b).

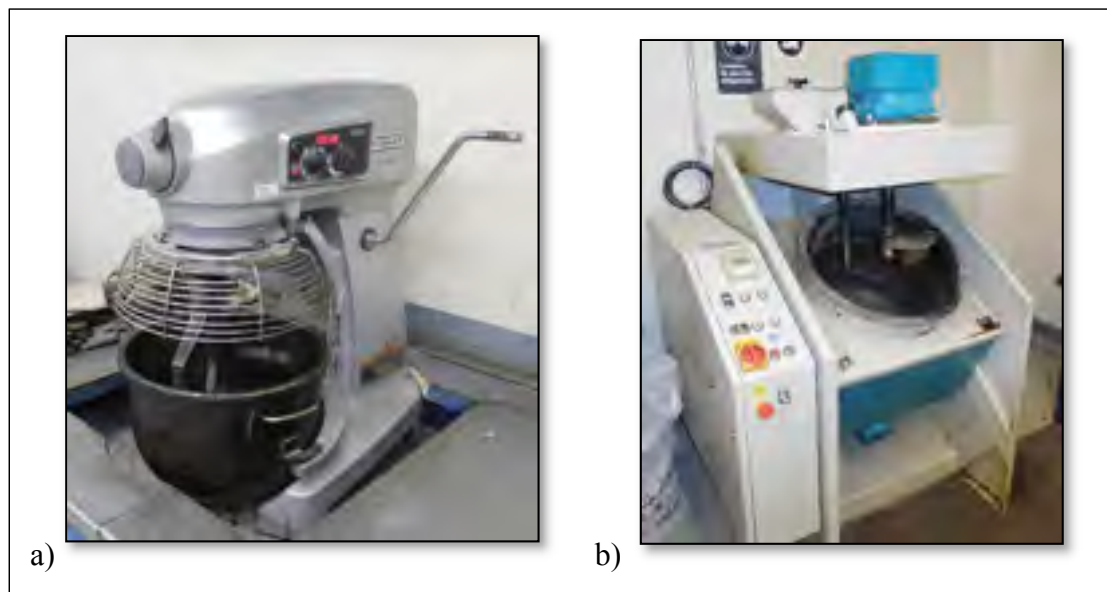


Figure 3.4 Malaxeurs utilisés en laboratoire
 a) Malaxeur utilisé pour les gâchées de moins de 10 kg
 b) Malaxeur chauffant utilisé pour les gâchées de plus de 10 kg

Pour les gâchées de moins de 10 kg, le bol du malaxeur, le batteur, ainsi que les granulats, ont été préalablement chauffés à une température de 15°C supérieure à la température de malaxage, propre à chacun des grades de bitume utilisé (Tableau 3.7), sans toutefois dépasser 180°C. En fait, une température de malaxage et une température de cure sont associées à chaque grade de bitume. La charte de températures se trouve en annexe de la méthode d'essai LC 26-003 : *Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la PCG*, mais peut également être déterminée avec la méthode d'essai LC25-007 : *Évaluation de la température associée à des viscosités*. Avant le malaxage, le bitume doit être chauffé à la température de malaxage indiquée, il ne doit toutefois pas être chauffé plus de deux heures après avoir atteint la température visée car il risque de s'oxyder.

Dans le cas des gâchées de plus de 10 kg, le bol et le batteur, qui sont intégrés au malaxeur, sont chauffés automatiquement à la température de malaxage et les granulats sont chauffés à la température de malaxage dans une étuve. Étant donné que le malaxeur chauffant est hermétique, on estime qu'il y aura très peu de perte de chaleur durant le malaxage, c'est pourquoi il n'est pas nécessaire de surchauffer les granulats comme c'est le cas pour les

gâchées de moins de 10 kg. Le Tableau 3.7 montre les températures utilisées pour un GB20 et un ESG10.

Tableau 3.7 Températures ciblées pour la confection des enrobés ESG10 et GB20

Type d'enrobé	Classe de bitume	Type de gâchée	Température de malaxage du bitume (°C)	Température de malaxage des granulats et du matériels (°C)	Température de curage ou de compactage
ESG10	PG 70-28	≤ 10 kg	168 ± 2	180 ± 2	160 ± 2
		≥ 10 kg		168 ± 2	
GB20	PG 64-28	≤ 10 kg	155 ± 2	170 ± 2	145 ± 2
		≥ 10 kg		155 ± 2	

3.3.2 Malaxage

Lorsque tous les éléments sont à la température visée, le malaxage peut être effectué. D'abord, pour les gâchées de moins de 10kg, les granulats ont été versés dans le bol de malaxage et mélangés manuellement pour homogénéisation. Dans le cas des enrobés incorporant de la chaux hydratée, celle-ci est incorporée aux granulats secs, chauds, avant l'incorporation du bitume. Un cratère est ensuite formé au centre des granulats pour verser la quantité exacte de bitume. Le bol et le batteur sont ensuite installés sur le malaxeur. Un premier malaxage d'une durée de 45 à 60 secondes est d'abord effectué, puis, après avoir gratté les rebords du bol avec une cuillère, un deuxième cycle de malaxage d'une durée d'environ 15 à 30 secondes est effectué. Un temps trop long de malaxage peut induire un vieillissement excessif du bitume. La procédure de malaxage pour le malaxeur thermo régulé est sensiblement la même. Toutefois, le premier cycle de malaxage ainsi que le deuxième cycle sont d'une durée de 45 secondes chacun.

3.3.3 Cure

Après malaxage, chaque enrobé est soumis à une cure à l'étuve, tout juste avant le compactage. L'enrobé est mis à l'étuve à température de chauffage dans un bol ou une panne de métal, uniformément réparti, et est recouvert pour empêcher l'oxydation du bitume. La température et le temps de cure varient selon l'essai effectué et le type d'enrobé comme présenté au Tableau 3.8.

Tableau 3.8 Temps et températures de cure pour les différents enrobés en fonction du type d'essai

Essais	Enrobés	Température (°C)	Temps	Méthode d'essai
d _{mm}	ESG10	160	120 min (Homogénéiser manuellement tous les 30 min)	LC26-045
	GB20	145		
PCG	ESG10	160	30 min après avoir atteint la température de 160°C	LC26-003
	GB20	145	30 min après avoir atteint la température de 145°C	
Ornniérage	ESG10	S.O	S.O	S.O
	GB20	145	60 min	LC26-400

3.4 Procédure des différents essais réalisés

Cette partie explique le principe des différents essais qui ont été réalisés. On y retrouve également la procédure et les exigences de fabrication des éprouvettes pour chacun des essais.

3.4.1 Essais volumétriques

En plus des critères granulométriques, la méthode de formulation LC du MTMDET demande qu'un enrobé respecte des critères volumétriques suivant la norme 4202 : *Caractéristique des*

enrobés à chaud selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées. D'abord, l'enrobé doit respecter le V_{be} cible qui peut être vérifié avec l'essai de densité maximale (d_{mm}) de l'enrobé. Il doit également respecter le pourcentage de vides en fonction du nombre de girations en subissant l'essai d'aptitude au compactage à la PCG. Ces deux essais sont décrits dans la présente section.

3.4.1.1 Essai de densité maximale (d_{mm}) de l'enrobé

La détermination de la densité maximale (d_{mm}) de l'enrobé permet de déterminer les propriétés volumiques d'un enrobé. L'essai s'effectue selon la méthode d'essai LC26-045 : *Détermination de la densité maximale*. La d_{mm} est essentielle pour déterminer les proportions volumétriques des constituants et quantifier ainsi le volume de bitume effectif (V_{be}) de l'enrobé. Pour un ESG10, le MTMDET demande d'obtenir un V_{be} de $12,2\% \pm 0,1$ tandis que cette valeur est de $10,2\% \pm 0,1$ pour un GB20. Si cette valeur n'est pas atteinte, la teneur en bitume doit être modifiée et un autre essai de densité maximale doit être réalisé pour s'assurer de la conformité de l'exigence. La d_{mm} est également nécessaire pour connaître le pourcentage de vides des enrobés lors des essais effectués avec la PCG ainsi que lors des essais d'orniérage.

3.4.1.2 Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG)

L'essai à la presse à cisaillement giratoire consiste à déterminer l'aptitude au compactage d'un enrobé conformément à la méthode d'essai LC26-003 : *Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire*. La presse a pour effet de recréer, au moyen des girations et d'une pression constante (600 kPa), l'action d'un rouleau compacteur. Dans ce projet, deux essais par mélanges d'enrobés ont été effectués afin de s'assurer de l'exactitude des résultats. Selon le type d'enrobé, des exigences établies par le MTMDET doivent être respectées selon le nombre de girations. Pour le ESG10, la méthode d'essai demande d'obtenir des résultats supérieurs à 11% à 10 girations, entre 4 et 7% à

Tableau 3.9 Exigences relatives à l'essai d'aptitude au compactage à la PCG pour un enrobé ESG10 et GB20

Nombre de girations	Exigence (% de vide)	
	ESG10	GB20
10	$\geq 11,0$	$\geq 11,0$
80	4,0-7,0	S.O.
120	S.O.	4,0-7,0
200	$\geq 2,0$	$\geq 2,0$

3.4.2 Essais thermomécaniques

Les essais thermomécaniques visent à déterminer les propriétés des enrobés à des températures variées. La résistance à l'orniérage ainsi que l'essai de module complexe (E^*) sont les deux essais thermomécaniques qui ont été réalisés dans ce projet. Leur fonctionnement est expliqué dans la présente section.

3.4.2.1 Détermination du module complexe (E^*)

L'essai du module complexe (E^*) vise à déterminer la rigidité du matériau dans le domaine des petites déformations suivant différents couples température/fréquence de sollicitation. Pour ce faire, une éprouvette d'enrobé est soumise à des cycles de tension/compression à l'aide d'une presse hydraulique.

Les éprouvettes pour l'essai de module complexe ont été confectionnées à l'aide de la presse à cisaillement giratoire. Un pourcentage de vides de 3% était visé pour tous les échantillons. Une fois l'échantillon conçu, une période de deux semaines est retenue avant de faire le carottage. Suite à cette période, une éprouvette de 80mm de diamètre a été carottée longitudinalement dans l'échantillon puis sciée aux deux extrémités afin d'obtenir une hauteur totale d'environ 150mm. L'éprouvette a ensuite été insérée dans une polisseuse afin que les deux extrémités de la carotte soient parallèles. Avant d'être soumise à l'essai de module complexe, l'éprouvette doit encore une fois subir une cure de deux semaines dans un bac de

sable. Le collage de deux casques en acier à chaque extrémité est ensuite nécessaire afin de réaliser le montage de l'essai dans la presse hydraulique. Le collage de ces casques est une étape importante et se fait à l'aide d'un mélange d'époxy à prise lente. Un banc de collage, conçu à cet effet, permet d'assurer l'alignement des casques sur l'éprouvette et évite ainsi les risques de torsion ou de flexion lors de l'essai. Le premier casque est collé sur le banc de collage durant une période minimale de 4h, tandis que le deuxième est directement collé sur la presse avant l'essai de module complexe. Les caractéristiques des éprouvettes d'enrobé bitumineux pour les modules complexes sont présentées dans les Tableaux 3.10 et 3.11.

Avant de placer l'éprouvette dans la presse, trois extensomètres d'une longueur de 50mm sont fixés avec des ressorts autour de l'échantillon à une intervalle de 120°. Ces extensomètres mesurent la déformation axiale de l'enrobé, tandis qu'une cellule de charge de 100kN est utilisée pour mesurer les charges. Lors des essais, la déformation visée était de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour s'assurer de demeurer dans le domaine linéaire de déformation (petites déformations). Une fois dans la presse hydraulique, l'enrobé est soumis à des cycles sinusoïdaux en tension et en compression sous différentes fréquences et températures (Figure 3.5). En tout, huit températures (35, 25, 15, 5, -5, -15, -25, -35°C) ont été évaluées à sept différentes fréquences (10, 3, 1, 0,3, 0,1, 0,03, 0,01Hz).

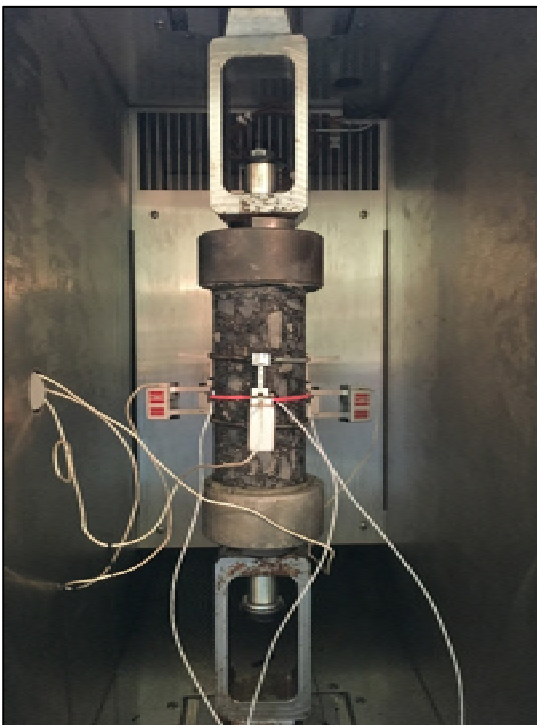


Figure 3.5 Éprouvette d'enrobé soumise à l'essai de module complexe

Une fois les résultats de l'essai de module complexe obtenus, la qualité de ceux-ci doit être vérifié par rapport à deux critères soit, 1) les indices de qualité des signaux de contrainte (σ), de déformation (ϵ) et des différents extensomètres qui doivent idéalement être inférieurs à 15% et 2) l'écart de déformation entre les différents extensomètres qui doit être inférieur à 25%. Un écart trop important implique que les déformations obtenues ne sont pas identiques dans l'entièreté de l'éprouvette et que l'échantillon n'est pas tout à fait sollicité en condition homogène. Suite aux tris des différentes données, les résultats valides restants sont analysés et modélisés avec le modèle 2S2P1D. Ce modèle est employé pour modéliser le comportement viscoélastique linéaire des matériaux bitumineux comme le bitume, le mastic et les enrobés.

Tableau 3.10 Propriétés des enrobés de type ESG10 utilisés pour les essais de module complexe

Enrobé	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	d_{mb}	d_{mm}	%vides
ESG10R-b _R	152,5	78,7	1851,3	2,504	2,540	3,3
ESG10V-b _V	148,4	78,7	1776,5	2,449	2,528	3,2
ESG10V-b _V ^{-6%}	149,1	78,7	1777,6	2,462	2,541	2,9
ESG10V-b _V ^{-17%}	138,1	78,7	1665,9	2,482	2,560	3,0
ESG10V-b _V ^{-6%} +CH	150,9	78,7	1807,9	2,469	2,527	2,2

Tableau 3.11 Propriétés des enrobés de type GB20 utilisés pour les essais de module complexe

Enrobé	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	d_{mb}	d_{mm}	%vides
GB20R-b _R	155,5	78,7	1897,1	2,53	2,605	2,9
GB20V-b _V	149,9	78,7	1810,3	2,486	2,575	2,6
GB20V-b _V ^{-10%} +CH	143,7	78,7	1732,6	2,498	2,597	4,1
GB20V-b _V ^{-20%} +CH	148,4	78,7	1870,3	2,519	2,615	3,1

3.4.2.2 Résistance à l'orniérage

L'essai d'orniérage consiste à évaluer les déformations permanentes d'un enrobé bitumineux avec le compacteur MLPC selon la méthode d'essai LC26-410 : *Résistance à la déformation des enrobés avec l'essai d'orniérage*. Deux plaques d'enrobés d'une même gâchée ont été compactées à l'aide du compacteur LCPC selon la méthode d'essai LC26-400 : *Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC*. Une teneur en vides de 5% est visée pour tous les enrobés.

Dans le cas du ESG10, la dimension de la plaque était de 500mm de longueur, 180mm de largeur et 50mm de hauteur, tandis que les plaques pour le GB20 possédaient les mêmes dimensions de surface, mais avec une hauteur de 100mm. Une fois les plaques confectionnées, celles-ci doivent reposer 48h à température ambiante avant de subir l'essai d'orniérage. Après avoir déterminé le pourcentage de vides des deux plaques par pesée hydrostatique, celles-ci sont introduites dans l'orniéreur (Figure 3.6). Une prise des mesures initiales est effectuée à 15 points précis sur la plaque. Une roue passe ensuite sur la plaque pour un total de 1000 cycles à température ambiante. Une deuxième prise de mesures est ensuite effectuée aux mêmes points et la température de l'orniéreur est élevée à 60°C. Cette température est attribuable aux classes de bitume utilisées dans ce projet. Les mesures sont ensuite reprises à 1000, 3000, 10 000 ainsi qu'à 30 000, 60 000 et 100 000 cycles dans le cas du GB20. Avec les profondeurs d'ornière mesurées, il est possible de déterminer le pourcentage d'ornière en fonction de l'épaisseur de la plaque. Des exigences du MTMDET sont établies pour chaque type d'enrobé comme le présente le Tableau 3.12.



Figure 3.6 Orniéreur

Type d'enrobé		ESG10	GB20
Épaisseur des plaques (mm)		50	100
Profondeur moyenne des ornières (%)	1,000 cycles	≤ 10%	S.O.
	3,000 cycles	≤ 20%	S.O.
	30,000 cycles	S.O.	≤ 10%

Tableau 3.12 Exigences du MTMDET quant à la résistance à l'orniérage de l'enrobé

3.4.3 Tenue à l'eau

Des essais de tenue à l'eau ont été effectués afin de confirmer la durabilité des enrobés avec verre. Les résultats de l'essai visent à comparer la résistance maximale d'une éprouvette d'enrobé saturé d'eau ayant subi des cycles de gel-dégel, vis-à-vis une éprouvette du même enrobé n'ayant subi aucune détérioration. Des éprouvettes sont confectionnées à l'aide de la PCG dans un moule de 100mm de diamètre afin d'obtenir des éprouvettes d'enrobés contenant $6\% \pm 0,5\%$ de vides. Ces éprouvettes sont ensuite coupées en deux afin d'obtenir deux échantillons d'une hauteur de $63\text{mm} \pm 1\text{mm}$. Un des deux échantillons sert de témoin tandis que l'autre sera partiellement saturé (70-80%) en eau avant d'être soumis à un cycle de gel-dégel (16h à $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ et 24h à $+60 \pm 1^\circ\text{C}$ dans un bassin d'eau) suivant la norme AASHTO T283-03 : *Resistance of compacted asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. Notons toutefois que dans le cadre de ce projet de recherche, le nombre de cycles de gel-dégel a été fixé à trois afin d'accentuer les effets dus aux cycles de gel-dégel et observer davantage la tenue à l'eau des différents enrobés. Une fois les trois cycles complétés, les échantillons sont soumis à l'essai de stabilité Marshall conformément à la méthode d'essai LC26-060 : *Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvette*. Connaissant la force maximale ayant été appliquée sur les échantillons avant la rupture, il est possible de déterminer la valeur de stabilité avec l'équation 3.1 suivante :

$$S = \frac{2000P}{D * h * \pi} \quad (3.1)$$

Où

S	Stabilité, kPa
P	Force maximale appliquée, N
D	Diamètre, mm
h	Hauteur, mm

Les propriétés de ces échantillons sont présentées au Tableau 3.13. Le rapport entre la stabilité de l'échantillon témoin et celle ayant été soumise à des cycles de gel-dégel est exprimé selon l'équation (3.2) suivante :

$$\text{Tenue à l'eau} = \frac{AT}{ST} \times 100 \quad (3.2)$$

Où

AT : la stabilité des éprouvettes d'enrobés avec cycle de gel-dégel, kPa

ST : la stabilité des éprouvettes d'enrobés sans cycle de gel-dégel, kPa

Tableau 3.13 Caractéristiques des éprouvettes des enrobés ESG10 pour la tenue à l'eau

Enrobé	Hauteur (mm)	Masse (g)	d_{mb}	d_{mm}	% de vides ¹
ESG10R-br	62,3	1171,4	2,382	2,540	6,2
	63,8	1147,1	2,391		5,9
	63,2	1129,0	2,388		6,0
	62,7	1157,6	2,374		6,6
ESG10V-bv ^{-6%}	64,5	1129,0	2,386	2,541	6,1
	63,5	1141,5	2,387		6,1
	62,2	1177,9	2,391		5,9
	63,4	1164,4	2,396		5,7
ESG10V-bv ^{-6%} +CH	63,1	1139,6	2,378	2,527	5,9
	63,7	1139,4	2,375		5,5
	62,8	1151,9	2,389		6,0
	62,4	1156,4	2,380		5,8

¹ La teneur en vide a été déterminée par pesée hydrostatique

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Suite à la réalisation des différents essais, les propriétés des enrobés ont pu être déterminées et comparées entre elles pour déterminer l'influence de certains paramètres tels que la diminution de bitume, l'ajout de chaux et bien sûr, l'ajout de verre. Cette section présente et discute des résultats de tous les essais réalisés sur l'enrobé bitumineux de type ESG10 et GB20. Dans un premier temps les résultats des essais volumiques seront exposés, suivis des essais thermomécaniques et finalement des essais de tenue à l'eau.

4.1 Essais volumétriques

Les essais de formulation visaient à vérifier si les valeurs de V_{be} et d'aptitude au compactage (PCG) respectaient les exigences de la méthode LC. Par la suite, les données recueillies ont été traitées afin de mieux comprendre l'influence du verre dans les enrobés bitumineux.

4.1.1 Densité maximale du mélange (d_{mm})

Suite à l'obtention de la valeur de densité maximale de l'enrobé (d_{mm}), il a été possible de valider la valeur du V_{be} pour les enrobés sans diminution de bitume. De plus, les valeurs de d_{mm} ont permis de déterminer les propriétés des différentes formulations, comme notamment le pourcentage de bitume absorbé (P_{ba}) et le volume de bitume absorbé (V_{ba}). Les valeurs de d_{mm} permettent également de déterminer la teneur en vides des enrobés lors de tous les essais ultérieurs.

4.1.1.1 ESG10

En observant les résultats indiqués dans le Tableau 4.1, on remarque tout d'abord que le ESG10R-b_R ainsi que le ESG10V-b_V possèdent exactement le même V_{be} . Cette valeur de 12,3% est d'ailleurs conforme à l'exigence du MTMDET qui est établi à $12,2 \pm 0,1$ pour un

ESG10. Toutefois, le ESG10R-br contient un pourcentage de bitume plus élevé que le ESG10V-bv pour un même V_{be} . Même si la diminution du pourcentage de bitume n'est que de 0,1%, passant de 5,3% à 5,2% par rapport à la masse totale, cela représente tout de même 2% de la masse de bitume dans l'enrobé. C'est donc dire que pour obtenir le même V_{be} , l'enrobé avec 10% de verre nécessite une moins grande quantité de bitume. Ce phénomène était prévisible étant donné l'absorption plus faible des granulats de verre qui est d'ailleurs corroboré par les valeurs de P_{ba} et de V_{ba} . En effet, le pourcentage de bitume absorbé, ainsi que le volume de bitume absorbé sont plus faibles dans l'enrobé avec verre, ce qui indique qu'une moins grande quantité de bitume a été absorbée par les granulats. Les enrobés ESG10V-bv^{-6%}, ESG10V-bv^{-17%} et ESG10V-bv^{-6%}+CH obtiennent quant à eux, des valeurs de V_{be} qui ne correspondent pas aux exigences du MTMDET étant donné la réduction de bitume. Deux enrobés ne faisant pas partie du programme expérimental avaient également été réalisés afin d'évaluer leurs propriétés volumiques. Il s'agit d'un enrobé avec 10% de verre contenant 5,4% de bitume (ESG10V-bv^{+4%}) ainsi que d'un enrobé avec 10% de verre contenant 4,5% de bitume (ESG10V-bv^{-13%}). Ces deux enrobés possèdent exactement le même combiné granulaire que les enrobés avec verre ne contenant pas de chaux.

Tableau 4.1 Résultats des propriétés volumétriques de l'enrobé bitumineux ESG10

Type d'EB	b%	d _{mm} *	d _{gb}	V _{be} (%)	P _{ba} (%)	V _{ba} (%)
ESG10R-b _R	5,3	2,540	2,741	12,3	0,38	0,90
ESG10V-b _V	5,2	2,528	2,731	12,3	0,26	0,62
ESG10V-b _V ^{+4%}	5,4	2,518	2,731	12,8	0,23	0,54
ESG10V-b _V ^{-6%}	4,9	2,541	2,731	11,5	0,26	0,60
ESG10V-b _V ^{-13%}	4,5	2,554	2,731	10,7	0,24	0,56
ESG10V-b _V ^{-17%}	4,3	2,560	2,731	10,3	0,21	0,51
ESG10V-b _V ^{-6%} +CH	4,9	2,527	2,706	11,2	0,39	0,93
* La valeur de d _{mm} est une moyenne de trois essais effectués b% Pourcentage massique de bitume d _{mm} Densité maximale du mélange d _{gb} Densité brute du combiné granulaire V _{be} Volume de bitume effectif P _{ba} Pourcentage de bitume absorbé V _{ba} Volume de bitume absorbé						

Une évaluation plus détaillée des valeurs de d_{mm} est également présentée à la Figure 4.1. Les d_{mm} de tous les échantillons pour les différents enrobés y sont inclus. On constate que la réduction du bitume d'un enrobé ayant le même combiné granulaire a pour effet d'augmenter proportionnellement la densité maximale du mélange. C'est plutôt logique étant donné qu'une réduction de bitume, ayant une masse volumique plus faible que celle des granulats, fera augmenter la densité totale de l'enrobé. Dans le cas du ESG10V-b_V^{-6%}+CH, on remarque que les valeurs de d_{mm} sont plus faibles que celles du ESG10V-b_V^{-6%} pour une même teneur en bitume, probablement dû au fait que la chaux hydratée possède une plus faible densité que les granulats de calcaire.

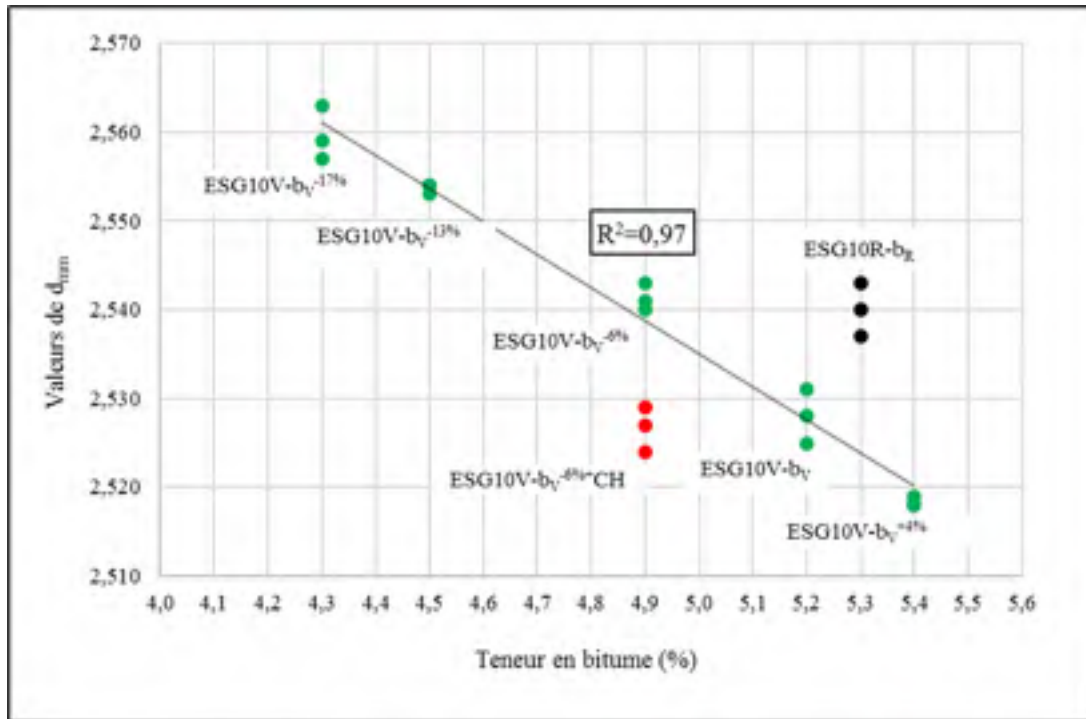


Figure 4.1 Évolution de la d_{mm} en fonction de la teneur en bitume pour les différents enrobés ESG10

Comme mentionné précédemment, la moins grande absorption de bitume de granulats de verre peut être validée avec le V_{ba} et le P_{ba} . Le P_{ba} représente le pourcentage en bitume absorbé en fonction de la masse de granulats (M_g), tandis que le V_{ba} représente le volume de bitume absorbé par rapport au volume total de l'enrobé sans vides interstitiels (V_{mm}). Le P_{ba} peut être calculé à l'aide de l'équation 4.1 tandis que la valeur de V_{ba} , qui est en relation avec celle du P_{ba} , peut être calculé conformément à l'équation 4.2.

$$P_{ba} = \left[\left(\frac{1}{d_{gb}} \right) - \left(\frac{1}{d_{ge}} \right) \right] * 100d_b \quad (4.1)$$

$$V_{ba} = P_{ba} * \left[\left(\frac{M_g}{d_b} \right) * \left(\frac{d_{mm}}{M_m} \right) \right] \quad (4.2)$$

Où :

- P_{ba} : Pourcentage de bitume absorbé;
- V_{ba} : Volume de bitume absorbé;
- d_{gb} : densité du granulat brute;
- d_{ge} : densité effective du granulat;
- M_g : masse des granulats;
- d_b : densité du bitume;
- d_{mm} : densité maximale du mélange;
- M_m : masse du mélange;

Logiquement, des enrobés ayant le même combiné granulaire devraient également posséder les mêmes valeurs de V_{ba} et de P_{ba} peu importe la teneur en bitume. La Figure 4.2 montre d'ailleurs les valeurs de V_{ba} associées aux enrobés ayant subi l'essai de d_{mm} . En prenant compte des écarts-types, on peut estimer que les enrobés avec verre, à l'exception du ESG10V-bv^{-6%}+CH, possèdent un V_{ba} très similaire qui tourne autour de 0,55%. L'enrobé ESG10V-bv^{-6%}+CH a quant à lui une absorption de bitume nettement supérieure à celle des enrobés avec verre, mais curieusement similaire à celle du ESG10R-b_R. Bien que cet enrobé devrait avoir une teneur en bitume absorbé plus faible que celle de l'enrobé de référence, plutôt comparable à celle des enrobés de verre, il semble que l'ajout de la chaux modifie le phénomène d'absorption. En fait, la chaux hydratée est composée de particules fines qui possèdent une grande surface spécifique. Ces particules sont également composées de plus de vides que les fillers de calcaire ce qui leur permet d'absorber d'avantage de bitume. Ce phénomène explique également pourquoi le ESG10V-bv^{-6%}+CH possède un V_{ba} plus faible que le ESG10V-bv^{-6%}+CH pour une même teneur en bitume.

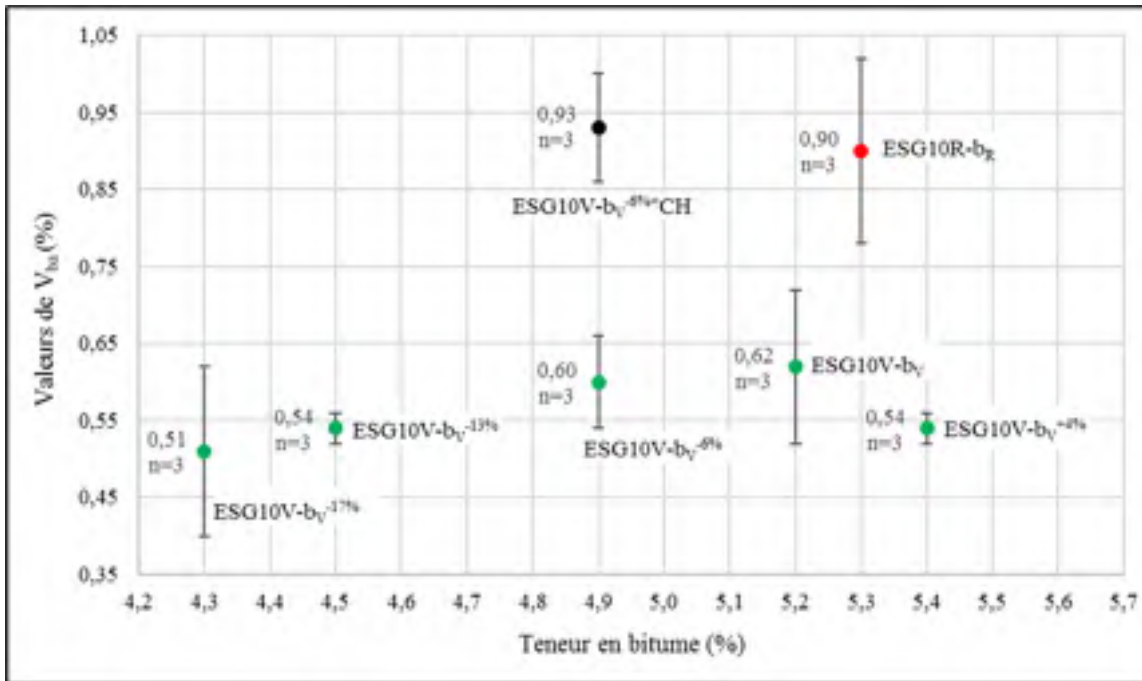


Figure 4.2 Valeurs de V_{ba} en fonction de la teneur en bitume pour les différents enrobés ESG10

Des particules de papier, de carton et de plastique ont également été retrouvées dans les différentes classes de verre. Il était donc intéressant de connaître l'impact de ces « impuretés » sur l'absorption du bitume dans l'enrobé. Comme mentionné dans le chapitre 3, la proportion de ces particules a été déterminée en calcinant celles-ci dans un four à ignition. Pour un ESG10 contenant 10% de verre, ce pourcentage est de l'ordre de 0,72% de la masse de verre. Bien sûr, les composants comme la céramique et la pierre, n'étant pas éliminés dans le four à ignition, sont exclus de ce pourcentage. Un mélange d'enrobé de type ESG10V-b_v^{-6%} a donc été confectionné avec du verre ayant été chauffé dans le four à ignition. La valeur de d_{mm} de cet enrobé est de $2,542 \pm 0,002$, tandis qu'une valeur de $2,541 \pm 0,002$ avait été obtenue pour le ESG10V-b_v^{-6%} n'ayant pas subi d'intervention. On obtient alors des valeurs de V_{ba} de 0,64% et 0,60% respectivement. Ces deux valeurs étant très rapprochées, on peut affirmer que, pour une proportion de 10% en verre, la proportion des particules de papier, de carton ou de plastique est trop faible pour avoir un impact considérablement sur les propriétés d'absorption des enrobés.

4.1.1.2 GB20

La compilation des résultats des propriétés volumétriques des enrobés GB20 étudiés est reportée dans le Tableau 4.2. Comme c'était le cas avec le ESG10, toutes les valeurs de d_{mm} des différents GB20 ont été exposées à la Figure 4.3 dans le but d'observer l'évolution de la d_{mm} en fonction du type de mélange et de sa teneur en bitume. L'enrobé GB20V-bv^{-6%}+CH, dont la d_{mm} a été évalué sans pour autant avoir fait l'objet de toute la série d'essais, a également été ajouté au Tableau 4.2. On remarque encore une fois une corrélation évidente entre la diminution de bitume et l'augmentation de la d_{mm} lorsque le combiné granulaire est identique. On observe également que pour une même teneur en bitume, l'ajout de 10% de verre, étant donné sa densité plus faible, réduit la valeur de d_{mm} pour une même teneur en bitume.

Tableau 4.2 Résultats des propriétés volumétriques pour l'enrobé bitumineux GB20

Type d'EB	b%	d_{mm} *	d_{gb}	V_{be} (%)	P_{ba} (%)	V_{ba} (%)
GB20R-bR	4,6	2,605	2,767	10,2	0,63	1,53
GB20V-bV +CH	4,6	2,575	2,734	10,2	0,60	1,46
GB20V-bV ^{-6%} +CH	4,3	2,588	2,734	9,4	0,61	1,48
GB20V-bV ^{-10%} +CH	4,1	2,597	2,734	8,9	0,65	1,58
GB20V-bV ^{-20%} +CH	3,7	2,615	2,734	7,9	0,64	1,59
* La valeur de d_{mm} est une moyenne de trois essais b% Pourcentage massique de bitume d_{mm} Densité maximale du mélange d_{gb} Densité brute du combiné granulaire V_{be} Volume de bitume effectif P_{ba} Pourcentage de bitume absorbé V_{ba} Volume de bitume absorbé						

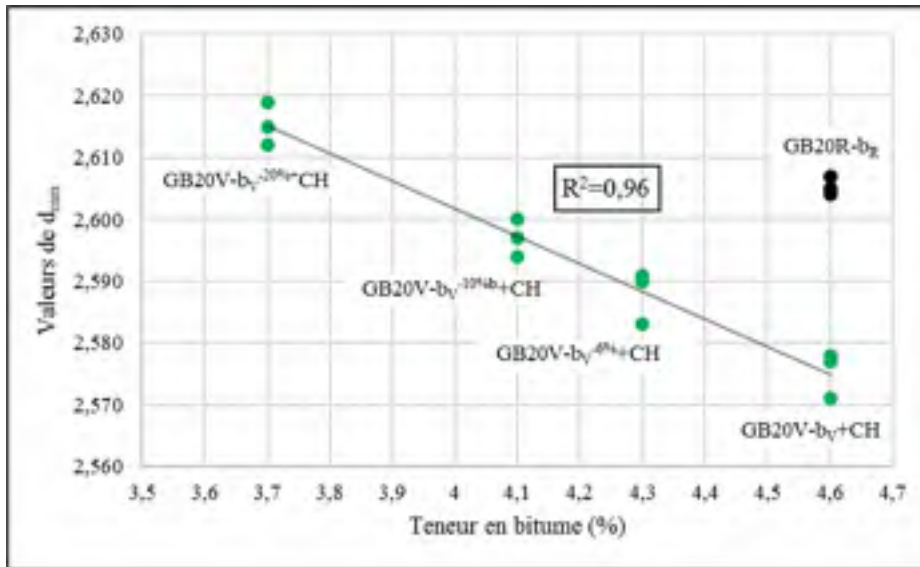


Figure 4.3 Évolution de la d_{mm} en fonction de la teneur en bitume pour les différents enrobés GB20

Pour ce qui est des valeurs de V_{be} , on remarque que contrairement au ESG10, l'enrobé de référence GB20R- b_R et l'enrobé GB20V- b_v +CH requiert le même pourcentage de bitume (4,6%) pour obtenir un V_{be} cible de $10,2\% \pm 0,1\%$. Comme expliqué précédemment, les particules de verre absorbent une moins grande quantité de bitume que les granulats de calcaire de même taille, toutefois, dans ce cas-ci, tous les enrobés de type GB20 contenant du verre contiennent également 2% de chaux hydratée. On peut donc présumer que l'ajout de chaux hydratée vient contrecarrer le fait que les granulats de verre ont une très faible absorption. En effet, en observant les valeurs de V_{ba} présenté à la Figure 4.4, on remarque que le volume de bitume absorbé de tous les enrobés est similaire. En tenant compte des écarts-types, on peut estimer que la valeur de V_{ba} des enrobés avec verre tourne autour de 1,50%, tandis que la valeur moyenne de l'enrobé de référence est de 1,53%. Cette observation montre que si l'on veut réduire la teneur en bitume d'un enrobé en y incorporant des particules de verre et en respectant le V_{be} , il faudrait diminuer la teneur en chaux jusqu'à un pourcentage qui permet d'obtenir des performances similaires.

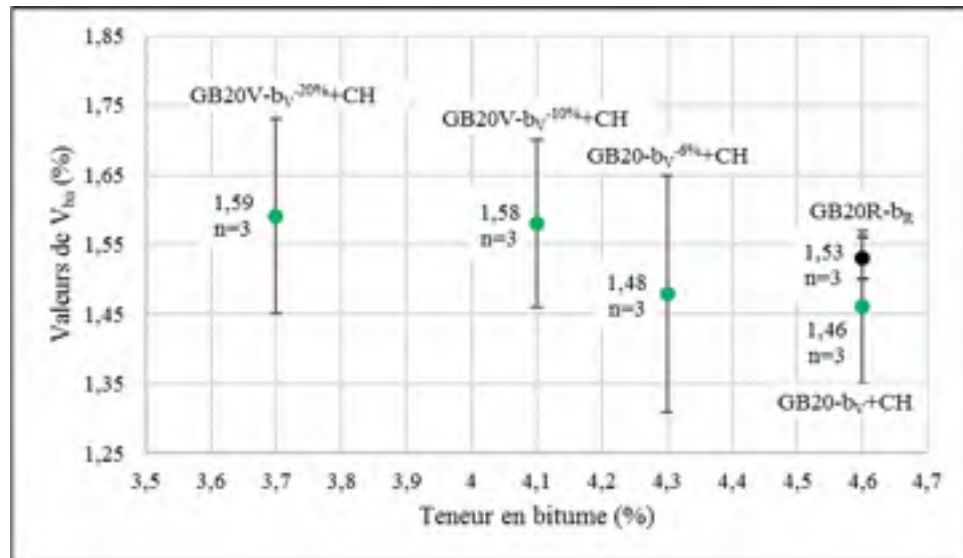


Figure 4.4 Valeurs de V_{ba} en fonction de la teneur en bitume pour les différents enrobés GB20

4.1.2 L'aptitude au compactage (PCG)

L'essai de détermination de la teneur en vides à la PCG a permis de déterminer le pourcentage de vides des enrobés sous plusieurs niveaux de compactation. Les résultats sont traités séparément selon les deux familles d'enrobés étudiés (ESG10 et GB20).

4.1.2.1 ESG10

Suite aux essais à la PCG, les résultats présentés au Tableau 4.3 montrent que les enrobés ayant subi une réduction de bitume possèdent une plus faible aptitude au compactage. De surcroit, ces enrobés ne respectent pas les exigences de la méthode de formulation LC, obtenant des teneurs en vides supérieures à 7% à 80 girations. Cette situation était prévisible étant donné que les granulats, étant moins lubrifiés par le bitume, avaient plus de difficultés à se densifier.

On remarque également que dans le cas du ESG10R-br et du ESG10V-bv les valeurs de teneur en vides à 80 girations sont très près de la limite permise. Cette situation pourrait être due à la granulométrie de ces enrobés qui ne contiennent pas suffisamment de particules fines. En effet,

au niveau du ESG10, les proportions des classes granulaires sont restées les mêmes que la formulation de référence DJL et ce, même si les granulométries des classes granulaires étaient différentes. On obtenait donc des combinés granulaires ayant un pourcentage de passant sur le tamis de 80 μ m de 4,9%, tandis que la formule de référence DJL (Annexe I) indiquait un pourcentage passant de 6,3% sur ce même tamis. Étant donné que l'ajout de filler diminue le volume de vides intergranulaires (Lamothe, 2014), il est donc réaliste de penser que la teneur en vides de ces enrobés aurait été moins près des limites et plus près de la valeur moyenne de l'exigence (5,5%). C'est d'ailleurs le cas de l'enrobé ESG10V-bv^{-6%}+CH qui, malgré sa réduction de 6% de bitume, possède un comportement au compactage semblable aux enrobés ESG10R-br et ESG10V-bv. En effet, l'ajout de 2% de chaux a permis d'atteindre un pourcentage de passant de 6,4% au tamis 80 μ m, ce qui se rapproche beaucoup plus de la valeur visée.

Tableau 4.3 Résultats obtenus à la PCG pour un enrobé bitumineux ESG10

Girations	Pourcentage de vides (%)					Exigences
	ESG10R-br	ESG10V-bv	ESG10V-bv ^{-6%}	ESG10V-bv ^{-17%}	ESG10V-bv ^{-6%} +CH	
0	25,9	24,6	25,3	26,3	25	S.O
10	14,7	14,2	15,6	17,3	14,9	≥11%
80	6,7	6,8	8,4	10,3	6,9	4-7%
200	4,0	4,6	6,0	6,9	4,6	≥2%

Les résultats des essais à la PCG sont reportés à la Figure 4.5. Les résultats montrent que l'enrobé ESG10R-br et l'enrobé ESG10V-bv se compactent différemment et ce malgré le fait que le volume de bitume effectif soit le même ($V_{be} = 12,3\%$). En effet, à son état initial dans le moule, c'est-à-dire à la giration 0, l'enrobé avec verre se compacte mieux que l'enrobé de référence. On peut observer ce comportement durant les premières girations jusqu'à ce que les teneurs en vides deviennent semblables vers 60 girations et qu'au final, l'enrobé de référence obtienne une teneur en vides plus faible à 200 girations. En faisant le parallèle avec la signification en chantier de chaque giration, on peut traduire que le ESG10-10V est plus dense et plus compacté à la sortie de la paveuse ($N = 10$ girations). Suite au passage des équipements

de compaction ($N = 80$ girations), on constate que le ESG10V-bv et le ESG10R-br ont pratiquement le même état de compaction. Pour ce qui est de l'état de l'enrobé à la fin de sa durée de vie (200 girations), le ESG10R-br contient moins de vides que l'enrobé ESG10V-bv. En définitive, suivant un V_{be} donné, l'enrobé de verre se compacte plus facilement et demeure plus stable d'un point de vue volumétrique à long terme.

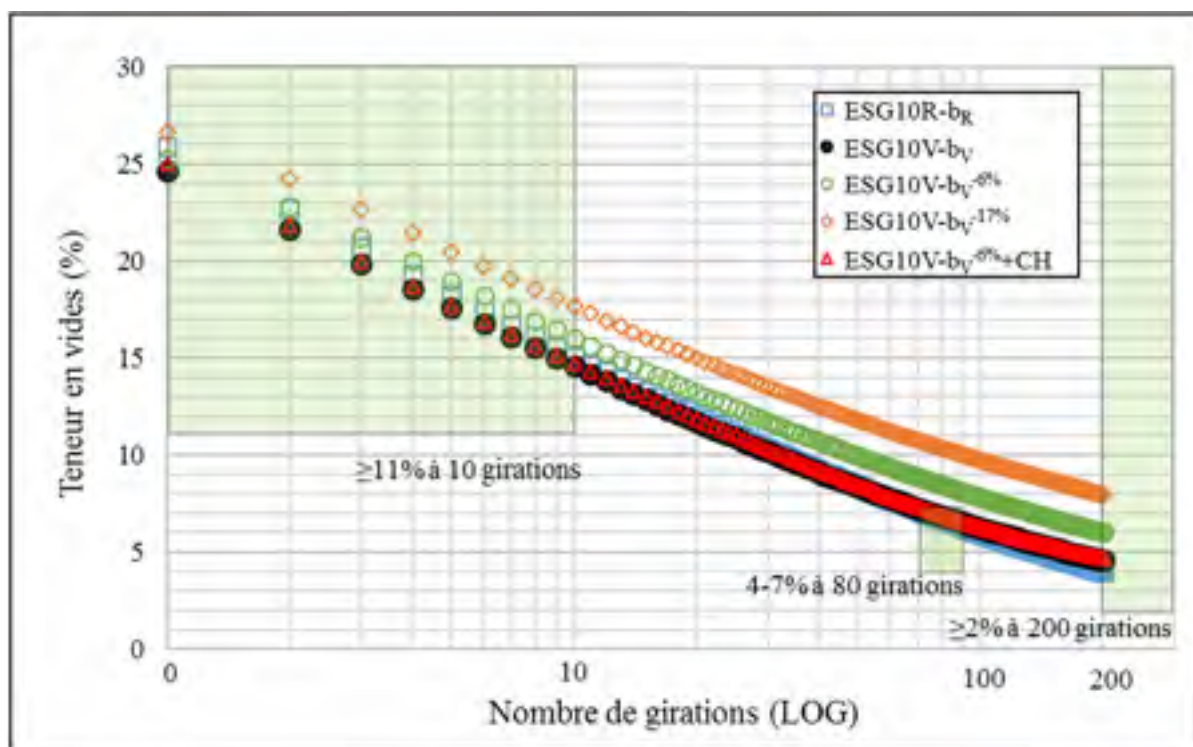


Figure 4.5 Résultats de l'essai PCG pour un ESG10 en représentation logarithmique

Un essai a également été fait sur un ESG10R-br ayant subi une réduction de 6% de bitume par rapport à sa teneur en bitume initiale, pour confirmer la tendance de compaction entre le ESG10R-br et le ESG10V-bv. Les résultats du ESG10R-br^{-6%} et du ESG10V-bv^{-6%}, exposés dans le Tableau 4.4, confirment cette tendance, c'est-à-dire que l'enrobé avec verre contient moins de vides dans les premières girations, possède un état similaire à 80 girations et possède plus de vides lors des dernières girations. Cette observation avait également été soulignée par Lachance-Tremblay et al. (2016) sur un ESG14. Comme mentionné par Hughes (1990), la texture plus lisse des granulats de verre permet un meilleur mouvement entre les particules lors

du compactage ce qui lui permet d'obtenir un meilleur arrangement. Dickson (1973) avait également évoqué que les enrobés avec verre retiennent la chaleur plus longtemps, ce qui pourrait également expliquer pourquoi celui-ci se compacte mieux dans les premières girations. En fait, on porter l'hypothèse qu'un bitume plus chaud sera également moins visqueux et permettra davantage la lubrification des granulats et leurs mouvements relatifs.

Tableau 4.4 Résultats obtenus à la PCG pour un ESG10 de référence et un ESG10 avec verre ayant subi une réduction de 6% de bitume.

Pourcentage de vides (%)			
Girations	ESG10R-b_R^{-6%}	ESG10V-b_V^{-6%}	Exigences
0	26,3	25,3	S.O
10	16,3	15,6	≥11%
80	8,4	8,4	4-7%
200	5,6	6	≥2%

4.1.2.2 GB20

Les résultats du GB20 obtenus à la PCG sont présentés au Tableau 4.5. Comme dans le cas du ESG10, les résultats montrent une diminution de l'aptitude au compactage lorsque les enrobés possèdent moins de bitume. Toutefois, dans ce cas-ci, en plus du GB20R-b_R et du GB20V-b_V+CH, l'enrobé GB20V-b_V^{-10%}+CH se conforme également aux exigences établies par la méthode de formulation LC malgré sa diminution de bitume de 10%. Dans le cas du GB20 toutefois, l'exigence est différente, car les pourcentages de vides doivent être entre 4% et 7% à 120 girations contrairement à 80 girations pour le ESG10. En effet, le GB20 contient moins de bitume pour être en mesure de bien résister à l'orniérage et d'obtenir une bonne capacité de support et c'est pourquoi il est plus difficile à compacter.

Tableau 4.5 Résultats obtenus à la PCG pour un enrobé bitumineux de type GB20

Girations	Pourcentage de vides (%)				Exigences
	GB20R-b _R	GB20V-b _V +CH	GB20V-b _V ^{-10%} +CH	GB20V-b _V ^{-20%} +CH	
0	25,5	24,2	25,5	27,6	S.O
10	15,1	13,4	15,4	17,6	≥11%
120	5,4	4,4	6,6	9,1	4-7%
200	4,0	3,2	5,4	7,7	≥2%

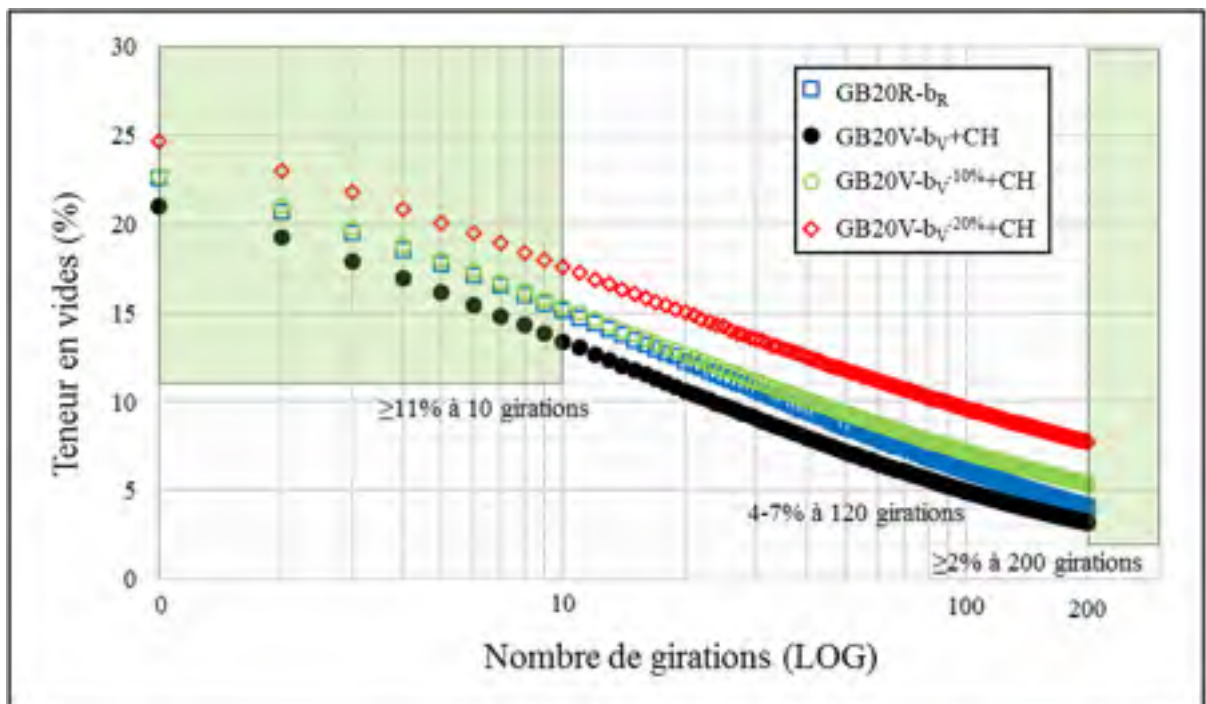


Figure 4.6 Résultats de l'essai PCG pour un GB20 en représentation logarithmique

On note également que le GB20V-b_V+CH se compacte davantage que le GB20R-b_R et ce, à chaque giration contrairement au ESG10. Toutefois, en regardant la Figure 4.6, on remarque que plus le nombre de girations augmente et plus les valeurs du GB20R-b_R ont tendance à se rapprocher de celle du GB20V-b_V+CH. Encore une fois la texture plus lisse du verre, ainsi que sa capacité à retenir plus longtemps sa chaleur pourraient expliquer ce phénomène.

4.1.2.3 Sommaire

Les essais à la PCG ont permis de d'observer l'aptitude au compactage des différents enrobés. On en conclut que les enrobés avec verre se compactent mieux dans les premières girations que l'enrobé de référence pour un même V_{be} . Également, il a été observé que la réduction de bitume réduisait l'aptitude au compactage.

4.2 Orniérage

L'essai d'orniérage a permis d'observer l'influence des particules de verre sur les déformations permanentes par rapport à un enrobé standard. De plus, il a permis de déterminer l'impact d'une diminution de bitume sur la résistance à l'orniérage. Dans un premier temps, les enrobés de type ESG10 sont traités, suivi des enrobés de type GB20.

4.2.1 ESG10

Le Tableau 4.6 montre les pourcentages d'ornières à 1 000, 3 000 et 10 000 cycles. Les exigences établies par le MTMDET pour l'enrobé ESG10 sont de moins de 10% d'ornière à 1,000 cycles et de moins de 20% à 3,000 cycles.

Tableau 4.6 Résultats des essais à l'orniérage pour le ESG10

Type d'EB	# de plaque	b (%)	V _{be} (%)	V _i (%) ¹	Nombre de cycles		
					1,000	3,000	10,000
					Profondeur d'ornière (%)		
ESG10R-b _R	1	5,3	12,3	6,6	5,3	6,4	7,3
	2			7,0	6,0	6,9	7,8
	Moy.			6,8	5,7	6,7	7,6
ESG10V-b _V	1	5,2	12,3	7,2	5,0	6,8	9,7
	2			6,8	4,9	6,2	8,9
	Moy.			7,0	5,0	6,5	9,3
ESG10V-b _V ^{-6%}	1	4,9	11,5	7,4	5,3	6,5	7,7
	2			7,3	5,0	6,2	7,3
	Moy.			7,4	5,2	6,4	7,5
ESG10V-b _V ^{-17%}	1	4,3	10,3	7,3	2,2	3,4	4,1
	2			7,5	3,0	4,0	5,2
	Moy.			7,4	2,6	3,7	4,7
ESG10V-b _V ^{-6%} +CH	1	4,6	11,2	7,2	2,5	3,6	4,7
	2			6,9	2,3	4	4,8
	Moy.			7,1	2,4	3,8	4,8

¹ La teneur en vides a été déterminée par pesée hydrostatique

La Figure 4.7 montre que tous les enrobés respectent aisément les exigences à 1,000 et 3,000 cycles. On remarque également que la diminution de la teneur en bitume a un effet significatif sur la résistance à l'orniérage. Ce comportement était prévisible puisque pour des granulométries semblables, c'est le volume de vides intergranulaires comblé par le bitume (VCB) qui dicte en partie les performances à l'orniérage. En effet, un VCB élevé diminuera le frottement interne entre les particules. Également, plus le VCB est faible et plus les sollicitations seront reprises par les granulats (Lamothe, 2004). Dans le cas contraire, c'est le bitume qui reprend ces sollicitations, ce qui peut causer les déformations permanentes. Les valeurs de VAM et de VCB sont d'ailleurs présentées au Tableau 4.7.

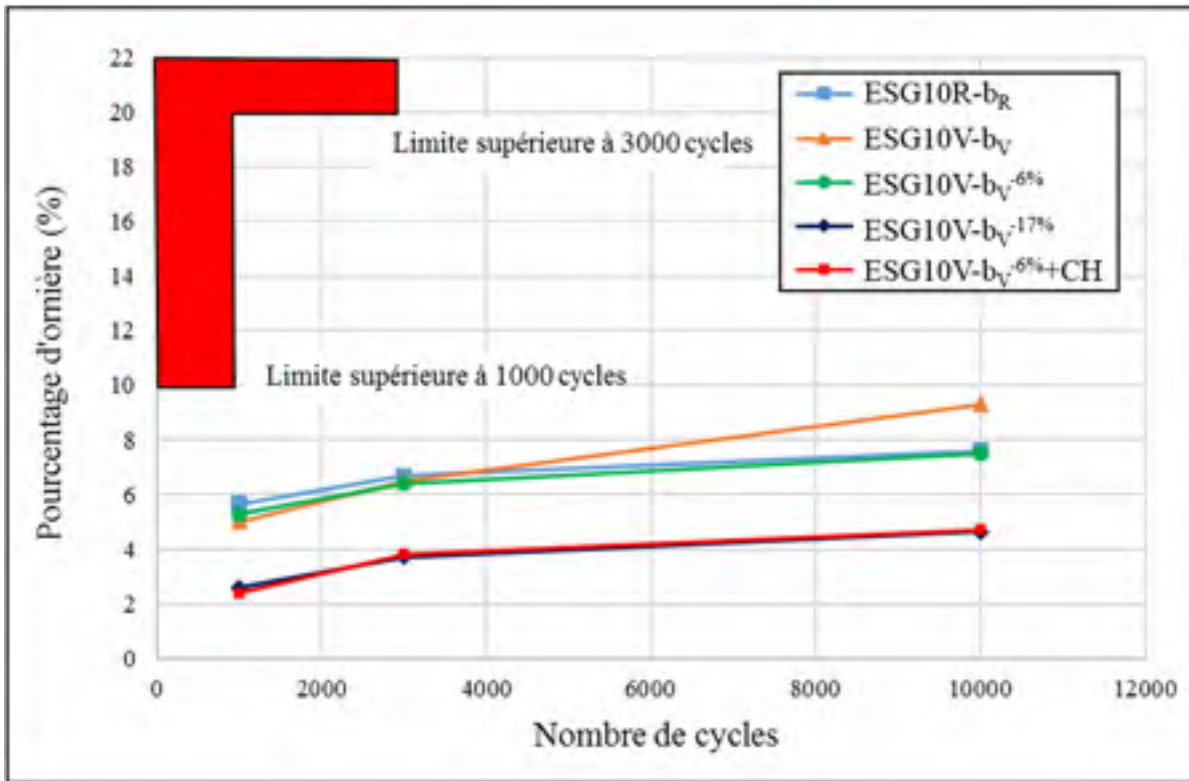


Figure 4.7 Résultats à l'orniérage des enrobés de type ESG10

Tableau 4.7 Pourcentage des vides intergranulaires (VAM) et des vides intergranulaires comblés par le bitume (VCB) pour les enrobés ESG10

Enrobés	ESG10R-b _R	ESG10V-b _V	ESG10V-b _V ^{-6%}	ESG10V-b _V ^{-17%}	ESG10V-b _V ^{-6%} +CH
VAM (%)	18,2	18,4	18,0	16,9	17,5
VCB (%)	67,2	66,6	63,8	60,8	64,1

Pour ce qui est de la comparaison entre les enrobés avec verre et l'enrobé de référence, on observe que le ESG10V-b_V ornière moins que le ESG10R-b_R à 1,000 cycles et à 3,000 cycles, mais que par la suite, passé les 4,000 cycles, son pourcentage d'ornière augmente de manière plus importante. Cette tendance a d'ailleurs été observée par Lachance-Tremblay et al. (2016) pour un enrobé ESG14 comportant 10% de verre. Pour ce qui est de l'enrobé ESG10V-b_V^{-6%}, il offre des performances très similaires à l'enrobé de référence et ce, même si son VCB est

plus faible. L'enrobé ESG10V-bv^{-6%}+CH présente quant à lui un comportement presque identique à l'enrobé ESG10V-bv^{-17%} et nettement meilleur qu'au ESG10V-bv^{-6%} qui possède pourtant presque le même VCB. En fait, comme mentionnées dans la revue de littérature, des études ont montré que la chaux réduit la perte de rigidité du bitume à de hautes températures. Comme les essais d'orniérage ont été effectués à 60°C, l'enrobé contenant de la chaux était plus rigide que les autres enrobés ce qui lui confère une meilleure résistance aux déformations permanentes. De plus, l'ajout de chaux a augmenté la proportion de particules passant au tamis 80µm. Cette addition a eu pour effet de combler des vides et de diminuer le VAM.

Suite à ces résultats, on peut affirmer qu'un enrobé de type ESG10 avec 10% de verre a une meilleure résistance à l'orniérage qu'un enrobé sans verre à 1,000 et 3,000 cycles, qui sont associés aux exigences, mais que celui-ci a tendance à se déformer beaucoup plus passé un certain nombre de cycles s'il n'y a pas réduction de sa teneur en bitume. Cette affirmation est de concert avec les conclusions de Wu (2004) et de Lachance-Tremblay et al. (2016). De plus, contrairement aux études de Lachance-Tremblay réalisées sur un ESG14, l'ajout de 10% de verre, dans notre enrobé ESG10 ayant un V_{be} cible, permet d'atteindre les exigences de la méthode de formulation LC.

Certaines hypothèses peuvent être apportées quant à la nature de l'écart entre les enrobés de verre et l'enrobé de référence lorsqu'on atteint un certain nombre de cycle. La compaction initiale des plaques d'enrobés par exemple peut être un facteur qui modifie les performances à l'orniérage. Comme mentionné dans la revue de littérature, un enrobé qui contient trop de vides continuera de se compacter sous la charge du pneumatique (consolidation), tandis que pour une trop faible teneur en vides, des excroissances de chaque côté des traces de roue risquent de se développer (fluage). Pour observer la différence de compaction des différentes plaques d'enrobés, la teneur en vides initiale ainsi que la teneur en vides après 10,000 cycles a été prise sur chacune des plaques (Tableau 4.8).

Tableau 4.8 Teneur en vides des plaques d'orniérage du ESG10 avant et après les 10 000 cycles

Teneur en vides (%)	ESG10R-b _R	ESG10V-b _V	ESG10V-b _V ^{-6%}	ESG10V-b _V ^{-17%}	ESG10V-b _V ^{-6%} +CH
V _i (%) avant essai*	6,8	7,0	7,4	7,4	7,1
V _i (%) après essai*	6,2	6,1	6,6	6,7	6,2
Perte de vides (%)	0,6	0,9	0,8	0,7	0,9
* Moyenne de deux plaques d'enrobé					

Étant donné que les teneurs en vides initiales ainsi que la perte de vides totale sont assez similaires entre les différents enrobés, on peut croire que la différence de profondeur d'ornière mesurée n'est pas directement en lien avec les teneurs en vides.

Outre les teneurs en bitume et la teneur en vides, d'autres paramètres peuvent également influencer le comportement de l'enrobé aux déformations permanentes et expliquer les raisons de l'écart entre l'orniérage des enrobés de verre et celui de l'enrobé de référence. La granulométrie est habituellement un facteur qui peut influencer les performances à l'orniérage, mais dans ce cas-ci, exception faite du ESG10V-b_V^{-6%}+CH, les granulométries des enrobés sont quasi identiques. C'est donc vers les caractéristiques des granulats qu'il faut diriger l'analyse.

En fait, l'angularité ainsi que la texture de surface des granulats auront un impact sur la résistance à l'orniérage (Lamothe, 2004). Pour déterminer ces deux propriétés, l'essai LC21-075 : *Détermination du coefficient d'écoulement des granulats fins*, a été effectué sur les particules fines des granulats de calcaire et celles des granulats de verre. Cet essai a pour but d'obtenir le coefficient d'écoulement des granulats. Plus les granulats fins ont une surface rugueuse et sont anguleux, plus le coefficient d'écoulement sera élevé. Dans ce cas-ci, des granulats de tailles allant de 0,16mm à 2,5mm ont été utilisés en s'assurant d'avoir la même granulométrie pour les deux types de matériaux. Avec l'équation 4.3, le coefficient d'écoulement a été déterminé. Celui-ci est d'ailleurs présenté dans le Tableau 4.9.

$$C_e = \frac{t^* D_{gb}}{k} \quad (4.3)$$

Où

- C_e : coefficient d'écoulement des granulats fins;
- t : temps d'écoulement moyen corrigé en seconde;
- d_{gb} : densité brute des granulats fins;
- k : une seconde

Tableau 4.9 Comparaison du temps d'écoulement entre les particules fines de verre et de calcaire

Matériaux	Nb de répétitions	Temps Moy. (s)	Temps Moy. Corrigé (s)	Écart-type (s)	d_{gb}	C_e
Verre	5	35,92	35,98	0,04	2,490	89,6
Calcaire	5	41,99	42,37	0,11	2,675	113,3

Dans ce cas-ci, le coefficient moyen obtenu lors de l'essai pour les particules de verre est de 89,6 contre 113,3 pour les granulats de calcaire. Les particules de verre sont donc moins anguleuses et plus lisses que les granulats de calcaire. Le MTMDET demande d'ailleurs un C_e minimal de 80 pour les enrobés. Le fait que les particules de calcaire soient plus anguleuses et moins lisses peut expliquer la plus faible résistance des enrobés de verre à l'orniérage. Une plus grande angularité des granulats permet de réduire les mouvements relatifs entre les particules au sein du squelette granulaire en augmentant la force de contact entre elles, augmentant ainsi la résistance à l'orniérage.

Bien que ce sont davantage les grosses particules du squelette granulaire qui reprennent les charges, Lamothe (2004) a observé que le remplacement de granulats moins anguleux dans la fraction 0,315-2,5mm pouvait s'avérer critique pour la stabilité à l'orniérage de l'enrobé. C'est d'ailleurs principalement dans cette fraction granulaire que les particules de verre ont été remplacées. C'est donc l'incorporation de particules moins rugueuses et moins anguleuses, insérées dans une fraction critique pour la sensibilité à l'orniérage, qui peut expliquer en partie

les divergences entre les performances à l'orniérage des enrobés avec verre et celles des enrobés standards.

4.2.2 GB20

Le Tableau 4.10 montre les résultats des profondeurs d'ornière à six différents nombres de cycles allant de 1,000 à 100,000 cycles. Pour un GB20, l'exigence du MTMDET demande une profondeur maximale d'ornière de 10% à 30 000 cycles. Étant donné le rôle plus structural d'un enrobé de base comme le GB20, les exigences quant aux déformations permanentes sont plus strictes qu'avec un enrobé de surface. Dans le but d'observer le comportement des enrobés sur un très grand nombre de cycles, l'essai a été prolongé jusqu'à 100 000 cycles.

Tableau 4.10 Résultats du GB20 aux essais d'orniérage

Type d'EB	# plaque	b (%)	V _{be} (%)	V _i (%) ¹	Nombre de cycles					
					1,000	3,000	10,000	30,000	60,000	100,000
Profondeur d'ornière (%)										
GB20R-br	1	4,6	10,2	5,9	3,1	3,8	4,4	5,2	6,0	6,5
	2			5,6	3,0	3,6	4,1	4,8	5,3	5,5
	Moy.			5,8	3,1	3,7	4,3	5,0	5,7	6,0
GB20V-bv +CH	1	4,6	10,2	5,3	4,5	4,7	5,5	6,1	6,8	6,9
	2			5,6	3,9	4,3	5,2	5,7	6,2	6,6
	Moy.			5,5	4,2	4,5	5,4	5,9	6,5	6,8
GB20V-bv ^{-10%} +CH	1	4,1	8,9	6,1	2,5	3,2	3,8	4,5	4,7	4,8
	2			6,4	2,5	3,0	3,4	3,7	4,1	4,5
	Moy.			6,3	2,5	3,1	3,6	4,1	4,4	4,7
GB20V-bv ^{-20%} +CH	1	3,7	7,9	5,6	2,0	2,6	3,2	3,3	3,5	3,8
	2			5,8	2,2	2,8	3,3	3,6	4,1	4,4
	Moy.			5,7	2,1	2,7	3,2	3,4	3,8	4,1

¹La teneur en vides a été déterminée par pesée hydrostatique

La Figure 4.8 montre que tous les enrobés GB20 confectionnés respectent également sans problème les exigences établies à 30,000 cycles. En fait, même lorsqu'on atteint les 100,000 cycles, on observe qu'aucun des enrobés ne dépasse 7% d'ornière. Encore une fois, une meilleure résistance à l'orniérage est perçue lorsqu'il y a une diminution de la teneur en liant. Ce phénomène est en relation avec le VCB qui est diminué lorsqu'on réduit le bitume (Tableau

4.11). On observe également que le GB20V-b_V+CH ornière un peu plus que le GB20R-b_R, mais possède toutefois une tendance similaire. En effet, les écarts entre les valeurs du GB20R-b_R et du GB20V-b_V+CH sont très semblables à chaque nombre de cycles et semblent même diminuer avec l'accroissement du nombre de cycles, ce qui était loin d'être le cas pour l'ESG10. Rappelons toutefois que dans ce cas-ci, tous les mélanges avec verre contiennent de la chaux hydratée. Il semble que, d'après les résultats obtenus, l'ajout de chaux pourrait permettre d'améliorer la résistance à l'orniérage des enrobés avec verre, sans toutefois permettre d'atteindre les performances d'un enrobé sans verre lorsqu'on utilise le même V_{be}. L'influence de la chaux est d'ailleurs observable si on compare la situation du ESG10V-b_V^{-6%} avec le ESG10R-b_R et celle du GB20V-b_V^{-10%}+CH et le GB20R-b_R. Dans le cas du ESG10, ces deux enrobés avaient des comportements très similaires, tandis que dans le cas du GB20, avec certes une réduction de bitume plus importante de 10% par rapport à 6%, on observe une performance nettement meilleure du GB20V-b_V^{-10%}+CH.

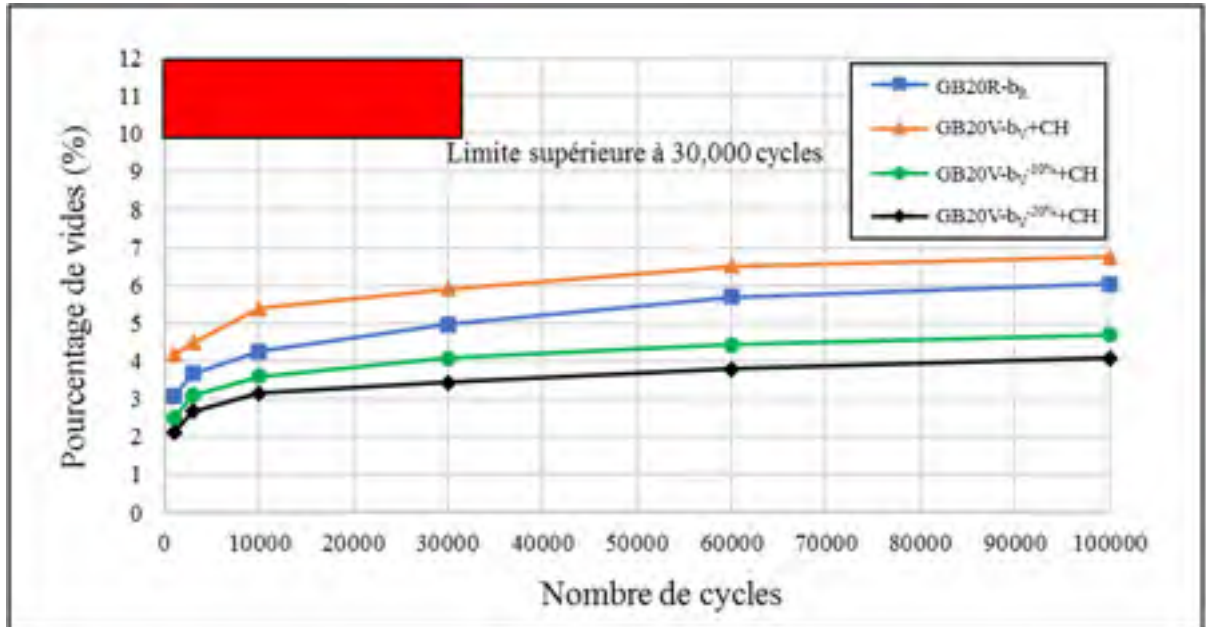


Figure 4.8 Résultats à l'orniérage des enrobés de type GB20

Tableau 4.11 Résultats à l'orniérage pour les enrobés de type GB20

Enrobés	GB20R-b_R	GB20V-b_V +CH	GB20V-b_V^{-10%} +CH	GB20V-b_V^{-20%} +CH
VAM (%)	15,4	15,0	14,6	13,1
VCB (%)	66,4	67,5	61,1	60,0

La teneur en vides a également été prise avant l'essai et après les 100 000 cycles (Tableau 4.12). Exception faite du GB20V-b_V^{-10%}+CH qui affiche une teneur en vides initiale légèrement plus élevée, les enrobés contenaient en pourcentage de vides relativement similaire. On remarque que la perte de vides après l'essai est assez faible pour tous les enrobés. En fait, ayant des compactations entre 93,7% et 94,5%, l'enrobé se trouve entre la phase de consolidation et la phase de fluage, c'est-à-dire que la compaction initiale des enrobés était suffisante pour ne pas qu'il y ait de consolidation significative lors du passage du pneumatique.

Tableau 4.12 Teneur en vides des plaques d'orniérage du GB20 avant et après les 100 000 cycles

Teneur en vides (%)	GB20R-b_R	GB20V-b_V +CH	GB20V-b_V^{-10%} +CH	GB20V-b_V^{-20%} +CH
V _i (%) avant essai*	5,8	5,5	6,3	5,6
V _i (%) après essai*	5,3	4,9	5,9	5,3
Perte de vides (%)	0,5	0,6	0,4	0,3
* Moyenne de deux plaques d'enrobé				

4.2.3 Sommaire

L'essai d'orniérage a montré qu'une réduction de bitume améliorerait la résistance aux déformations permanentes. Également, on a pu observer que l'enrobé avec verre sans réduction de bitume, en comparaison avec l'enrobé de référence, obtenait de moins bonne performance à tous les cycles au niveau du GB20 et passé 4,000 cycles pour ce qui est du ESG10. On

remarque également que la chaux peut avoir un effet bénéfique sur la résistance à l'orniérage des enrobés.

4.3 Le module complexe (E^*)

Les essais de module complexe ont permis de déterminer le comportement rhéologique de l'enrobé à différentes températures et fréquences. Une éprouvette de chaque enrobé a été testée à un niveau de déformation de $50\mu\text{m/m}$ à huit températures (-35, -25, -25, -5, +5, +15, +25, +35°C) et à sept fréquences (0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10 Hz). Suite aux modélisations des courbes dans les différents plans, il est possible de comparer les enrobés entre eux pour statuer sur l'impact de l'ajout de particules de verre sur le comportement rhéologique et sur la rigidité des enrobés.

Dans cette sous-section, la présentation des résultats ainsi qu'une analyse comparative des différents enrobés sont réalisées pour l'enrobé ESG10 et GB20. Dans un premier temps, la vérification du principe temps-température a été observée à l'aide de la représentation graphique dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black. Ensuite, le facteur de translation a_{TE} ainsi que les paramètres connexes utiles à son obtention sont présentés. Par la suite, une présentation des courbes dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black normalisé est exposée afin de déterminer les paramètres du modèle 2S2P1D. S'en suit une analyse des différentes courbes maîtresses afin de vérifier l'impact de l'ajout de verre, de la diminution de bitume, ainsi que de l'ajout de chaux sur le module des enrobés.

4.3.1 ESG10

La Figure 4.9 montre les enrobés ESG10 dans le plan Cole-Cole, tandis que la Figure 4.10 présente ces mêmes enrobés dans le domaine de Black. On observe que les résultats de module complexe des différents enrobés sont très semblables dans les deux domaines. L'allure d'une courbe unique observée pour tous les enrobés dans le plan Cole-Cole indique également que ceux-ci adoptent un comportement thermo-rhéologiquement simple et que par le fait même,

respectent le principe d'équivalence temps-température (PETT). Toutefois, une diminution de l'angle de phase est observée au niveau des hautes températures dans le domaine de Black. Ces « virgules » que forment les points dans les hautes températures indiquent que le PETT n'est que partiellement respecté puisqu'on devrait retrouver une augmentation croissante de l'angle de phase. Ce retour de l'angle de phase pourrait être dû à l'utilisation de bitume polymère.

Le module vitreux (E_0) et le module statique (E_{00}) sont également déterminés à partir de ses deux graphiques. En effet, à partir des lignes représentant la modélisation du modèle 2S2P1D suivant la tendance des points expérimentaux (voir § 4.3.1.2), il est possible de déterminer E_0 dans le plan Cole-Cole ainsi que le E_{00} dans l'espace de Black pour chacun des enrobés.

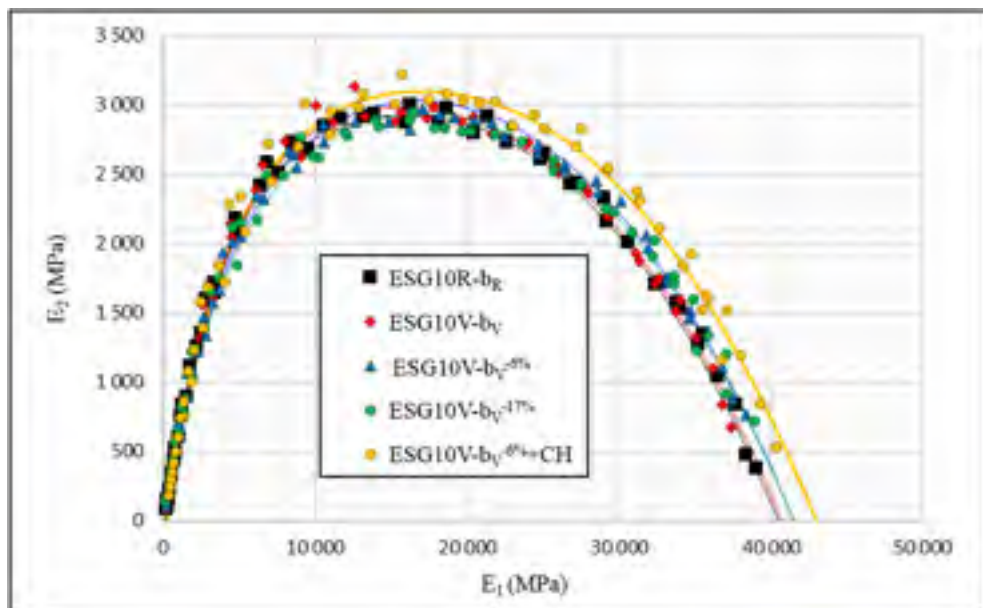


Figure 4.9 Module complexe des enrobés ESG10 dans le plan Cole-Cole

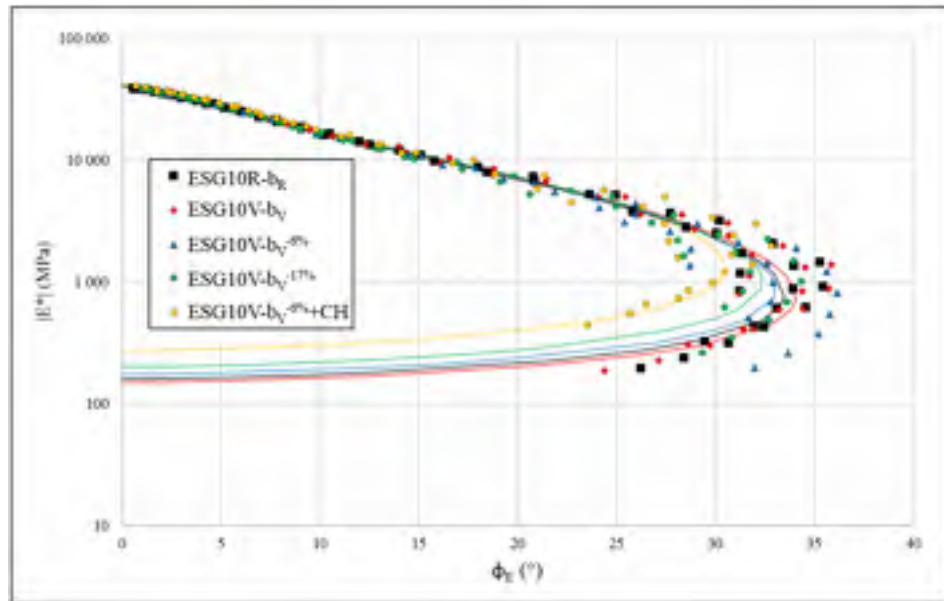


Figure 4.10 Module complexe des enrobés ESG10 dans le diagramme de Black

4.3.1.1 Facteur a_{TE}

Le facteur a_{TE} est nécessaire afin de pouvoir traduire les courbes isothermes et ainsi obtenir les courbes maîtresses. La Figure 4.11 présente la valeur a_{TE} obtenue en fonction de la température pour tous les enrobés. On remarque que tous les points suivent une même courbe, ce qui signifie que la teneur en bitume et la nature des granulats utilisés n'ont pas d'influence sur ce paramètre. Suite à l'obtention des a_{TE} à chaque température testée, il est possible, à l'aide de la loi WLF (voir équation 1.9) d'obtenir une fonction de translation ($a_{TE}(T)$) globale qui permet de tracer les courbes maîtresses à différentes températures. Le Tableau 4.13 indique les valeurs de C_1 et C_2 pour une température de référence de 10°C .

Tableau 4.13 Constantes de WLF à 10°C relatives aux enrobés ESG10

Constantes WLF		
C_1	C_2	$T_{\text{ref}} (^\circ\text{C})$
25,34	178,37	10

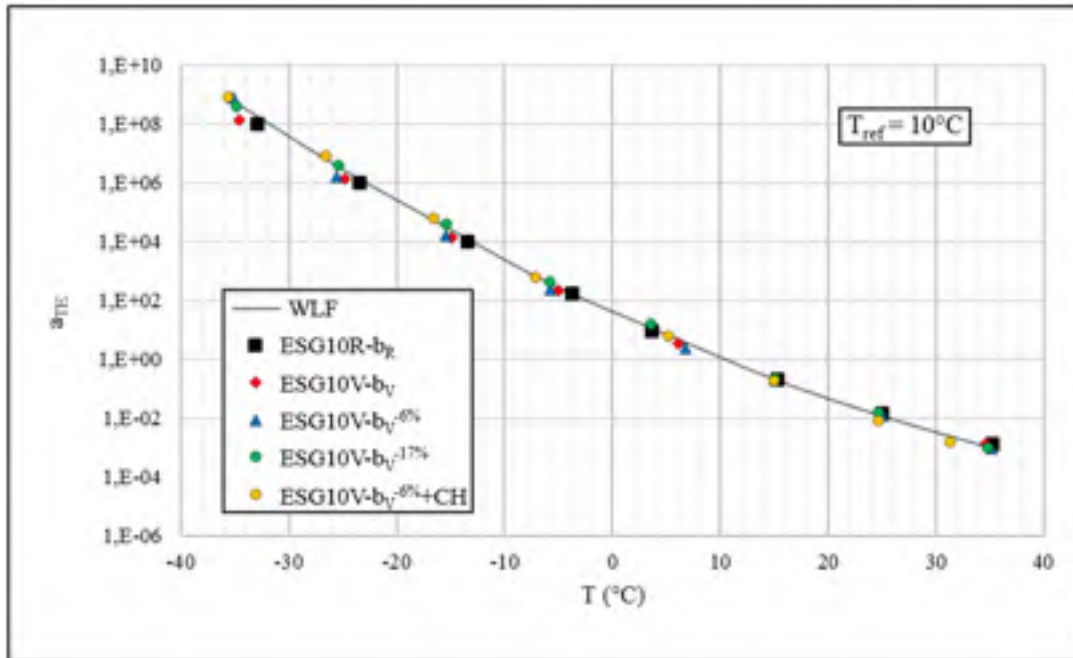


Figure 4.11 Relation entre les facteurs de translations a_{TE} et la température pour tous les enrobés ESG10

4.3.1.2 Le module complexe normalisé

L'analyse normalisée des différents enrobés permet de vérifier la similitude de leur comportement dans le domaine des petites déformations en utilisant le module statique (E_{00}) et le module vitreux (E_0) de l'enrobé. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir déterminé les paramètres rhéologiques du bitume préalablement. Les données d'essais des différents enrobés sont normalisées en considérant l'équation 4.4. Les résultats obtenus sont transposés dans le plan Cole-Cole (Figure 4.12a) ainsi que dans le diagramme de Black (Figure 4.12b).

$$E_{Norm}^* = \frac{E^* - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (4.4)$$

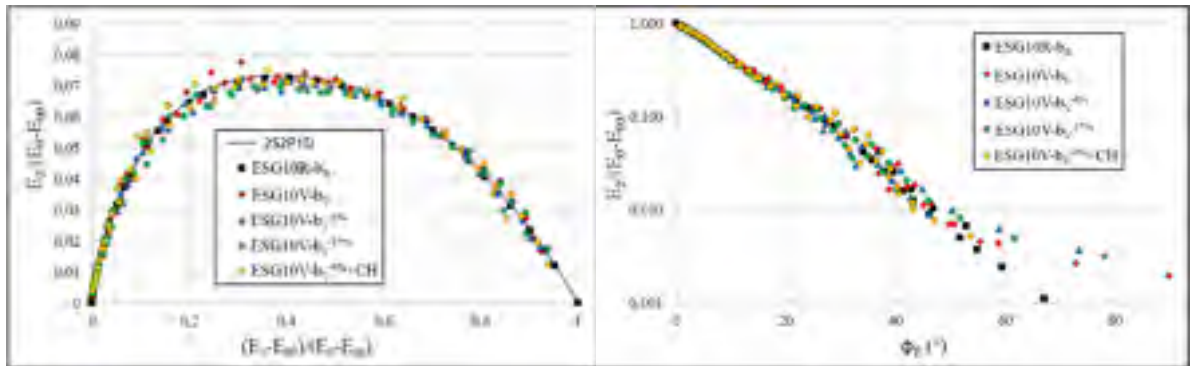


Figure 4.12 Module complexe normalisé des enrobés ESG10 a) dans le plan Cole-Cole b) dans le diagramme de Black

Considérant que l'allure des courbes présentée aux Figures 4.12a et 4.12b est très similaire, on peut attribuer les mêmes paramètres k , h , δ et β du modèle 2S2P1D pour l'ensemble des ESG10 testés, excepté pour le ESG10V-b_V^{-6%}+CH. Rappelons que ces paramètres sont la représentation des pentes des courbes dans les plans Cole-Cole et l'espace de Black (voir § 1.5.1.4). Le Tableau 4.14 donne les valeurs des paramètres k , h , δ et β du modèle 2S2P1D tel que retenu pour les ESG10.

Tableau 4.14 Paramètres k , h , δ et β du modèle 2S2P1D pour l'ESG10

Enrobés	Paramètres 2S2P1D			
	k	h	δ	β
ESG10R-b _R	0,165	0,48	2,80	650
ESG10V-b _V				
ESG10V-b _V ^{-6%}				
ESG10V-b _V ^{-17%}				
ESG10V-b _V ^{-6%} +CH	0,165	0,48	2,70	650

C'est en partie le type de bitume qui détermine le comportement viscoélastique de l'enrobé et ce indépendamment du squelette granulaire. Dans ce sens, ayant utilisé un bitume de type PG70-28 pour tous les ESG10 testés, il était logique d'obtenir des valeurs 2S2P1D identiques.

Toutefois, l'ajout de la chaux semble modifier légèrement le paramètre δ de l'enrobé ESG10V-b_V^{-6%}+CH en diminuant sa valeur. Suite à ces résultats, on peut conclure que les particules de verre n'affectent pas le comportement viscoélastique du bitume dans la plage de fréquences et de températures testées. Lachance-Tremblay et al. (2016) étaient également arrivés à cette conclusion en justifiant que la nature des granulats n'avait pas d'impact sur la rhéologie du bitume.

4.3.1.3 Le module vitreux (E_0), statique (E_{00}) et le facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E})

L'influence du squelette granulaire peut être évaluée en considérant le module vitreux (E_0) et le module statique (E_{00}) des enrobés ainsi qu'à l'aide du facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E}). Le module vitreux correspond à la rigidité maximale lorsque l'enrobé est soumis à de très hautes fréquences et/ou de très basses températures, tandis que le module statique est la valeur minimale lorsque l'enrobé est soumis à de très hautes températures et/ou de basses fréquences. Lorsqu'on utilise la méthode d'analyse 2S2P1D, la valeur E_0 est déterminée à l'aide d'une extrapolation de la courbe dans le plan Cole-Cole, tandis que la valeur E_{00} est déterminée par une extrapolation de la courbe dans le domaine de Black. Le Tableau 4.15 montre les résultats obtenus pour chaque enrobé.

Tableau 4.15 Valeurs du module statique (E_{00}), du module vitreux (E_0) ainsi que du facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E}) à 10°C pour les enrobés ESG10 testés

Enrobés	b (%)	V _i (%)	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	τ_{0E} (s)
ESG10R-b _R	5,3	3,3	160	40500	0,026
ESG10V-b _V	5,2	3,2	150	41000	0,022
ESG10V-b _V ^{-6%}	4,9	2,9	175	41500	0,064
ESG10V-b _V ^{-17%}	4,3	3,0	200	41500	0,110
ESG10V-b _V ^{-6%} +CH	4,9	2,2	275	43000	0,075

Étant donné que le même bitume a été utilisé dans tous les enrobés, c'est principalement la teneur en bitume ainsi que teneur en vides qui expliquent les écarts entre les valeurs de E_0 . La littérature montre que la teneur en vides influence le module vitreux de l'enrobé (E_0), mais reste vague quant à son taux de variation en regard à l'écart de la teneur en vides. En fait, certaines études évaluent que pour une température de 15°C et une fréquence de 10 Hz, une différence de 1% de vides équivaut à une variation d'environ 2050 MPa (Moutier, 1991), tandis que d'autres chercheurs évaluent plutôt une variation de la raideur du matériau de l'ordre de 1550 MPa (Pham et al., 2013). Étant donné qu'une seule éprouvette de module a été testée par enrobé, il est difficile de trouver la réelle relation qui existe entre le pourcentage de vides et les différentes valeurs de E_0 obtenues. Toutefois, si l'on observe la Figure 4.13, on peut constater qu'une corrélation existe entre les valeurs de E_0 et les teneurs en vides. En fait, si on compare le ESG10V-b_V^{-6%}+CH et le ESG10V-b_V, qui possèdent un écart de teneur en vides de 1%, on note un écart de E_0 de 2000 MPa qui concorde avec les conclusions de Moutier.

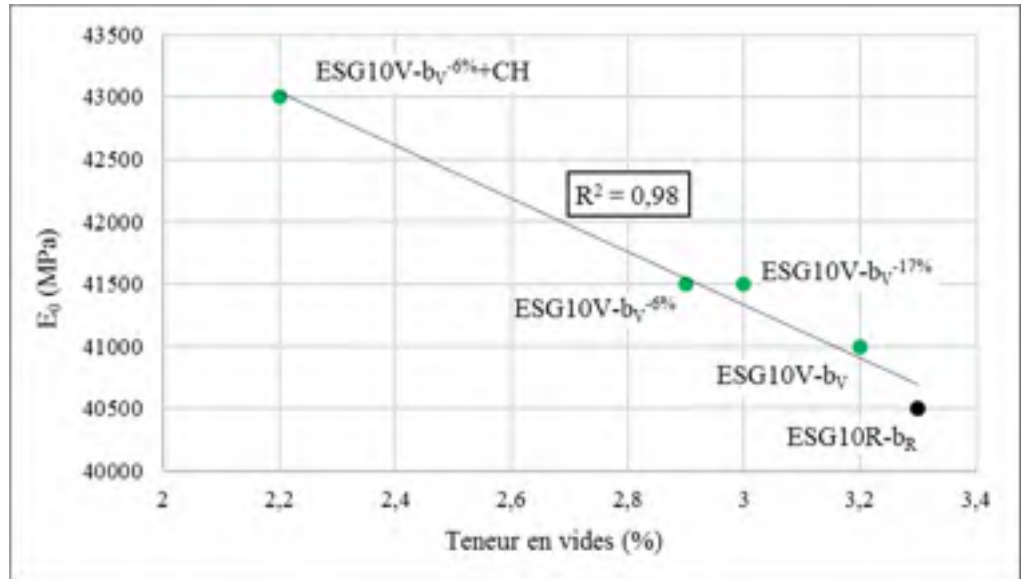


Figure 4.13 Comparaison des valeurs de E_0 en fonction de la teneur en vides pour les enrobés ESG10 testés

Pour ce qui est du module statique (E_{00}), les valeurs sont très semblables, excepté pour l'enrobé ESG10V-b_V^{-6%}+CH. Étant donné que la teneur en vides n'aurait pas d'influences considérables sur le E_{00} (Pham et al. 2013), cette distinction pourrait être justifiée par la présence de chaux

hydratée qui permet à l'enrobé de perdre moins de rigidité à hautes températures. Également, lorsqu'on visait une température de $+35^{\circ}\text{C}$ lors des essais, la presse atteignait des valeurs de températures similaires à $+35^{\circ}\text{C}$ pour tous les enrobés exceptés pour le ESG10V-bv^{-6%}+CH. En effet, on obtenait plutôt une température moyenne de $+31,5^{\circ}\text{C}$ en raison d'un problème mécanique de la presse. Sachant que E_{00} est la valeur de rigidité minimale à hautes températures et à basses fréquences, on peut croire que si le ESG10V-bv^{-6%}+CH avait été évalué à une température plus élevée de $+35^{\circ}\text{C}$, la valeur de E_{00} aurait été plus faible et plus semblable aux autres enrobés.

Finalement, en ce qui a trait aux valeurs de τ_{0E} , on note une certaine divergence suivant la rigidité de l'enrobé. En fait, la valeur τ_{0E} sera dépendante de tous les paramètres pouvant affecter la rigidité. La Figure 4.14 montre d'ailleurs la corrélation entre le τ_{0E} et le volume de bitume effectif (V_{be}) des différents enrobés pour une température de référence fixée à 10°C . On remarque qu'il existe une corrélation entre le pourcentage de bitume et la valeur de τ_{0E} . On observe également que le ESG10V-bv^{-6%}+CH, qui a une teneur en vides plus élevée que les autres enrobés, se distance légèrement de la droite de tendance. On peut donc croire que l'augmentation de la rigidité est en relation directe avec l'augmentation du facteur de temps des enrobés à une même température.

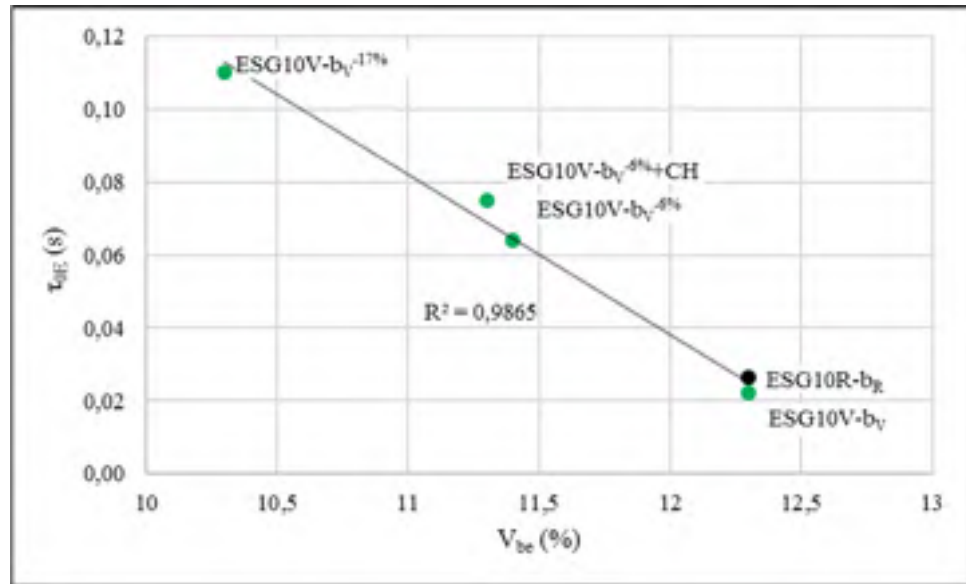


Figure 4.14 Comparaisons des valeurs de τ_{0E} en fonction du V_{be} pour les enrobés ESG10 à 10°C

4.3.1.4 Courbes maîtresses

Malgré le fait que les enrobés ne respectent que partiellement le PETT, les courbes maîtresses ont pu être tracées selon la norme du module $|E^*|$ et l'angle de phase (ϕ_E) en fonction de la fréquence équivalente (Fr_{eq}) à une température de référence de 10°C.

On observe que la partie supérieure des courbes présentées à la Figure 4.15 s'approche de façon asymptotique d'une valeur maximale (E_0) dans les hautes fréquences, ce qui équivaut à la rigidité maximale des enrobés. La partie inférieure de la courbe s'approche quant à elle d'une valeur minimum (E_{00}) dans les basses fréquences, ce qui équivaut à la rigidité minimale des enrobés. On remarque que les cinq enrobés ont une courbe maîtresse très similaire jusqu'à une fréquence équivalente supérieure à 1000 Hz. Sous cette fréquence toutefois, on y voit un détachement de certains enrobés. Notamment, la norme du module complexe du ESG10V- b_V -6%+CH semble être plus grande que les autres enrobés à de basses fréquences. Ce comportement pourrait être dû à la chaux hydratée contenue dans l'enrobé ainsi qu'à sa teneur

en vides plus faible. En effet, l'impact d'une différence de teneur en vides est beaucoup plus remarqué dans les basses fréquences et les hautes températures.

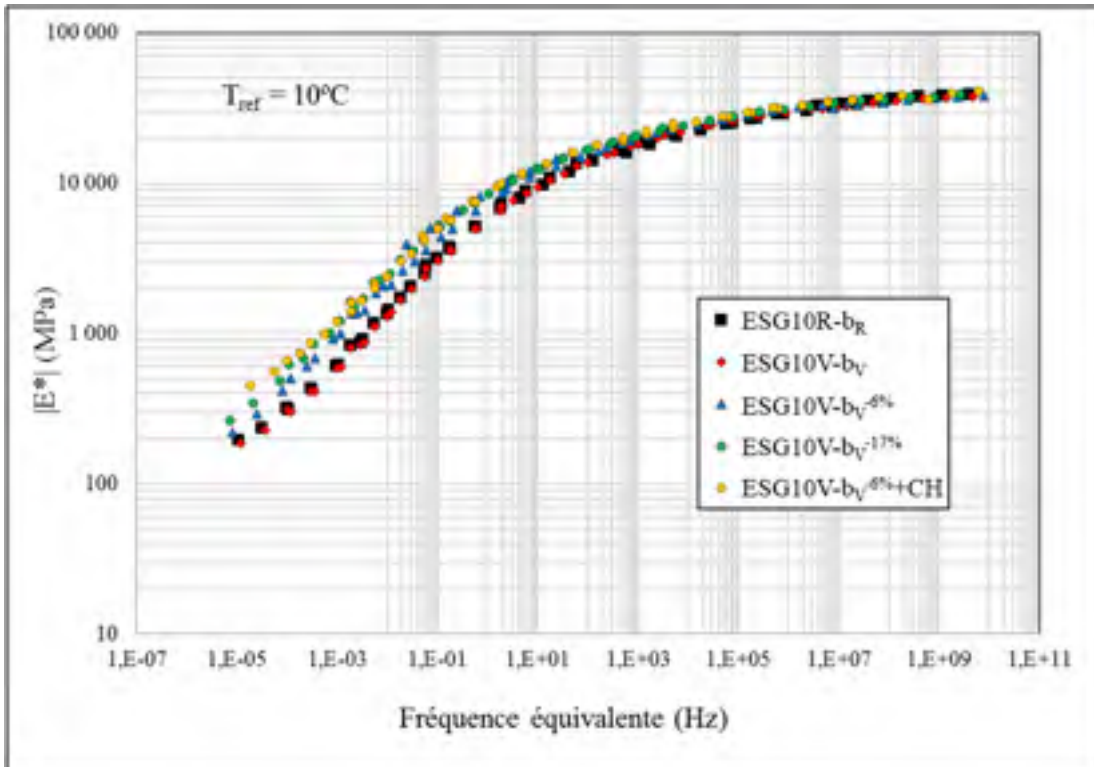


Figure 4.15 Courbes maître des enrobés ESG10 selon la norme du module complexe $|E^*|$

La Figure 4.16 présente la courbe maître des différents enrobés en fonction de l'angle de phase. On remarque que pour chacun des enrobés, l'angle de phase atteint une valeur maximale puis redescend. Cette tendance est due à la présence de bitume qui devient moins visqueux lorsqu'on augmente la température et qui a une moins grande influence sur la rigidité de l'enrobé.

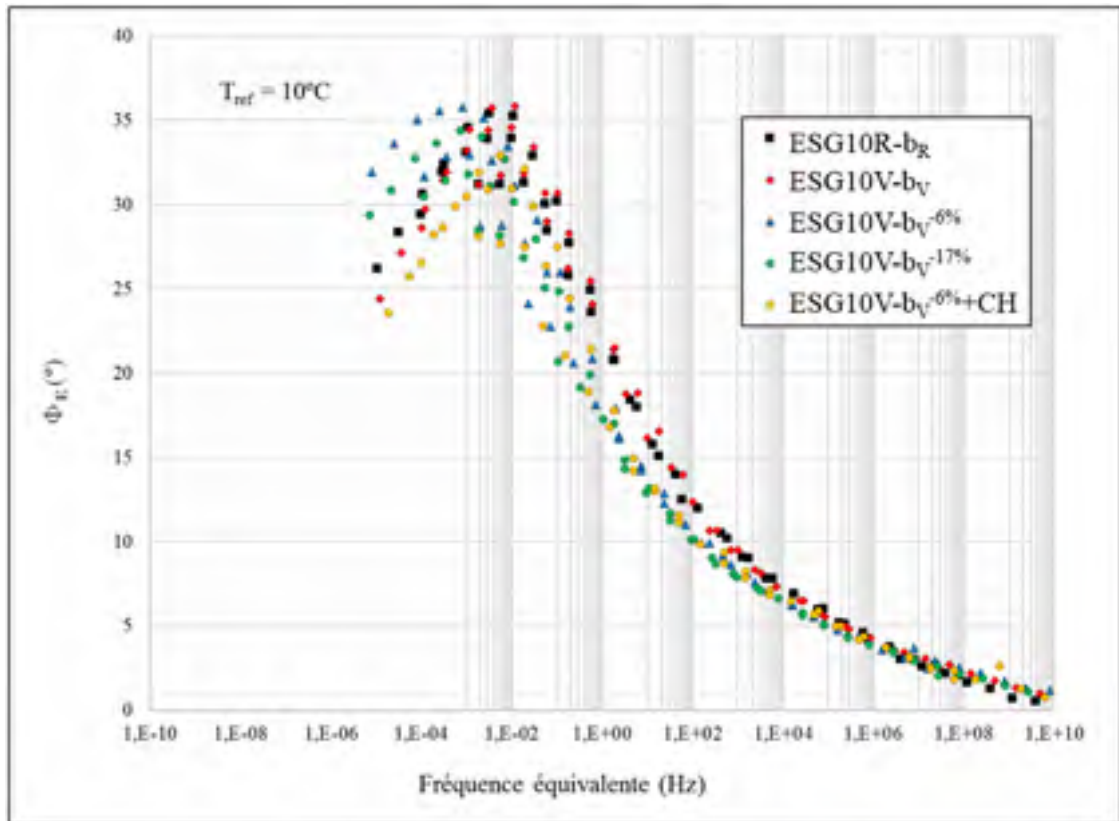


Figure 4.16 Courbe maîtresse de l'angle de phase pour les enrobés ESG10

Les différentes valeurs de normes et d'angles de phase du module complexe ont été comparées pour obtenir une vision plus détaillée des écarts qui existaient entre les différents enrobés autant au niveau de l'ajout de verre que de la diminution du pourcentage de bitume.

Toutefois, étant donné que la presse hydraulique n'obtenait pas des températures identiques pour tous les essais, il était difficile de faire une comparaison précise. En effet, il aurait été erroné de comparer la rigidité d'un enrobé qui a été testé à -30°C avec un qui a plutôt été testé à -35°C . Pour ce faire, les courbes isochrones des enrobés ont été tracées pour chaque fréquence entre chaque température. À l'aide de la pente et d'une température équivalente à chaque enrobé, les valeurs de $|E^*|$ et de Φ_E ont pu être extrapolées.

La norme de module complexe du ESG10V-b_V et du ESG10R-b_R a d'abord été comparée avec l'équation 4.5 pour chaque température et fréquence testée.

$$\Delta|E^*| = (|E^*| - |E^*|_R) / |E^*|_R \text{ (\%)} \quad (4.5)$$

Où

- $\Delta|E^*|$: L'écart entre les normes de module complexe (%);
- $|E^*|$: La norme du module complexe de l'enrobé à comparer (MPa);
- $|E^*|_R$: La norme du module complexe de l'enrobé de référence (MPa).

La Figure 4.17 tente de montrer plus clairement la différence de rigidité entre le ESG10R-b_R et le ESG10V-b_V. On constate que tous les écarts possèdent une valeur négative ce qui signifie que le ESG10R-b_R possède un $|E^*|$ supérieur à toutes les températures et fréquences. On remarque un $\Delta|E^*|$ d'environ 4% sur l'entièreté des fréquences. Lachance-Tremblay et al. (2016) et Airey et al. (2004) avaient également conclu qu'il existait une légère baisse de la rigidité lorsqu'on utilisait des particules de verre comme granulats. Une diminution de la rigidité dans les basses températures peut permettre de réduire le risque de fissuration thermique, toutefois, dans les hautes températures, l'enrobé devient plus sujet au phénomène d'orniérage.

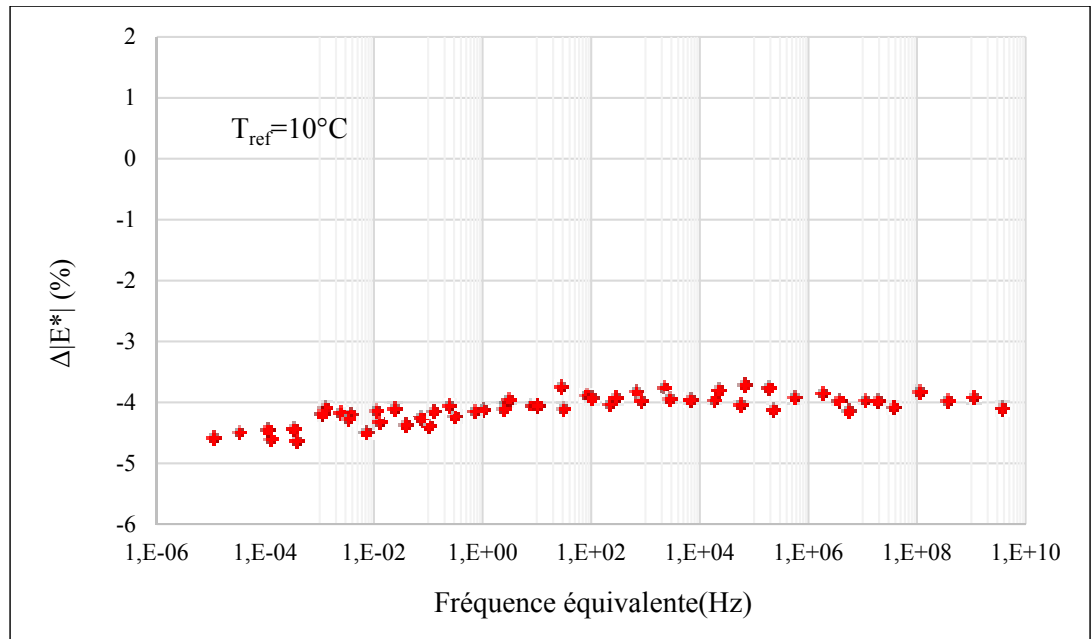


Figure 4.17 Comparaison des écarts entre les normes du module complexe du ESG10V-b_V et du ESG10R-b_R

La Figure 4.18 montre les écarts de norme ($\Delta|E^*|$) entre le ESG10V-b_V^{-6%}+CH et le ESG10V-b_V^{-17%}+CH par rapport au ESG10V-b_V, pour tenter d'exposer l'impact d'une réduction de bitume sur ce paramètre. On remarque que les valeurs sont positives à toutes les fréquences ce qui implique que les $|E^*|$ des enrobés ayant subi une diminution de bitume sont supérieurs au ESG10V-b_V. Dans les très hautes fréquences ($Fr > 1,E+05$), cet écart est de l'ordre de 0-3% pour les deux enrobés, mais grimpe davantage à mesure que la fréquence diminue. Ce comportement était prévisible puisque à basse température et/ou à haute fréquence, le bitume possède un module élevé, mais lorsqu'on atteint de hautes températures et/ou de basses fréquences, le bitume perd de sa rigidité et de ce fait, l'enrobé également. Un enrobé qui contient moins de bitume sera donc moins affecté par ce comportement et conservera une plus grande rigidité. Ce phénomène est également visible lorsqu'on observe les écarts entre le ESG10V-b_V^{-6%} et ESG10V-b_V^{-17%}.

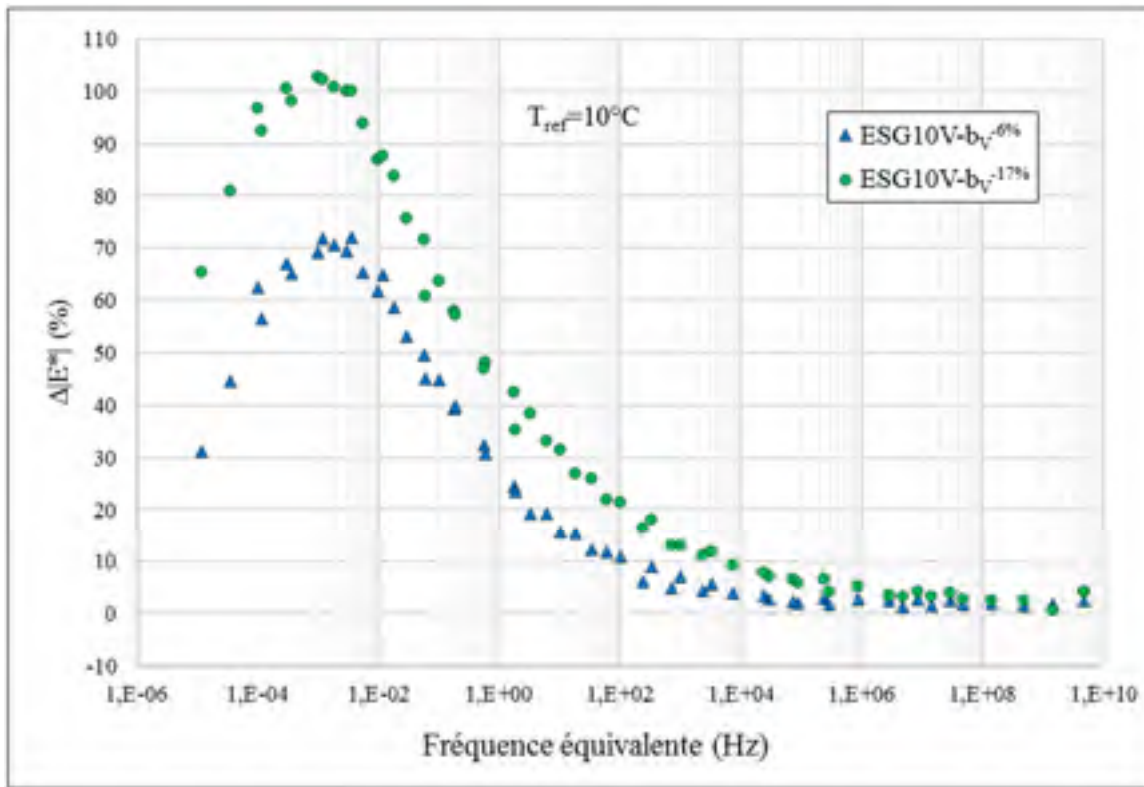


Figure 4.18 Comparaison des écarts entre les normes du module complexe des enrobés ayant subi une réduction de bitume et le ESG10V-bv

Pour ce qui est des comparaisons entre les angles de phase, les écarts ont été calculés selon l'équation 4.6.

$$\Delta\phi_E = \phi_E - \phi_{ER} \quad (4.6)$$

Où

- $\Delta\phi_E$ (°) : L'écart entre les angles de phase;
- ϕ_E (°) : L'angle de phase de l'enrobé à comparer;
- ϕ_{ER} (°) : L'angle de phase de l'enrobé de référence.

La Figure 4.19 compare les angles de phase du ESG10R-b_R et du ESG10V-b_V. On observe dans les hautes fréquences ($F_r > 0,01$ Hz) que les écarts ont une valeur positive ce qui signifie que les valeurs d'angles de phase sont plus élevées pour le ESG10V-b_V et que celui-ci adopte un comportement plus visqueux. Ce comportement était prévisible étant donné généralement

un matériau bitumineux possédant des modules de rigidité plus faibles possède également des angles de phase plus élevés. Sous les 0,01 Hz toutefois, on remarque une diminution de l'écart, suivi d'un accroissement dans les valeurs négatives.

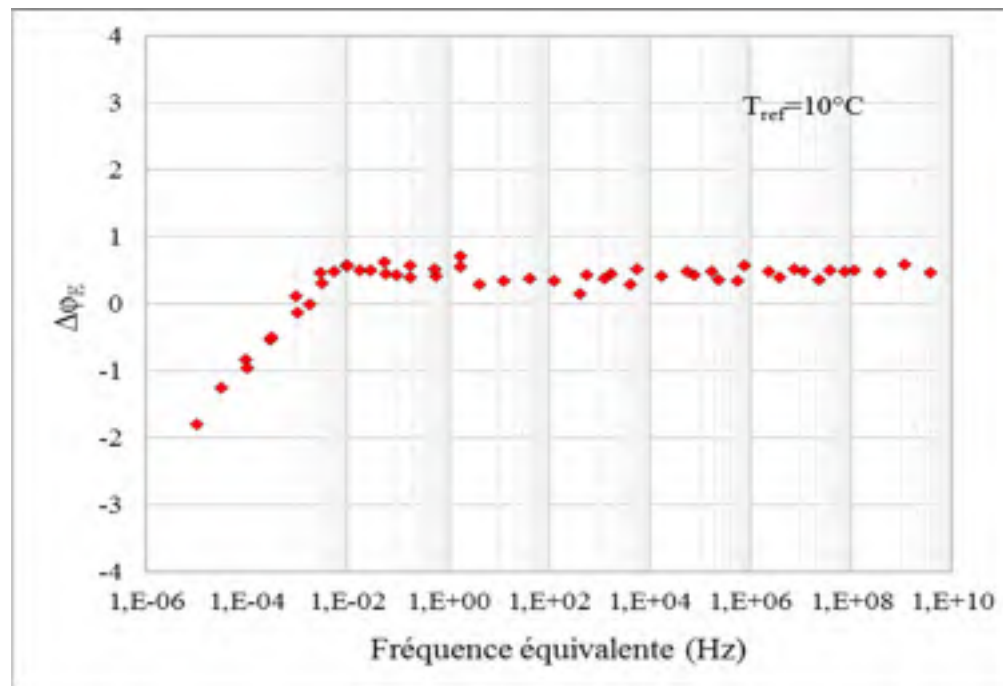


Figure 4.19 Comparaison des écarts entre les angles de phase du ESG10V-bv et du ESG10R-br

La Figure 4.20 compare les angles de phase des enrobés ayant subi des réductions de bitume avec l'enrobé ESG10V-bv. Dans les très hautes fréquences ($Fr > 1,E+06$ Hz), l'écart entre les angles de phase est quasi nul pour les trois enrobés. Sous cette fréquence toutefois, on observe un accroissement des écarts dans les valeurs négatives ce qui signifie que les enrobés ESG10V-bv^{-6%} et ESG10V-bv^{-17%} possèdent des valeurs d'angles de phase plus faibles. Encore une fois, plus on se trouve dans les basses fréquences/hautes températures et plus le rôle du bitume a un impact sur les comportements mécaniques de l'enrobé. Rappelons que plus l'angle de phase est élevé et plus l'enrobé adopte un comportement visqueux. Étant donné que c'est essentiellement le bitume qui dicte ce comportement visqueux, il était normal que les enrobés ayant subi une diminution en liant aient des angles de phase inférieurs au ESG10V-bv à basse

fréquence et à haute température. On remarque également que sous une fréquence de 0,1 Hz, le $\Delta\phi_E$ diminue jusqu'à augmenter dans les valeurs positives à 0,001 Hz.

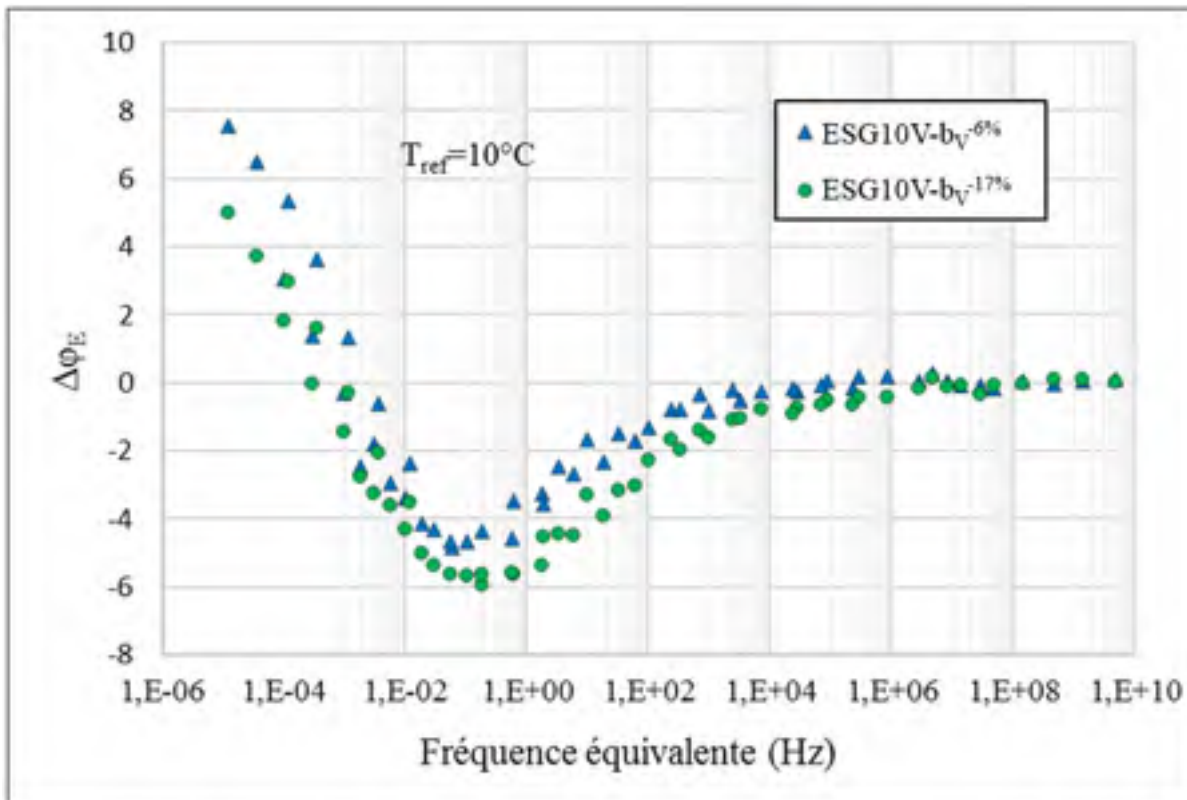


Figure 4.20 Comparaison des écarts entre les angles de phase des enrobés ayant subi une réduction de bitume et le ESG10V-bv

4.3.1.5 Synthèse des valeurs du modèle 2S2P1D

Cette sous-section présente, au Tableau 4.16, les différents paramètres du modèle 2S2P1D de tous les enrobés ESG10 testés.

Tableau 4.16 Paramètres du modèle 2S2P1D pour les enrobés ESG10

Enrobés	b (%)	V _i (%)	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	k	h	δ	β	C ₁	C ₂	τ _{0E} ¹ (s)
ESG10R-b _R	5,3	3,3	160	40 500	0,165	0,48	2,80	650	25,3	178,4	0,026
ESG10V-b _V	5,2	3,2	150	41 000							0,022
ESG10V-b _V ^{-6%}	4,9	2,9	175	41 500							0,064
ESG10V-b _V ^{-17%}	4,3	3,0	200	41 500							0,110
ESG10-b _V ^{-6%} +CH	4,9	2,2	275	43 000	0,165	0,48	2,70	650			0,075

¹ Le facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E}) est calculé pour une température de 10°C

4.3.2 GB20

On observe à la Figure 4.21 que tous les points des enrobés forment un arc dans le plan Cole-Cole ce qui signifie qu'ils respectent le PETT. Cependant, on remarque à la Figure 4.22 une diminution de l'angle de phase au niveau des hautes températures dans le diagramme de Black. L'utilisation d'un bitume polymère PG64-28 pourrait encore une fois expliquer cette diminution. On peut donc conclure que les GB20 ne respectent que partiellement le principe d'équivalence temps-température comme c'était le cas pour les ESG10. De plus, le modèle analytique 2S2P1D permet de déterminer les modules vitreux (E₀) et statiques (E₀₀).

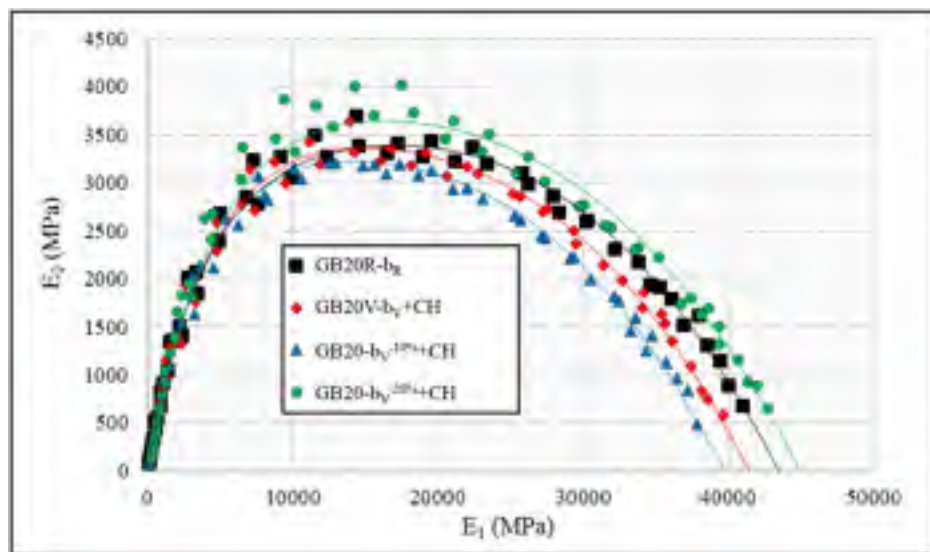


Figure 4.21 Module complexe des enrobés GB20 dans le plan Cole-Cole

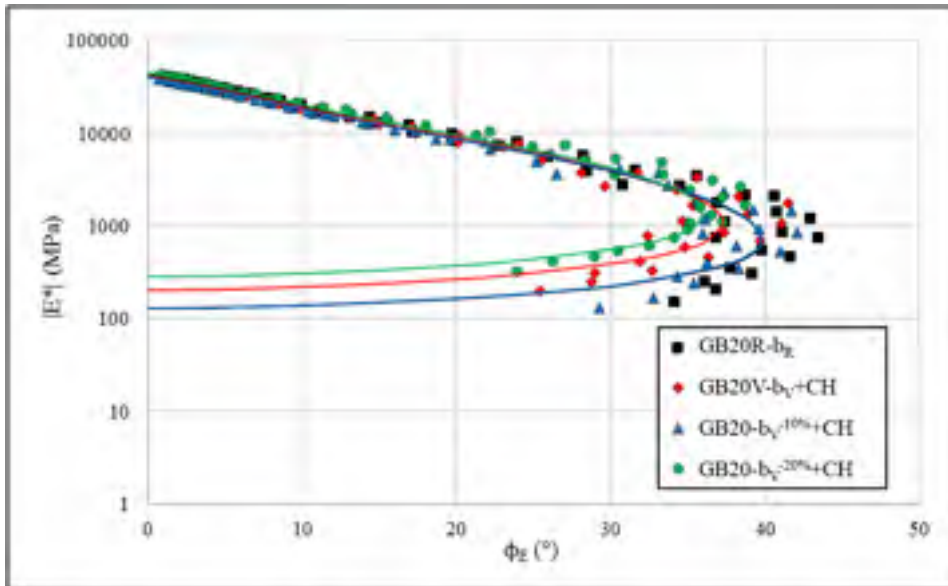


Figure 4.22 Module complexe des enrobés GB20 dans le diagramme de Black

4.3.2.1 Facteur a_{TE}

La Figure 4.23 montre les facteurs de translation a_{TE} de tous les enrobés à chacune des températures d'essais pour une température de référence de 10°C. On remarque que toutes les valeurs sont similaires et peuvent être représentées sur une courbe unique. De plus, encore une fois, les constantes WLF indiquées dans le Tableau 4.17 sont exactement les mêmes pour tous les enrobés. On peut également conclure que l'ajout de chaux hydratée n'a pas d'effet sur le facteur de translation. Pham et al. (2016) avaient également observé cette similitude au niveau des constantes WLF entre des enrobés avec et sans chaux.

Tableau 4.17 Constantes WLF à 10°C
relatives aux enrobés GB20

Constantes WLF		
C_1	C_2	$T_{ref}(^{\circ}C)$
31,2	203,7	10°C

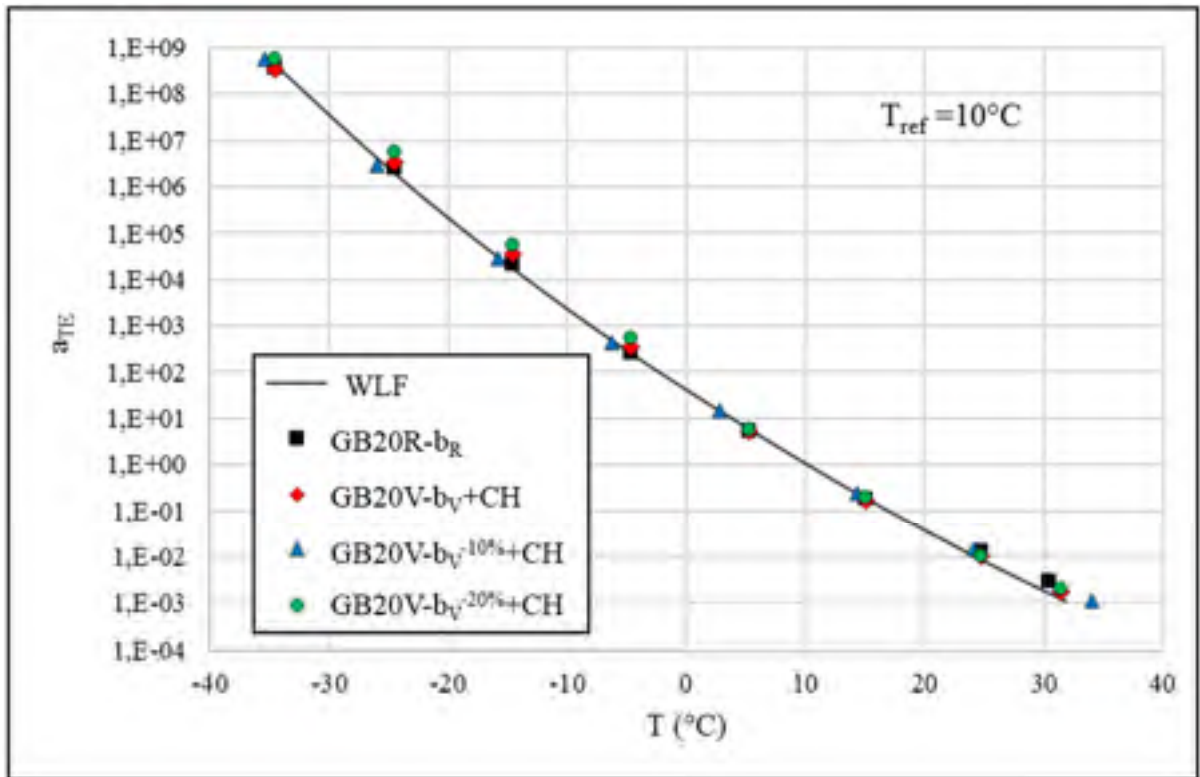


Figure 4.23 Relation entre les facteurs de translations a_{TE} et la température pour tous les enrobés GB20

4.3.2.2 Le module complexe normalisé

Le module complexe normalisé permet encore une fois d'évaluer le comportement rhéologique des enrobés en tenant compte du module vitreux (E_{00}) et du module statique (E_0). Les courbes de tous les GB20 sont d'ailleurs présentées dans le plan Cole-Cole (Figure 4.24a) et dans le diagramme de Black (Figure 4.24b).

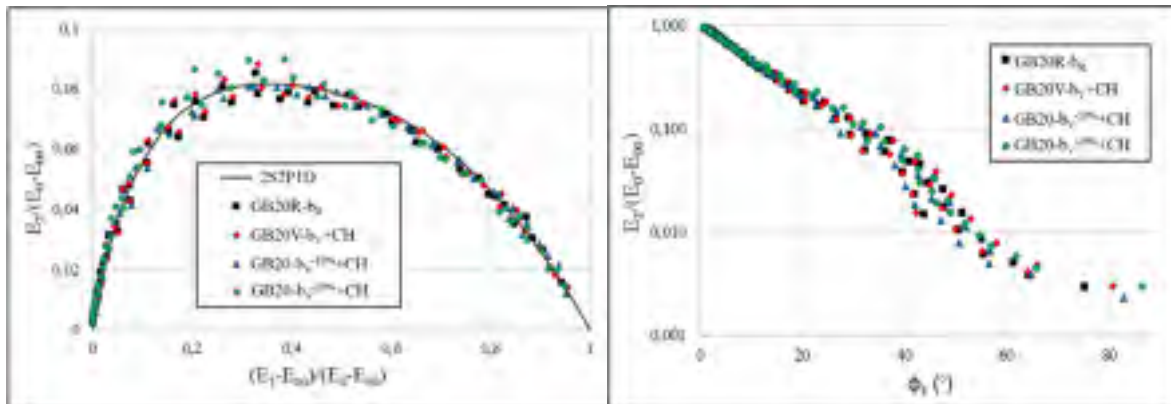


Figure 4.24 Module complexe normalisé des enrobés GB20 dans (a) le plan Cole-Cole, (b) le diagramme de Black

Avec ces deux représentations graphiques, il est possible de déterminer les paramètres 2S2P1D et comme mentionné précédemment, c'est en partie le bitume qui dicte la valeur de ces paramètres. Possédant tous un bitume PG64-28, on observe que tous les enrobés affichent les mêmes valeurs, excepté au niveau du paramètre δ entre les enrobés avec chaux et l'enrobé de référence (Tableau 4.18).

Tableau 4.18 Paramètres k , h , δ et β du modèle 2S2P1D pour le GB20

Enrobés	Paramètres 2S2P1D			
	k	h	δ	β
GB20R- b_R	0,180	0,54	2,90	200
GB20V- b_V +CH	0,180	0,54	2,70	200
GB20V- $b_V^{-10\%}$ +CH				
GB20V- $b_V^{-20\%}$ +CH				

4.3.2.3 Le module vitreux (E_0), statique (E_{00}) et le facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E})

Les paramètres E_0 et E_{00} sont présentés au Tableau 4.19. Encore une fois la différence entre les valeurs de E_0 et E_{00} de chaque enrobés peut être expliquée en partie par le pourcentage de vides contenu dans chacun, ainsi qu'à la présence de chaux hydratée.

Tableau 4.19 Valeurs du module statique (E_{00}), du module vitreux (E_0) ainsi que du facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E}) à 10°C pour les enrobés GB20 testés

Enrobés	b (%)	V_i (%)	E₀₀ (MPa)	E₀ (MPa)	τ_{0E} (s)
GB20R-b _R	4,6	2,9	130	43500	0,039
GB20V-b _V +CH	4,6	2,6	200	41500	0,037
GB20V-b _V ^{-10%} +CH	4,1	4,1	130	39750	0,058
GB20V-b _V ^{-20%} +CH	3,7	3,1	275	45000	0,089

On remarque que la valeur E_0 du GB20V-b_V^{-10%}+CH, est plus faible que pour tous les autres enrobés. Comme expliqué précédemment, cette diminution pourrait être applicable au fait que cet enrobé possède une plus grande teneur en vides par rapport aux autres enrobés testés.

On remarque également que le GB20V-b_V+CH a un E_{00} plus élevé que celui du GB20R-b_R, cette différence pourrait être due à la chaux hydratée qui procure une plus grande rigidité dans les basses fréquences et les hautes températures. Le GB20V-b_V^{-10%}+CH, a quant à lui, une valeur de E_{00} plus faible que les autres enrobés malgré qu'il contienne de la chaux. Comme il est mentionné dans la section 4.3.1.3, un problème mécanique de la presse ne permettait pas d'atteindre une température de +35°C lors d'essais sur certains enrobés. Dans ce cas-ci, seul l'enrobé GB20V-b_V^{-10%}+CH atteignait +35°C, tandis que les autres enrobés présentaient plutôt des valeurs de +31,5°C. Cette différence pourrait donc expliquer pourquoi la valeur de E_{00} du GB20V-b_V^{-10%}+CH est plus faible.

On observe également que la valeur de τ_{0E} des enrobés est différente pour une même température de référence de 10°C (Figure 4.25). En fait, comme c'était le cas avec les enrobés de type ESG10, on aperçoit une augmentation du temps de relaxation en fonction de la teneur en bitume. L'enrobé GB20V-b_V^{-10%}+CH semble également se détacher de la courbe de tendance, probablement dû au fait qu'il possède une plus grande teneur en vides, ce qui le rend moins rigide.

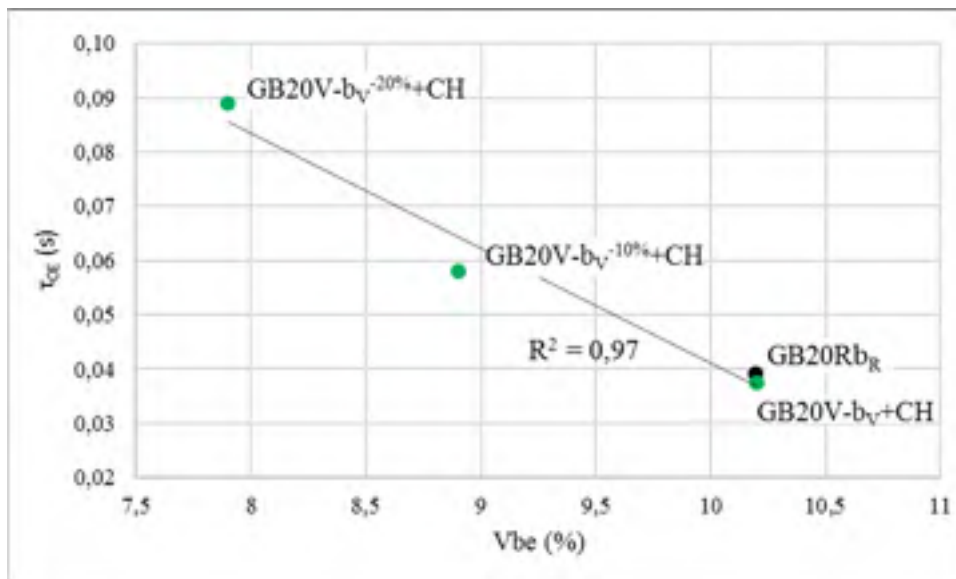


Figure 4.25 Comparaison des valeurs de τ_{0E} en fonction du V_{be} pour les enrobés de type GB20 à 10°C

4.3.2.4 Courbes maîtresses

Les courbes maîtresses permettent d'observer le comportement des enrobés à une même température pour des fréquences équivalentes. Malgré le fait que les enrobés ne respectent que partiellement le PETT dû à un retour de l'angle de phase au niveau des hautes températures, il a été possible de tracer les courbes maîtresses selon la norme du module complexe ($|E^*|$) et l'angle de phase (ϕ_E) à une température de 10°C. À la Figure 4.26 on remarque que les points de tous les enrobés sont très similaires dans les hautes fréquences et possèdent une valeur de rigidité similaire. Toutefois, on distingue quelques différences au niveau des basses fréquences qui pourraient être dues à la teneur en bitume. Par ailleurs, malgré le fait qu'il contienne une

moins grande teneur en bitume, l'enrobé GB20V-bv^{-10%}+CH obtient des valeurs semblables à celui de référence et plus faibles que l'enrobé GB20V-bv+CH. Cette moins grande rigidité à basse fréquence peut être due à la plus haute teneur en vides du GB20V-bv^{-10%}+CH comme mentionné à la section 4.3.2.4.

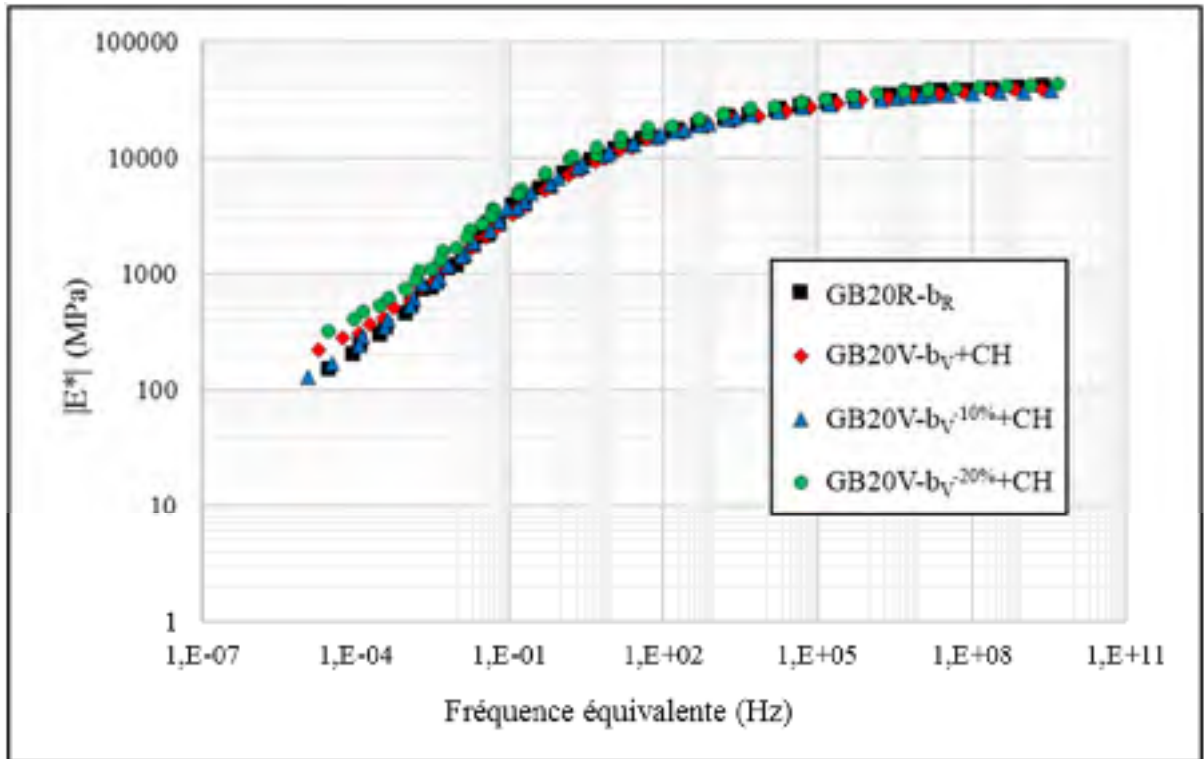


Figure 4.26 Courbes maîtresses des enrobés GB20 selon la norme du module complexe $|E^*|$

Les angles de phase présentés à la Figure 4.27 montrent également des comportements similaires à hautes fréquences, mais différent quelque peu sous les 0,1 Hz. C'est que sous cette fréquence, le bitume joue un plus grand rôle dans l'enrobé. On remarque. Les angles de phase du GB20R-b_R sont plus élevés que ceux du GB20V-bv+CH, cette tendance est d'ailleurs plus approfondie plus loin dans la présente section.

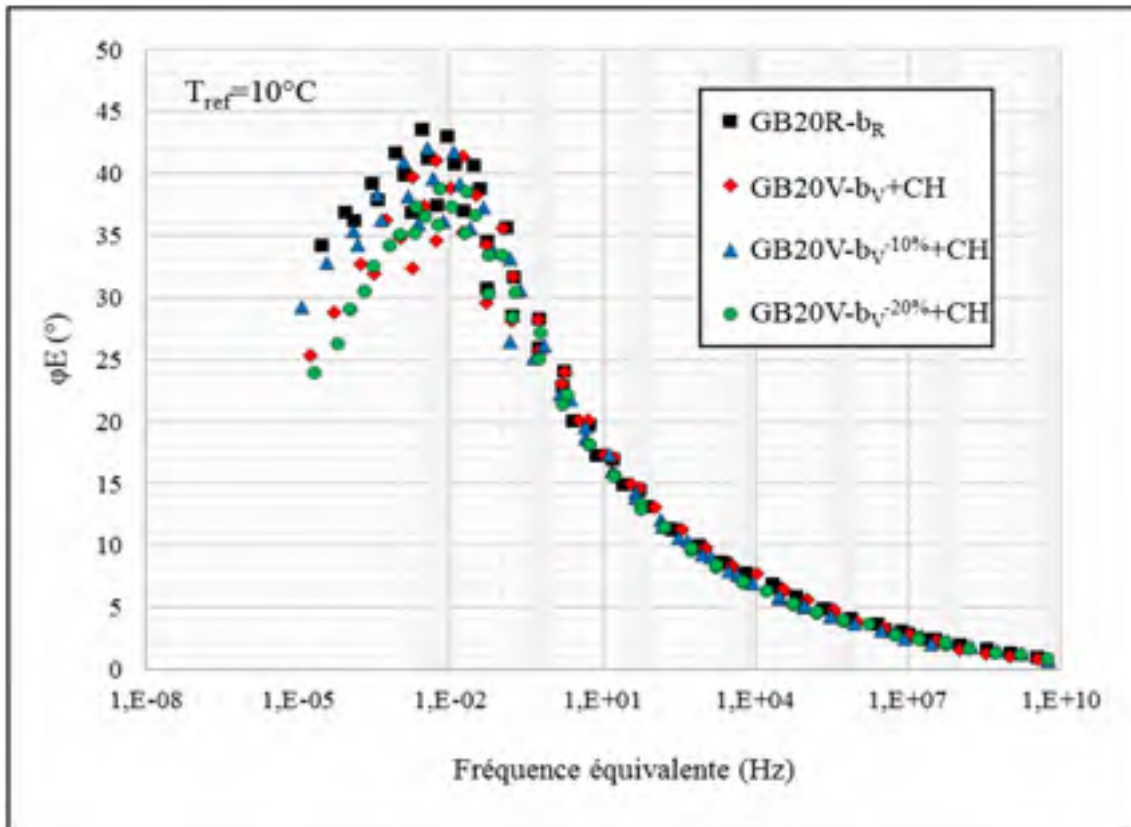


Figure 4.27 Courbes maîtresses des enrobés GB20 selon l'angle de phase

Dans le cas du GB20, il est difficile de comparer directement l'influence des particules de verre sur la rigidité puisque les enrobés incorporant du verre contiennent également de la chaux hydratée. Toutefois, puisque l'influence du verre et de la teneur en liant ont pu être observées sur les ESG10, il est intéressant de pouvoir vérifier l'effet de ce filler actif sur les propriétés rhéologiques de l'enrobé de façon plus détaillée. Pour ce faire, l'enrobé GB20R-b_R et GB20V-b_V+CH ont été comparés au niveau de la norme du module complexe et de l'angle de phase en fonction des fréquences équivalentes conformément aux équations 4.5 et 4.6.

La Figure 4.28 présente les écarts de la norme du module $|E^*|$ qui existent entre le GB20V-b_V+CH et le GB20R-b_R. Dans les plus hautes fréquences, on constate que le GB20V-b_V+CH possède des écarts négatifs de l'ordre de 2-4% et donc, un module légèrement plus faible que le GB20R-b_R. On notait également un écart de cet ordre entre le ESG10V-b_V et le ESG10R-

br. Cette similitude entre les écarts pourrait confirmer l'hypothèse selon laquelle le verre a un léger impact sur la rhéologie des enrobés. En dessous d'une fréquence de 0,01 Hz toutefois, on observe une augmentation de la rigidité de l'enrobé avec chaux. Cette constatation va de pair avec les conclusions de Pham et al. (2016) qui mentionnaient que l'impact de la chaux sur la rigidité était davantage observable au niveau des basses fréquences et des hautes températures. De plus, en modifiant la température de référence pour une température de 50°C, on constate que l'écart à 10 Hz est de 23% contrairement à -2,8% à une température de 10°C. Ce comportement corrobore le fait que l'action de la chaux comme filler actif dépend grandement de la température. Le fait que l'enrobé soit plus rigide à haute température est un avantage pour améliorer la résistance aux déformations permanentes et peut entre autres expliquer les bons résultats obtenus à l'essai d'orniérage.

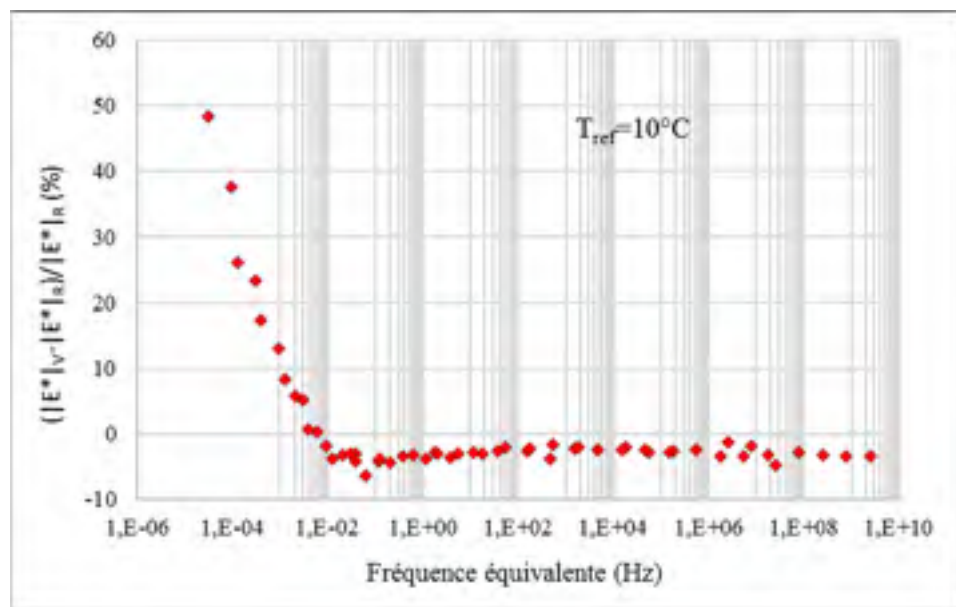


Figure 4.28 Différence entre la norme du complexe de l'enrobé GB20V-bv+CH et GB20R-br

Pour ce qui est de l'influence de la chaux sur l'angle de phase, elle peut être observée à la Figure 4.29 qui présente les écarts entre les valeurs de GB20V-bv+CH et du GB20R-br. On remarque d'abord que les deux enrobés ont des $\Delta\phi_E$ presque nuls pour les hautes fréquences et les fréquences intermédiaires ($Fr > 1, E-01$ Hz). Toutefois, en dessous de 0,1 Hz, on note une

séparation marquée vers les valeurs négatives, ce qui indique que l'enrobé avec chaux possède un angle de phase plus faible. C'est d'ailleurs à partir de cette fréquence qu'on observait une augmentation de l'écart entre les normes $|E^*|$ à la Figure 4.28. Pham et al. (2016) avaient également observé une diminution de l'angle de phase au niveau des basses fréquences pour les enrobés contenant de la chaux. Cette diminution signifie que cet enrobé adopte un comportement moins visqueux à basse fréquence et à haute température.

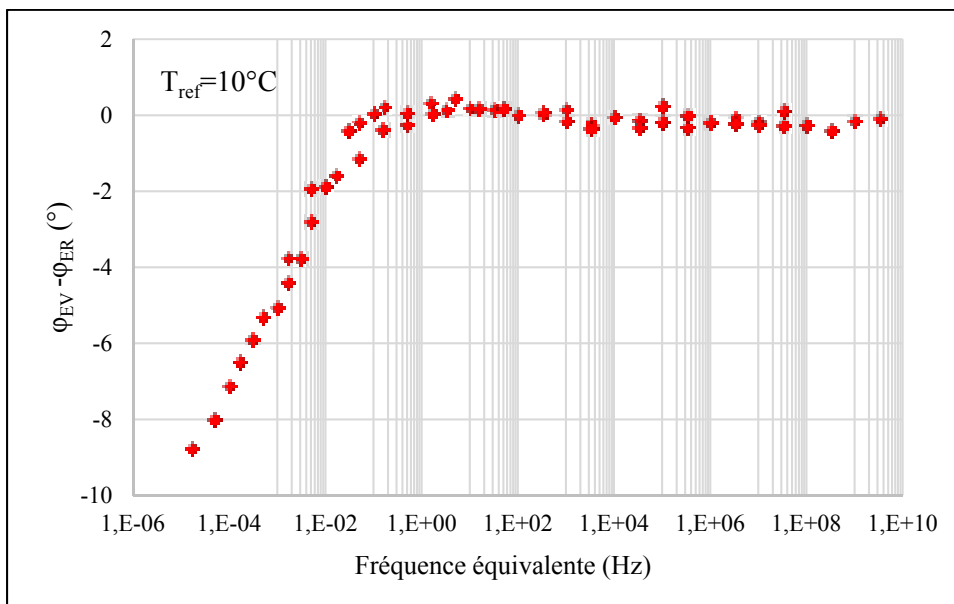


Figure 4.29 Différences entre l'angle de phase de l'enrobé GB20V-bv+CH et GB20R-br

4.3.2.5 Synthèse des valeurs du modèle 2S2P1D

Cette sous-section présente, au Tableau 4.20, les différents paramètres du modèle 2S2P1D pour les enrobés GB20 testés.

Tableau 4.20 Paramètres du modèle 2S2P1D pour les enrobés GB20

Enrobés	b (%)	V _i (%)	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	k	h	δ	β	C ₁	C ₂	τ _{0E} ¹ (s)
GB20R-b _R	4,6	2,9	130	43 500	0,180	0,54	2,90	200	31,2	203,7	0,039
GB20V-b _V +CH	4,6	2,6	200	41 500	0,180	0,54	2,70	200			0,037
GB20V-b _V ^{-10%} +CH	4,1	4,1	130	39 750							0,058
GB20V-b _V ^{-20%} +CH	3,7	3,1	275	45 000							0,089

¹ Le facteur de temps caractéristique du modèle 2S2P1D (τ_{0E}) est calculé pour une température de 10°C

4.3.3 Sommaire

Les essais de module complexe ont montré que les particules de verre n'avaient pas d'effet sur la rhéologie du bitume. Toutefois, les enrobés avec particules de verre ont montrés des résultats de rigidité légèrement plus faible que les enrobés de références pour un même V_{be}. Également, l'effet bénéfique de la chaux sur la rigidité des enrobés à haute température a pu être observé.

4.4 Tenue à l'eau

Les essais de tenue à l'eau ont été effectués sur trois enrobés de type ESG10 soit, le ESG10R-b_R, le ESG10V-b_V^{-6%} et le ESG10V-b_V^{-6%}+CH. Ces trois enrobés ont été choisis spécifiquement pour observer certains critères qui pourraient influencer la tenue à l'eau, soit 1) l'effet du verre 2) l'effet d'une diminution de bitume 3) l'effet de l'ajout de chaux hydratée. On remarque dans le Tableau 4.21 que l'éprouvette qui obtient la plus basse valeur est celle qui a subi une réduction du bitume et qui contient du verre. Cette conclusion était prévisible étant donné que la moins bonne adhésion entre les particules de verre et le bitume avait déjà été démontrée à plusieurs reprises dans la littérature. De plus, en diminuant le bitume, on réduit également le film de bitume effectif ce qui a pour effet de réduire la résistance à la tenue à l'eau (Sengoz & Agar, 2006). C'est donc intéressant de constater que même avec la présence de verre et d'une diminution de bitume, l'enrobé ESG10V-b_V^{-6%}+CH comprenant de la chaux hydratée, se comporte mieux qu'un enrobé ne comprenant aucune réduction de bitume ni aucun matériau de silice. La chaux hydratée a donc un impact marqué sur la tenue à l'eau des enrobés.

Il est à noter que malgré le traitement plus sévère attribué aux échantillons en termes de cycle de gel-dégel, les trois enrobés se conforment à la norme 4202 du MTMDET qui demande un pourcentage supérieur à 70%.

Tableau 4.21 Résultats de l'essai de tenue à l'eau pour les échantillons de ESG10

Enrobés	États ¹	Vides (%)	Hauteur (mm)	Degré de saturation (%)	Déplacement (mm)	Force maximale (kN)	Stabilité (kN)	Valeur Moy. de stabilité (kN)	Tenue à l'eau (%)
ESG10R-br	Sec	6,2	62,3	N/A	2,4	10,99	11,23	11,20	83,9
	Sec	5,9	63,8	N/A	4,2	11,20	11,18		
	Saturé	6,0	63,2	72,4	2,7	9,14	9,21	9,40	
	Saturé	6,6	62,7	78,9	3,7	9,45	9,60		
ESG10V-bv ^{-6%}	Sec	6,1	64,5	N/A	3,0	10,35	10,21	10,96	78,6
	Sec	6,1	63,5	N/A	3,1	11,67	11,70		
	Saturé	5,9	62,2	75,81	2,7	8,08	8,27	8,62	
	Saturé	5,7	63,4	77,39	3,4	8,93	8,97		
ESG10V-bv ^{-6%} +CH	Sec	5,9	63,1	N/A	2,4	11,41	11,51	11,63	85,6
	Sec	5,5	63,7	N/A	2,6	11,76	11,75		
	Saturé	6,0	62,8	70,2	2,3	9,74	9,87	9,96	
	Saturé	5,8	62,4	79,3	3,1	9,85	10,05		

¹ Représente si l'échantillon a été saturé d'eau et a été soumis aux cycles de gel-dégel

4.5 Résumé des résultats

Cette section présente un sommaire des résultats obtenus lors des différents essais pour les enrobés ESG10 (Tableau 4.22) et GB20 (Tableau 4.23).

4.5.1 ESG10

Tableau 4.22 Synthèse des résultats des enrobés de type ESG10

Type d'enrobé	ESG10R-b _R	ESG10V-b _V	ESG10V-b _V ^{-6%}	ESG10V-b _V ^{-17%}	ESG10V-b _V ^{-6%} +CH	Exigences MTMDET	
b% (massique)	5,3	5,4	4,9	4,3	4,9	S.O.	
D _{mm}	2,540	2,528	2,541	2,56	2,527		
P _{ba} (%)	0,38	0,26	0,26	0,21	0,39		
V _{ba} (%)	0,90	0,62	0,6	0,51	0,93		
V _{bc} (%)	12,25	12,25	11,48	10,31	11,19		12,20
V _i (%)@ PCG	N						
	0	25,9	24,6	25,3	25	26,7	S.O.
	10	14,7	14,2	15,6	14,3	17,3	≥11%
	80	6,7	6,8	8,4	6,9	10,3	4-7%
	200	4,0	4,6	6,0	4,6	7,9	≥ 2%
Orniérage	Cycles						
	1000	5,7	5,0	5,2	2,6	2,4	≤ 10
	3000	6,7	6,5	6,4	3,7	3,8	≤20
	10 000	7,6	9,3	7,5	4,7	4,8	S.O.
Module	E ₀₀ (MPa)	160	150	175	200	275	S.O.
	E ₀ (MPa)	40 500	41 000	41 500	41 500	43 000	
	E* (15°C, 10Hz)	7 305	7 012	8 654	9 468	9 854	
Tenue à l'eau (%)	83,9	S.O.	78,6	S.O.	85,6	S.O.	

4.5.2 GB20

Tableau 4.23 Synthèse des résultats des enrobés de type GB20

Type d'enrobé	GB20R-b _R	GB20V-b _V +CH	GB20V-b _V ^{-10%} +CH	GB20V-b _V ^{-20%} +CH	Exigences	
b% (massique)	4,6	4,6	4,1	3,7	S.O.	
D _{mm}	2,605	2,575	2,597	2,615		
P _{ba} (%)	0,63	0,60	0,65	0,64		
V _{ba} (%)	1,54	1,44	1,58	1,58		
V _{bc} (%)	10,19	10,15	8,94	7,89		11,20
V _i (%)@ PCG	N					
	0	25,2	24,2	25,5	27,6	S.O.
	10	15,1	13,4	15,4	17,6	≥11%
	120	5,4	4,4	6,6	9,1	4-7%
	200	4,0	3,2	5,4	7,7	≥ 2%
Orniérage	Cycles					
	1 000	3,1	4,2	2,5	2,1	S.O.
	3 000	3,7	4,5	3,1	2,7	
	10 000	4,3	5,4	3,6	3,2	
	30 000	5,0	5,9	4,1	3,4	≤ 10
	60 000	5,7	6,5	4,4	3,8	S.O.
100 000	6,0	6,8	4,7	4,1		
Module	E ₀₀ (MPa)	130	200	130	275	S.O.
	E ₀ (MPa)	43 500	41 500	39 750	45 000	
	E* (15°C, 10Hz)	7972	7723	8243	10239	

CONCLUSION

L'objectif de cette recherche était de formuler un enrobé bitumineux incorporant 10% de verre post-consommation et dont les propriétés seraient semblables ou supérieures à un enrobé conventionnel. Pour ce faire, un ESG10, qui est un enrobé utilisé en couche de surface, ainsi qu'un GB20 qui est utilisé en couche de base, ont été sélectionnés afin d'y intégrer des particules de verre. Puisque les précédentes études rapportaient des difficultés au niveau de la résistance à l'orniérage avec les enrobés contenant du verre, certains des enrobés étudiés ont également subi une réduction de bitume afin de pallier à ce problème. Également, puisque les enrobés avec verre montraient une moins bonne tenue à l'eau, de la chaux hydratée a été ajoutée à certains enrobés. Tous les ESG10 et les GB20 ont été évalués selon les mêmes trois critères soit : 1) l'aptitude au compactage à la PCG, 2) la résistance à l'orniérage et, 3) le module complexe.

D'abord, les résultats ont montré que les enrobés avec verre nécessitent une moins grande quantité de bitume que les enrobés conventionnels pour obtenir un même volume de bitume effectif (V_{be}). Toutefois, on remarque que l'ajout de chaux hydratée vient annuler ce gain puisqu'il absorbe davantage de bitume. Au niveau de l'aptitude au compactage, les résultats ont montré une similitude entre les résultats des enrobés conventionnels et des enrobés avec verre lorsqu'ils ont le même volume de bitume. Par contre, les enrobés de verre se compactent davantage dans les premières girations. Les résultats ont également montré qu'à volume de bitume équivalent, l'enrobé ESG10 avec verre résistait mieux à l'orniérage à 1,000 et 3,000 cycles (exigences) que les enrobés conventionnels. Toutefois, dans le cas du GB20, l'enrobé de référence obtenait une meilleure résistance que l'enrobé avec verre qui, soit dit en passant, respectaient largement les exigences de performances. De plus, lorsqu'il y avait réduction de bitume, les enrobés avec verre obtenaient de meilleures performances. Il a également été montré que la chaux hydratée améliore les performances à l'orniérage. Au niveau du module complexe, l'utilisation du verre semblable diminuer légèrement la rigidité des enrobés. L'ajout

de chaux, quant à elle, semble réduire la perte de rigidité des enrobés à hautes températures et à basses fréquences.

En conclusion, cette étude aura permis de comparer des enrobés contenant du verre avec des enrobés conventionnels et ainsi de prouver la faisabilité de l'incorporation de particules de verre. Les enrobés avec verre ayant un volume de bitume effectif standard respectent toutes les exigences établies par le MTMDET, mais restent moins performants à l'orniérage qu'un enrobé conventionnel. Toutefois, le ESG10 ainsi que le GB20 avec verre ayant subi une légère réduction de bitume et incorporant de la chaux hydratée montrent des performances très intéressantes. En plus de respecter les exigences du MTMDET à l'aptitude au compactage, ils obtiennent de bien meilleurs résultats à l'orniérage et une rigidité plus élevée que les enrobés conventionnels. La réduction de la teneur en bitume rend également ces enrobés plus avantageux d'un point de vue économique. Toutefois, le seul inconvénient est le volume de bitume effectif (V_{be}) qui n'est pas conforme aux normes établies. Malgré tout, une planche d'essai à la ville de Montréal sera mise en place dans la prochaine année avec des enrobés de formulation semblable au ESG10V-bv^{-6%}+CH et GB20V^{-10%}+CH. Cela permettra d'observer le comportement de ces enrobés dans une chaussée, mais également d'évaluer le processus d'incorporation du verre en usine afin de faire un pas de plus vers une potentielle commercialisation.

RECOMMANDATIONS

Puisque seuls les enrobés avec verre ont été testés en ayant subi une réduction de bitume ou encore avec un ajout de chaux hydratée, il serait intéressant de voir les performances des enrobés de référence sous ces mêmes conditions. Cela permettrait davantage de comparer les enrobés conventionnels avec les enrobés avec verre en faisant varier les mêmes paramètres.

Il serait également intéressant d'évaluer l'impact de la teneur en chaux hydratée sur les enrobés afin de connaître la teneur optimale pouvant être incorporée. Puisque les particules de chaux absorbent davantage le bitume que les fillers de calcaire, une réduction de sa teneur pourrait être avantageuse. De plus, une granulométrie de la chaux pourrait être effectuée afin de connaître l'impact de celle-ci sur les enrobés.

Au niveau des essais de module complexe, ceux-ci devraient être réalisés sur la même presse hydraulique pour chaque type d'enrobé. Cela permettrait d'obtenir les mêmes températures pour chaque essai. De plus, lors de la fabrication des éprouvettes d'enrobé à l'aide de la PCG, il faut prendre en compte que la teneur en vides contenue dans les briquettes ($\phi 150 \times 170\text{mm}$) sera plus élevée que celle contenue dans les éprouvettes carottées dans celles-ci ($\phi 80 \times 150\text{mm}$). En effet, on remarque que les éprouvettes qui ont été carottées et qui serviront à l'essai de module complexe contiennent environ 3% moins de vides après carottage de la briquette.

ANNEXE I

FORMULATION DU MÉLANGE DJL DE L'ENROBÉ DE TYPE ESG10

ANNEXE II

FORMULATION DJL DU MÉLANGE D'ENROBÉ DE TYPE GB20

ANNEXE III

FICHE TECHNIQUE DU BITUME 70-28



BITUME PG - ATTESTATION DE CONFORMITÉ
(AASHTO M 320)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		RECOMMANDATIONS - TEMPÉRATURE D'UTILISATION		
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Bitumar Inc 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4		Entreposage	Minimale	Maximale
Fabricant et lieu de fabrication Bitumar Inc 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4			137	175
Classe de bitume PG 70-28		Malaxage	155	170
Nom commercial PG 70-28				
N° de lot 157028-07		Date de fabrication 01/07/2015		
ESSAIS DE CARACTÉRISATION				
Date des essais de caractérisation	02/07/2015	MSCR (AASHTO TP70)		
Masse volumique (g/cm ³), à 25°C, AASHTO T228	1.019	Recouvrance d'élasticité à 3,2 kPa, R3,2 (%) à 64°C	63.04	
Masse volumique (g/cm ³), à 15°C, AASHTO T228	1.025	Complaisance non recouvrable à 3,2 kPa, Jnr3,2 (kPa-1) à 64°C	0.36	
Viscosité Brookfield (Pa·s), à 135°C, AASHTO T 316	1.097			
Viscosité Brookfield (Pa·s), à 185°C, AASHTO T 316	0.312	Complaisance non recouvrable différentielle, JnrDiff (%) à 64°C	24.1	
Stabilité au stockage (°C), LC 25-003	0.5			
TBA moyenne (°C)	58.2	NOTES		
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	75	<p>Ce produit doit être entreposé dans un réservoir vide ou contenant le même grade fournis par Bitumar inc. Si ce n'est pas le cas, il est de votre responsabilité de prendre les mesures nécessaires pour confirmer la caractérisation du produit.</p> <p>Peu importe les recommandations du fournisseur, L'entrepreneur doit respecter les documents contractuels.</p>		
Teneur en cendres (%)	0.21			
Variation de masse au RTFOT (%)	-0.598			
Température élevée de caractérisation Te(°C)	73.8			
Température basse de caractérisation Tb(°C)	-32.8			
Module de rigidité So (60) (MPa)	54			
Pente de mo (60)	0.484			
Enrobé résiduel (%) (LC25-009)	N.A.			
ESSAIS DE CONTRÔLE				
Date des essais de contrôle	02/07/2015			
G* _{sin} (δ), bitume d'origine à 70 °C (kPa)	1.38			
Température élevée de caractérisation Te(°C)	73.8			
Module de rigidité Sc (60) (MPa)	54			
Pente de mc (60)	0.484			
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	75			
REMARQUES				
Signé par: Hua Qin Liu		Date 02/07/2015		

ANNEXE IV

FICHE TECHNIQUE DU BITUME PG64-28



BITUME PG - ATTESTATION DE CONFORMITÉ
(AASHTO M 320)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		RECOMMANDATIONS - TEMPÉRATURE D'UTILISATION			
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Bitumar Inc 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4		Entreposage	Minimale	Maximale	
Fabricant et lieu de fabrication Bitumar Inc 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4			137	175	
Classe de bitume PG 70-28	Nom commercial PG 70-28	Malaxage	156	170	
N° de lot 157028-07	Date de fabrication 01/07/2015				
ESSAIS DE CARACTÉRISATION					
Date des essais de caractérisation	02/07/2015	MSCR (AASHTO TP70)			
Masse volumique (g/cm ³), à 25°C, AASHTO T228	1.019	Recouvrance d'élasticité à 3,2 kPa, R3,2 (%) à 64°C	63.04		
Masse volumique (g/cm ³), à 15°C, AASHTO T228	1.025	Complaisance non recouvrable à 3,2 kPa, Jnr3,2 (kPa-1) à 64°C	0.36		
Viscosité Brookfield (Pa-s), à 135°C, AASHTO T 316	1.097				
Viscosité Brookfield (Pa-s), à 165°C, AASHTO T 316	0.312	Complaisance non recouvrable différentielle, JnrDiff (%) à 64°C	24.1		
Stabilité au stockage (°C), LC 25-003	0.5				
TBA moyenne (°C)	56.2	NOTES			
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	75	Ce produit doit être entreposé dans un réservoir vide ou contenant le même grade fournis par Bitumar inc. Si ce n'est pas le cas, il est de votre responsabilité de prendre les mesures nécessaires pour confirmer la caractérisation du produit.			
Teneur en cendres (%)	0.21				
Variation de masse au RTFOT (%)	-0.596				
Température élevée de caractérisation Te(°C)	73.8				
Température basse de caractérisation Tb(°C)	-32.8				
Module de rigidité So (50) (MPa)	54				
Pente de mc (50)	0.484				
Enrobé résiduel (%) (LC25-009)	N.A.				
ESSAIS DE CONTRÔLE				Peu importe les recommandations du fournisseur, L'entrepreneur doit respecter les documents contractuels.	
Date des essais de contrôle	02/07/2015				
G*/sin (δ), bitume d'origine à 70 °C (kPa)	1.38				
Température élevée de caractérisation Te(°C)	73.8				
Module de rigidité Sc (50) (MPa)	54				
Pente de mc (50)	0.484				
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	75				
REMARQUES					
Signé par: Hua Qin Liu		Date 02/07/2015			

ANNEXE V

FICHE TECHNIQUE DE LA CHAUX HYDRATÉE



INFORMATION TECHNIQUE – ANALYSE TYPIQUE

Produits de chaux et granulats calcaires / Lime and Limestone products

GRAYMONT (QC) INC. 25 - 206 rue de Lauzon, Boucherville (Québec) J4B 1E7, (450) 449-2262

PRODUIT : CHAUX CALCIQUE ÉTEINTE

EXPLOITATION : Marbleton, Québec

DESCRIPTION DU PRODUIT :

Fine poudre blanche obtenue de la réaction de la chaux vive et d'une quantité suffisante d'eau pour transformer l'oxyde de calcium (CaO) en hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂).

COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS CHIMIQUES TYPIQUES :

Hydroxyde de calcium disponible (Ca(OH) ₂), (%)	92.8
Oxyde de calcium total (CaO), (%)	73.4
Oxyde de calcium disponible (CaO), (%)	70.3
Oxyde de magnésium (MgO), (%)	0.8
Silice (SiO ₂), (%)	1.2
Oxyde ferrique (Fe ₂ O ₃), (%)	0.2
Alumine (Al ₂ O ₃), (%)	0.4
Soufre total (S), (%)	0.17
Perte au feu, (%)	24.2
Carbonates, (CaCO ₃), (%)	2.3
Humidité (H ₂ O), (%)	0.7
Pouvoir neutralisant (CaCO ₃ = 100), (%)	129

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES TYPIQUES :

Masse volumique (ASTM C 110), (kg/m ³)	350 – 575
(lb/pi ³)	22 – 36
Surface spécifique Blaine (ASTM C 204), (cm ² /g)	23460
Surface spécifique BET, (m ² /g)	14

DONNÉES DE RÉFÉRENCE : (CRC Handbook of Chemistry and Physics)

Densité	2.24
Solubilité dans l'eau (0 °C), (g/l)	1.85
pH à saturation (25 °C)	12.454

GRANULOMÉTRIE :

TAMIS (mm)	TAMIS (U.S.A.)	% PASSANT
0.600	N° 30	100
0.300	N° 50	99 – 100
0.150	N° 100	98 – 100
0.075	N° 200	95 – 100
0.045	N° 325	90 – 100

AVIS :

* Les renseignements que contient ce bulletin sont basés sur les résultats moyens d'échantillons de production. Les expéditions de produit sont sujettes à la variation normale. En conséquence, ces données ne peuvent pas être prises pour établir des spécifications de produit.



ANSI / NSF 60
ADDITIF POUR LE TRAITEMENT DE L'EAU POTABLE
< 44 Y 4 >
DOSAGE MAXIMUM : 650 mg/l

ANNEXE VI

**RECOMMANDATION DU TYPE DE BITUME SELON LE TYPE D'ENROBÉ ET
LA RÉGION CLIMATIQUE**

CONSTRUCTION NEUVE – RECONSTRUCTION

ESG-10 • EG-10¹ • EGM-10 • SMA-10 • ESG-14² • GB-20

Choix des composants • Recommendations

Type de route	Débit de circulation**		Couche de surface						Couche de base					
	DJMA	ECAS annuel	Bitume		Catégorie gros granulats fins	Essais spéciaux	Bitume		Catégorie gros granulats fins	Catégorie gros granulats fins	Essais spéciaux			
			Zone 1 PG	Zone 2 PG			Zone 3 PG	Zone 1 PG				Zone 2 PG	Zone 3 PG	
Autoroute	> 20 000	> 1 000 000	70-28	64-34	S.O.	1a	1	Ornièreux, CPP	64-28	64-34	S.O.	2c	1	Ornièreux
	< 20 000	< 1 000 000	70-28	64-34	S.O.	1a	1	Ornièreux, CPP	64-28	58-34	S.O.	3c	1	Ornièreux
	> 5 000	> 500 000	70-28	64-34	S.O.	2b	1	Ornièreux, CPP	64-28	58-34	S.O.	3c	2	Ornièreux
Nationale	> 20 000	> 500 000	70-28	64-34	58-40	1a	1	Ornièreux, CPP	64-28	58-34	52-40	3c	1	Ornièreux
	< 20 000	< 500 000	70-28*	64-34*	58-40	2b	2	Ornièreux, CPP	64-28	58-34	52-40	3c	2	Ornièreux
	> 5 000	> 300 000	64-28	58-34	58-40	3c	2		64-28	58-34	52-40	3c	2	
Régionale et collectrice	> 20 000	> 300 000	70-28	64-34	58-40	2b	1	Ornièreux, CPP	64-28	58-34	52-40	3c	2	Ornièreux
	< 20 000	< 300 000	70-28*	64-34*	58-40*	3b	2	Ornièreux	64-28*	58-34	52-40	3c	2	Ornièreux
	> 5 000	> 150 000	64-28	58-34	52-40	3c	2		58-28	58-34	52-40	3c	2	

* Réseau de construction

** L'ensemble des valeurs de DJMA et de l'ECAS de la route ne correspondent pas à la même ligne dans le tableau, sélectionner la ligne qui correspond aux conditions les plus sévères.

Notes

1. Seuls les bitumes PG 70-28 et PG 64-34 peuvent être utilisés pour l'ornière (E-10).

2. Dans certains cas pour l'ornière ESG-14 l'usage d'un bitume de classe supérieure (et même de température élevée) à celle spécifiée dans le tableau peut être nécessaire.

L'attribution d'un bitume différent en couche de base n'est pas recommandée si la quantité d'ornière de cette couche est inférieure à 1 000 tonnes.

Un fait d'écoulement conforme à la norme 4105 doit être éprouvé entre chaque des couches d'ornière.

ECAS annuel : Cumul du nombre Équivalent de Charge Axiale Simple (niveau normalisé de 8165 kg) anticipé pour la durée de vie au moment de la conception divisé par le nombre d'années correspondant. La voie la plus sollicitée est considérée.

DJMA : Débit Journalier Moyen Annuel. Cette valeur représente le décompte total de tous les types de véhicules circulant sur toutes les voies et dans les deux directions. Un recensement annuel de données sur la circulation par niveau de route, de tronçon et de section est disponible auprès du Service des chaussées.

Août 2012

CONSTRUCTION NE. I E - RECONSTRUCTION

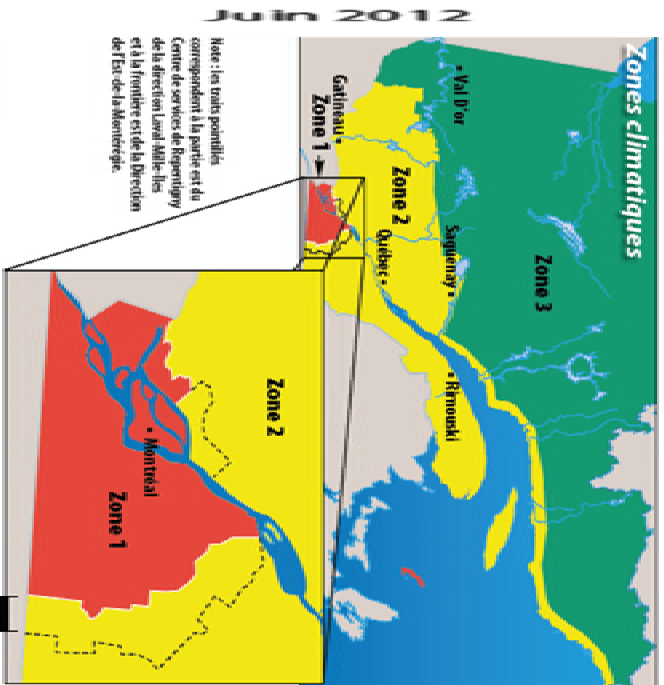


Tableau 4
Caractéristiques complémentaires des granulats pour enrobés à chaud selon les usages

Caractéristiques complémentaires	
Gros granulats	Propreté (particules < 80 µm) (% max.) ¹ (gravière et sablière) Propreté (particules < 80 µm) (% max.) ¹ (carrière) Coefficient de polissage par projection (minimum) ²
Granulats fins	Teneur en mottes d'argile (% max.) Coefficient d'écoulement ³ Teneur en particules inférieures à 5 µm (% max.) ⁴

N. I.

Tableau 1
Catégories de gros granulats selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et aux chocs

Caractéristiques intrinsèques	Méthodes d'essai	Catégories de gros granulats					
		1	2	3	4	5	6
Micro-Deval (MD)	LC 21-070	≤15	≤20	≤25	≤30	≤35	≤40
Los Angeles (LA)	LC 21-400	≤35	≤45	≤50	≤50	≤50	≤50
(MD+LA)		≤40	≤55	≤70	≤75	≤80	≤85

Tableau 2
Catégories de gros granulats selon leurs caractéristiques de fabrication

Caractéristiques de fabrication	Méthodes d'essai	Catégories de gros granulats					
		a	b	c	d	e	f
Fragmentation (%)	LC 21-100	100	≥75	≥60	≥60	≥60	≥50
Particules plates (%)	LC 21-265	≤25	≤25	≤25	≤30	—	—
Particules allongées (%)	LC 21-265	≤40	≤40	≤45	≤50	—	—

Tableau 3
Catégories de granulats fins selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et de friabilité et selon leurs caractéristiques de fabrication

Caractéristiques intrinsèques	Méthodes d'essai	Catégories de granulats fins		
		1	2	3
Micro-Deval (MD)	LC 21-101	≤30	≤35	≤35
Friabilité (%)	LC 21-080	≤40	≤40	—

Méthodes d'essai	Couche de base		Couche de surface	
	1	2	1	2
CSA-A23.2-5A	≤1,0	—	≤1,0	—
CSA-A23.2-5A	≤1,5	—	≤1,5	—
LC 21-102	N/A	—	≥0,45 ou ≥0,50 ⁵	—
CSA-A23.2-3A	≤2,0	—	≤2,0	—
LC 21-075	≥80	—	≥80	—
BNQ 2501-025	≤4	—	≤4	—

1 Cette caractéristique s'applique à chaque classe granuladaire.
2 Minimum pour les gros granulats de caractéristiques intrinsèques de catégorie 1 ou 2.
3 Pour des granulats fins de catégorie 1 uniquement.
4 Le pourcentage est établi par rapport au passant 5 mm.
5 Pour la direction territoriale de l'Est-de-Montréal.
6 Les données contenues dans ces tableaux sont conformes à la norme BNQ 2560-114 « Travaux de génie civil — Granulats ».

ANNEXE VII

**NORME 4202-ENROBÉS À CHAUD FORMULÉ SELON LA MÉTHODE DE
FORMULATION DU LABORATOIRE DE CHAUSSÉES**

Tome VII	
Chapitre 4	Norme 4202
Page 16 de 18	
Date 2017 12 15	

LAVES ET ENROBÉS

4.2 Enrobés à chaud

**Enrobés à chaud formulés selon
la méthode de formulation du
Laboratoire des chaussées**

 Transports,
Mobilité durable
et électrification
des transports


 Québec 
NORME

Tableau 4202-1
Caractéristiques des enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation
du Laboratoire des chaussées

Type d'enrobé	GB-20	ESG-14	ESG-10	EG-10	EC-10	Méthode d'essai	
Usages	Couche de base	Couche unique, couche de surface ou couche de base	Couche de surface	Couche de surface	Couche de correction		
Nombre minimal de classes granulaires distinctes à utiliser ⁽¹⁾	3	3	2	2	2		
Tamés	(% passant)						
Fuséau granulométrique	28 mm	100				LC 26-007	
	20 mm	95-100	100			LC 26-007	
	14 mm	67-90	95-100	100	100	100	LC 26-007
	10 mm	52-75	70-90	92-100	90-100	94-100	LC 26-007
	5 mm	35-50	40-60	52-65	40-48	66-78	LC 26-007
	2,5 mm	—	—	—	—	45-65	LC 26-007
Zone de restriction ⁽²⁾	80 µm	4,0-8,0	3,0-8,0	4,0-10,0	4,0-10,0	4,0-10,0	LC 26-007
	2,5 mm ⁽³⁾	—	39,2	46,1	46,1	—	LC 26-007
	1,25 mm ⁽³⁾	—	25,7-31,7	30,7-36,7	30,7-36,7	—	LC 26-007
	600 µm ⁽³⁾	—	19,1-23,1	22,8-26,8	22,8-26,8	—	LC 26-007
	315 µm ⁽³⁾	—	15,4	18,1	18,1	—	LC 26-007
	Pourcentage de fibres (% min.) ⁽⁴⁾						
V _{9,5} (% min.) ⁽⁵⁾	10,2	11,4	12,2	12,4	12,6		
Vides à 10 girations (%)	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 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	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 (% min.) ⁽⁶⁾	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	LC 26-003	
Compacité (% min.)	93,0	93,0	93,0	93,0	93,0	LC 26-320 LC 26-510	
Résistance à l'orniérage sur plaques de 100 mm à 52, 58 ou 60 °C (selon la classe de bitume) à 30 000 cycles (% max. de déformation) P-4-1	10,0	10,0	—	—	—	LC 26-410	
Résistance à l'orniérage sur plaques de 50 mm à 52, 58 ou 60 °C (selon la classe de bitume) à 1000 cycles à 3000 cycles (% max. de déformation) P-4-1	—	—	10,0 15,0	10,0 15,0	10,0 20,0	LC 26-410	
Tenue à l'eau (% min.) ⁽⁷⁾	70	70	70	—	70	LC 26-001	

(Suite du tableau page suivante et notes de bas de tableau à la page 18)

**Enrobés à chaud formulés selon
 la méthode de formulation du
 Laboratoire des chaussées**

Tableau 4202-1 (suite)

 Caractéristiques des enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation
 du Laboratoire des chaussées

Type d'enrobé	ESG-5	EGM-10	MUN-10	EC-5	Méthode d'essai	
Usages	Couche antifissure	Couche de surface (intervention palliative)	Couche de surface (rue résidentielle en milieu urbain et piste cyclable)	Rapiéçage manuel ou couche de correction		
Nombre minimal de classes granulaires distinctes à utiliser ⁽¹⁾	2	2	2	1		
Tamis	(% passant)					
Fuséau granulométrique	28 mm				LC 26-007	
	20 mm				LC 26-007	
	14 mm		100	100	LC 26-007	
	10 mm	100	90-100	95-100	100	LC 26-007
	5 mm	85-100	35-45	70-85	90-100	LC 26-007
	2,5 mm	50-70	min. 20	50-65	65-90	LC 26-007
Zone de restriction ⁽²⁾	80 µm	4,0-12,0	5,0-11,0	4-10	4,0-12,0	LC 26-007
	2,5 mm ⁽³⁾	—	—	—	—	LC 26-007
	1,25 mm ⁽³⁾	—	—	—	—	LC 26-007
	630 µm ⁽³⁾	—	—	—	—	LC 26-007
	315 µm ⁽³⁾	—	—	—	—	LC 26-007
Pourcentage de fibres (%) ⁽⁴⁾		—		—		
V _{max} (%) ⁽⁴⁾	14,0	11,3	13,3	13,3		
Vides à 10 girations (%)	(6 g) ≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	LC 26-003	
Vides à 80 girations (%)	(50 g) 4,0-7,0	4,0-7,0	4,0-7,0	4,0-7,0	LC 26-003	
Vides à 100 girations (%)		—	—	—	LC 26-003	
Vides à 120 girations (%)		—	—	—		
Vides à 200 girations (%) ⁽⁵⁾	(75 g) ≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	LC 26-003	
Compacité (% min.)	93,0	93,0	93,0	93,0	LC 26-320 LC 26-510	
Résistance à l'orniérage sur plaques de 100 mm à 52, 58 ou 60 °C (selon la classe de bitume) à 30 000 cycles (% max. de déformation) ⁽⁶⁻⁷⁾	—	—	—	—	LC 26-410	
Résistance à l'orniérage sur plaques de 50 mm à 52, 58 ou 60 °C (selon la classe de bitume) à 1000 cycles à 3000 cycles (% max. de déformation) ⁽⁶⁻⁸⁾	— —	10,0 15,0	— —	— —	LC 26-410	
Tenue à l'eau (% min.) ⁽⁹⁾	70	70		—	LC 26-001	

(Notes de bas de tableau à la page suivante)

ANNEXE VIII

COURBE GRANULOMÉTRIQUE DES DIFFÉRENTES CLASSES GRANULAIRES

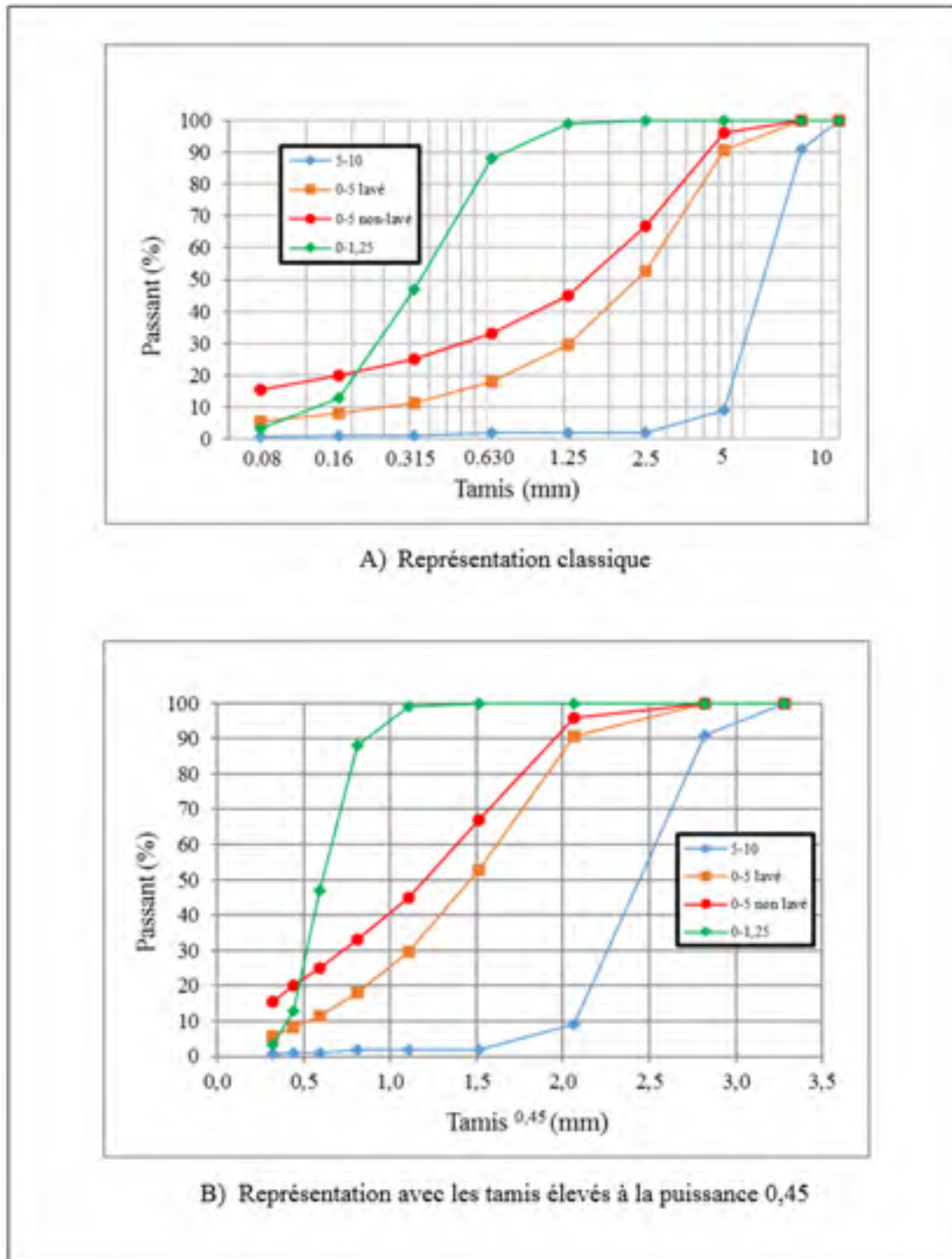


Figure-A VIII-1 Granulométrie de différentes classes de granulats de calcaire qui constituent l'enrobé de type ESG10

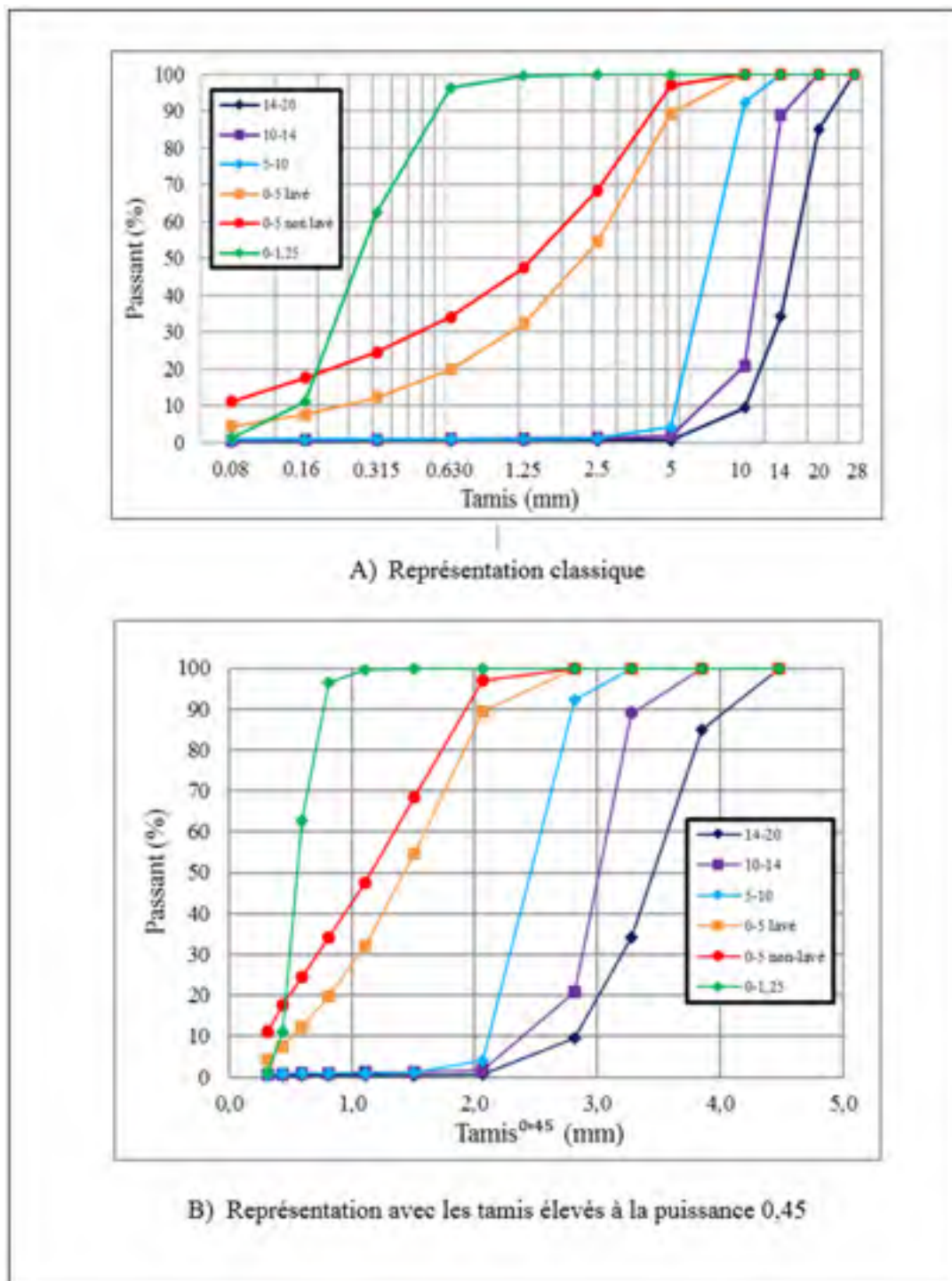


Figure-A VIII-2 Granulométrie de différentes classes de granulats de calcaire qui constituent l'enrobé de type GB20

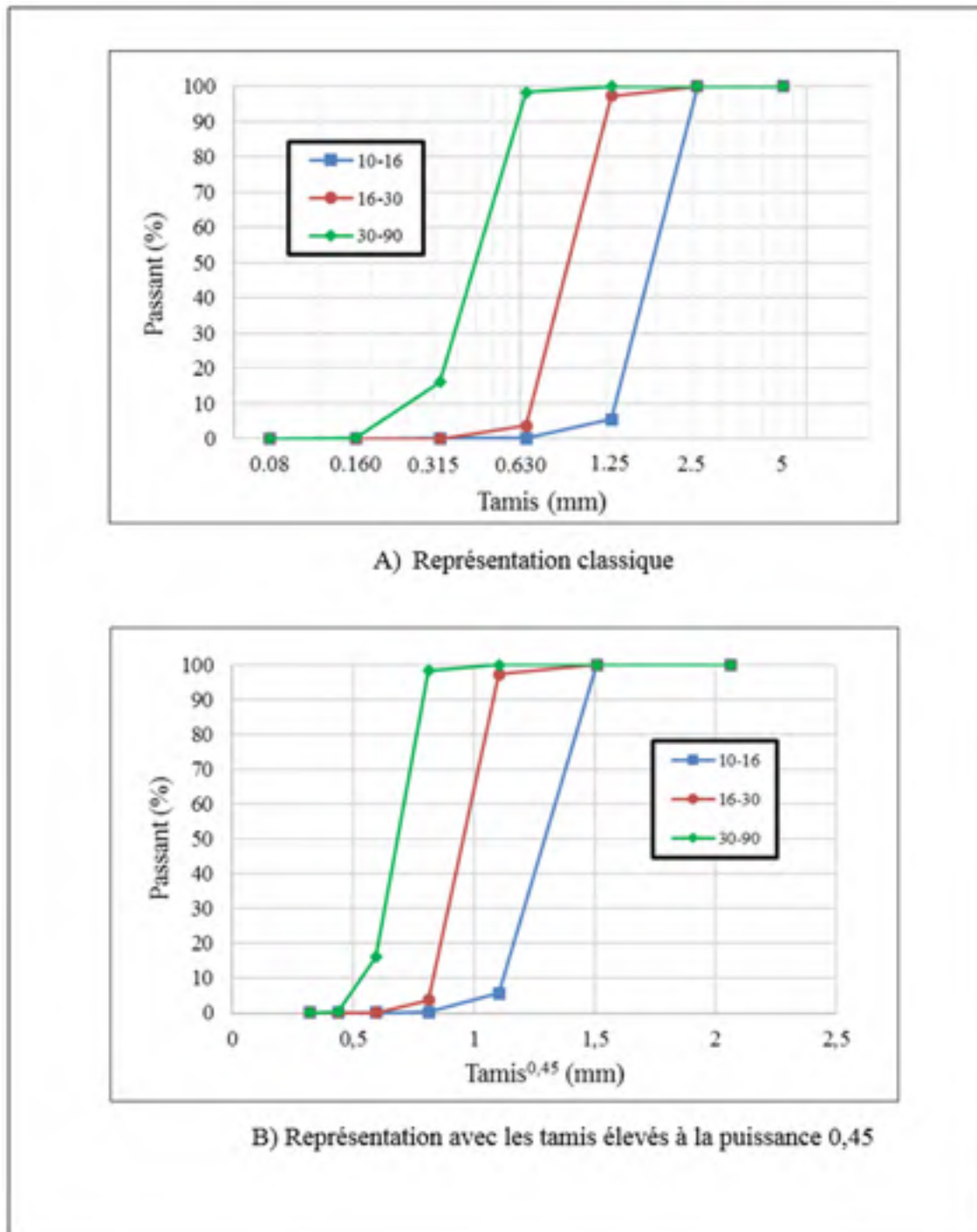


Figure-A VIII-3 Granulométrie des différents types de verre utilisés dans la confection des enrobés de type ESG10 et GB20

ANNEXE IX

FICHE TECHNIQUE DES CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES DES DIFFÉRENTES CLASSES GRANULAIRES



CARACTERISTIQUES DE GRANULATS DES FORMULES MTQ
COMPOSANTES GRANULAIRES DES FORMULES D'ENROBÉS (SABLE GAUDETTE) DE L'USINE : 074

GROS GRANULATS		INTRINSEQUES				FABRICATION			COMPLEMENTAIRES	
CALIBRE	PROVENANCE	L'ANGELES LC 21-400	M.DEVAL LC 21-070	L.A + M.D	% FRAGM. LC 21-100	PART.PL. LC 21-205	PART. ALL. LC 21-205	PROPRETE CSA A21.3-5A	C.P.P. LC 21-102	
5-10mm	St-Bruno	13	4	17	100	N/A	N/A	1,2	0.46 (19-05-2016)	
10-14mm	St-Bruno	9	4	13	100	N/A	N/A	0,7		
14-20mm	St-Bruno	10	4	14	100	N/A	N/A	1,2		
GRANULATS FINS		INTRINSEQUES				FABRICATION			COMPLEMENTAIRES	
CALIBRE	PROVENANCE	FRAGILITE LC 21-080	M.DEVAL LC 21-101					MOTTES D'ARG. CSA A21.3-3A	ECOULEMENT LC 21-015	PART.< 5 µm HQ 2501-025
0-5mm	St-Bruno	12	10,6					N/A		1,9
0-0,6mm	St-Bruno	35	22,2					N/A		2,7
Sable Gaudette	St-Roch Tech	20	20,8					1,3	Voir Combiné	0,4
Résultats du combiné		20	16,2							
COMBINÉ GRANULATS FINS										
CALIBRE	PROVENANCE	PROPORTION								
0-5mm	St-Bruno	60%								
0-0,6mm	St-Bruno	25%								
Sable Gaudette	St-Roch Tech	15%								105
		FORMULES SABLE GAUDETTE								
		USINE #074								

Requis par : Genevieve Tech.

Date: 19-05-2016

Approuvé par : Cyril Gaudette Tech.
Superviseur Technique

Date: 19-05-2016

Formule 074 (Sable)

BIBLIOGRAPHIE

- Apeageyi, A.K., Grenfell, JR.A., & Airey, G.D. (2015). Influence of aggregate absorption and diffusion properties on moisture damage in asphalt mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup1), 404-422, DOI: 10.1080/14680629. 2015.1030827
- Airey, G. D., Collop, A. C., & Thom, N. H. (2004). Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates. In Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, (Vol. 12, p.16)
- Aïtcin, C., Jolicoeur, G., & et Mercier, M. (1992). *Technologie des granulats*, (2^{ème} édition). Canada : Les éditions Le Griffon d'argile.
- Al-Tameemi, A. F., Wang, Y., & Albayati, A. (2015). Influence of hydrated lime on the properties and permanent deformation of the asphalt concrete layers in pavement. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 4(1), 1-19.
- Al-Tameemi, A. F., Wang, Y., & Albayati, A. (2015). Experimental study of the performance related properties of asphalt concrete modified with hydrated lime. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015185. doi : 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001474.
- Arabani, M. (2011). Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1181-1185.
- Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M., & Ferdowsi, B. (2012). Modeling the fatigue behaviors of glassphalt mixtures. *Scientia Iranica*, 19(3), 341-345.
- Aragão, F. T. S., Lee, J., Kim, Y. R., & Karki, P. (2010). Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behavior of asphalt mixtures and asphaltic pavements. *Construction and building materials*, 24(4), 538-544.
- Bacsplus. (2017). Mythes et réalités. En ligne. www.bacsplus.ca/mythes-et-realites. Consulté le 16 janvier 2017
- Bagampadde, U., Isacson, U., & Kiggundu, B. M. (2006). Impact of bitumen and aggregate composition on stripping in bituminous mixtures. *Materials and structures*, 39(3), 303-315.
- Bernard, W. (2015). *Étude et caractérisation du granulats de verre postconsommation comme matériaux du corps de chaussée*. Document inédit, École de technologie supérieure, Montréal, Qc.

- Branthaver, J. F., Petersen, J. C., Robertson, R. E., Duvall, J. J., Kim, S. S., Harnsberger, P.M., & Scharbron, J. F. (1993). *Binder characterization and evaluation. Volume 2: Chemistry* (No. SHRP-A-368).
- Carter, A., & Perraton, D. (2002). La mesure du module complexe des enrobés bitumineux. Dans *2e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil*, p.10.
- Curtis, C. W., Ensley, K., & Epps, J. (1993). Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption (No. SHRP-A-341). Washington, DC, USA: National Research Council.
- Di Benedetto, H., & Corté, J.F. (2004). *Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants* (1ère édition). Paris: Hermes Science.
- Di Benedetto, H., & Corté, J.F. (2005). *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*, 1ère éd. Paris: Hermes Science.
- Dembicki, M. (1992). Connecticut towns have hit the road in an effort to reduce the flow of the glass waste into landfills. *Waste Age Magazine*, 87-92.
- Dickson, P. F. (1973). Cold weather paving with glasphalt. *Utilization of waste glass*, p.97.
- Doucet, F., & Auger, B. (2010). *Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des transports du Québec*. Service des matériaux d'infrastructures, Direction des laboratoires des chaussées, Ministère des transports du Québec.
- Dumouchel A. (2016). Steve Whettingsteel l'homme derrière la révolution du verre. *3RVE*, 12(1), 8-14.
- Foster, C.W.(1970). *Use of waste glass as asphaltic concrete aggregate*. (Thèse de doctorat, University of Missouri, Rolla, États-Unis).
- Gagné, L. (2010). Le Verre : Fiches informatives. Repéré à <http://www.recycquebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/Fiche-verre.pdf>
- Halstead, W.J. (1993). *Use of waste glass in highway construction. Update*, 1, 992
- Huang, S. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., & Claine Petersen, J. (2005). Impact of lime modification of asphalt and freeze–thaw cycling on the asphalt–aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage. *Journal of materials in civil engineering*, 17(6), 711-718.
- Huang, Y., Bird, R. N., & Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58-73.

- Hughes, C.S. (1990). *Feasibility Of Using Recycled Glass In Asphalt*. (No. VTRC 90-R3). Virginia Transportation Research Council.
- Imteaz, M.A., Ali, MM.Y., & Arulrajah, A. (2012). Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material. *Waste Management and Research*, 30(9), 917-921.
- Johansson, L. S. (1998). *Bitumen ageing and hydrated lime* (Doctoral dissertation, Institutionen för infrastruktur och samhällsplanering).
- Johansson, L. S., & Isacsson, U. (1996). Influence of Testing Conditions on the Capacity of Hydrated Lime to Inhibit Bitumen Ageing. *Royal Institute of Technology*, 3, 1-12.
- Khodaii, A., Tehrani, H. K., & Haghshenas, H. F. (2012). Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 165-170.
- Lachance-Tremblay, É., Vaillancourt, M., & Perraton, D. (2016). Evaluation of the impact of recycled glass on asphalt mixture performances. *Road Materials and Pavement Design*, 17(3), 600-618.
- Lachance-Tremblay, É., Perraton, D., Vaillancourt, M., & Di Benedetto, H. (2017). Degradation of asphalt mixtures with glass aggregates subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*.
- Lamothe, S. (2004). *Influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-ornière*. (Mémoire de maîtrise en génie de la construction, École de Technologie supérieure, Montréal, Canada).
- Lamothe, S. (2014). *Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques*. (Thèse de doctorat en génie de la construction, École de technologie supérieures, Montréal, Canada).
- Laroche-Paquet, R. (2015). *Optimiser la récupération, le tri et la commercialisation des matières recyclables au Québec*. (Mémoire de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada).
- Lesueur, D., Petit, J., & Ritter, H. J. (2013). The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review. *Road materials and pavement design*, 14(1), 1-16.
- Lessard, D. (2015, 15 mai). Feu vert à la consigne des bouteilles de vin. *La Presse*. p.1.

- Little, D. N., & Petersen, J. C. (2005). Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: physical and chemical interactions revisited. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2), 207-218.
- McLeod, N. W. (1956). Relationships between density, bitumen content, and voids properties of compacted bituminous paving mixtures. In *Highway Research Board, Proc., 35th Annual Meeting* (Vol. 35, pp. 327-404).
- Meunier, M. (2013). Orniérage : Les facteurs les plus influents dans une formulation d'enrobé bitumineux. *Via Bitume*, 8(3), 8-11.
- MTQ. (2005). *Enrobés - Formulation selon la méthode LC*. Coll. Ministère des Transports. Québec: Bibliothèque nationale du Québec.
- Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003). General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. *Road materials and pavement design*, 4(2), 185-224.
- Özen, H. (2011). Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples. *Construction and Building Materials*, 25(2), 756-765.
- Paradis, M. (2015). Les enrobés du MTQ et leurs usages en milieu municipale. [Présentation PowerPoint]. Repéré à https://ceriu.qc.ca/system/files/c1.2_michel_paradis.pdf.
- Perraton, D. (2012). *MGC 805 - Science des Matériaux*, Programme de Maîtrise en génie de la construction. Montréal: École de technologie supérieure.
- Perraton, D., & Olard, F. (2013). *MGC837-Matériaux bitumineux : Formulation, fabrication et mise en place*, Programme de Maîtrise en génie de la construction. Montréal: École de Technologie supérieure.
- Petersen, J. C. (2000). Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability. *Developments in Petroleum Science*, 40, 363-399.
- Pham, N. H., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., Gonzalez-Leon, J. A., Barreto, G., Nocolai, A., & Jajubowski, M. (2013). RAP and additive influence on 3D linear behaviour of warm bituminous mixtures. *Road Mater Pavement Des* [doi: 10.1080/14680629.2015.1021108], on line first.
- Phan, C. V., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., & Lesueur, D. (2016). Influence of Hydrated Lime on Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures. Dans 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials (pp. 667-680). Springer Netherlands.

- Plancher, H., and Petersen, J. C. (1976). Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime : a mechanistic study. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 45, 1–24.
- Ramirez Cardona, Diego Alejandro, Pouget, Simon, Di Benedetto, Herve, & Olard, François. (2015). Viscoelastic Behaviour Characterization of a Gap-graded Asphalt Mixture with SBS Polymer Modified Bitumen. *Materials Research*, 18(2), 373-381. DOI : <https://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.332214>
- Recyc-Québec. (2012). Bilan 2012 de la gestion des matières résiduelles au Québec. Repéré à www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2012.pdf
- Recyc-Québec. (2015). Sondage auprès des centres de tri traitant le verre de la collecte sélective. Repéré à www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/haut-de-page/salle-de-presse/archives-presse/2015-recuperation-verre
- Recyc-Québec. (2016). Indice du prix des matières (moyenne) 1991 à 2014. Repéré à www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/indice-prix-matieres-sommaire-1991-2014_0.pdf.
- Recyc-Québec.(2016). Prix de la matière payée aux récupérateurs et livrée chez les recycleurs : Décembre 2016. Repéré à www.recycquebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/indice-prix-matieres-sept2016.pdf.
- Sajed, Y., & Shafabakhsh G.H. (2014). Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials; case study: Glass cullet. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 96-103.
- Sengoz, B., & Agar, E. (2007). Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt. *Building and environment*, 42(10), 3621-3628.
- Shelby. J.E. (2005). *Introduction to Glass Science and Technology*, 2^{ème} édition. United Kingdom : The Royal Society of Chemistry
- Shell Bitumen. (1995). *The shell bitumen industrial handbook*. Thomas Telford.
- Speight, J. G. (2004). Petroleum Asphaltenes-Part 1: Asphaltenes, resins and the structure of petroleum. *Oil & gas science and technology*, 59(5), 467-477.
- Tabatabaei, S.A. (2013). Evaluate Aging Effect of SBS Modified Bitumen. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* 7(2), 164-167.

- Tayfur, S., Ozen, H., & Aksoy, A. (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21, 328-337.
- Trudeau, S. (2015). Bitumes et liants bitumineux. [Présentation PowerPoint].
- Watson, T. (1988, Juillet). When the tire hits the glassphalt. *Resource Recycling Magazine*, 18-70.
- West, R., Page, G., & Murphy, K. (1993). Evaluation of Crushed Glass in Asphalt Paving Mixtures. In *Use of Waste Materials in Hot-Mix Asphalt* (pp. 117-125). DOI: <https://doi.org/10.1520/STP19846S>
- Wu, S., Yang, W., & Xue, Y. (2004). Preparation and Properties of Glassasphalt Concrete. *Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education: Wuhan University of Technology*.
- Young, J. F., Mindess, S., Gray, R.J., & Bentur, A. (1998). *The science and technology of civil engineering materials*, Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, 1998, ISBN 0-13-659749-1.