

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Introduction aux enrobés bitumineux	3
1.1.1 L'enrobé de surface de type ESG-10	5
1.1.2 L'enrobé de base de type GB-20	5
1.2 Les bardeaux d'asphalte.....	5
1.2.1 Les bardeaux d'asphalte de postfabrication.....	6
1.2.1.1 Composition des bardeaux; les granulats.....	7
1.2.1.2 Composition des bardeaux; les fibres	8
1.2.1.3 Composition des bardeaux; le bitume.....	9
1.2.2 Les bardeaux d'asphalte de postconsommation.....	9
1.2.2.1 État des bardeaux d'asphalte de postconsommation à la réception.....	10
1.3 Les enrobés bitumineux incorporant des particules de bardeaux d'asphalte au MTQ	12
1.3.1 Les enrobés bitumineux avec bardeaux d'asphalte de postfabrication	12
1.3.2 La mobilisation du bitume des bardeaux dans les enrobés bitumineux selon le MTQ	13
1.4 La méthode de formulation LC.....	14
CHAPITRE 2 PROGRAMME DE RECHERCHE ET MÉTHODE D'ESSAI	17
2.1 Programme de recherche.....	19
2.2 Présentation des différents essais réalisés.....	20
2.2.1 Essais de formulation.....	21
2.2.1.1 Détermination de la densité maximale.....	21
2.2.1.2 Détermination de l'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire (pcg)	21
2.2.2 Essais thermomécaniques	22
2.2.2.1 Mesure de la résistance à l'orniérage.....	23
2.2.2.2 Mesure du retrait thermique empêché.....	26
2.2.2.3 Mesure du module complexe	29
2.2.3 Essais de durabilité	33
2.2.3.1 Mesure de la tenue à l'eau	33
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DES ENROBÉS CONFECTIONNÉS, DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES	35
3.1 Description des enrobés confectionnées	35
3.1.1 Enrobé de surface : ESG-10.....	36
3.1.1.1 Formulation des enrobés de surface étudiés	38
3.1.1.2 Caractéristiques des différents enrobés de surface	39

3.1.2	Enrobé de base : GB-20	41
3.1.2.1	Formulation des enrobés de base étudiés	42
3.1.2.2	Caractéristiques des différents enrobés de base	43
3.2	Matériaux utilisés	45
3.2.1	Bitume	45
3.2.2	Granulats	46
3.2.2.1	Provenance des granulats	47
3.2.3	Bardeaux d'asphalte de postconsommation	49
3.2.3.1	Granulométrie	51
3.2.3.2	Comparaison entre les particules de bardeaux et le granulat de calibre 0-5	52
3.3	Préparation en vue de réaliser les essais en laboratoire	53
3.3.1	Confection des enrobés en laboratoire	53
3.3.2	Fabrication des plaques et des éprouvettes	55
3.3.2.1	Éprouvettes pour déterminer la résistance à l'orniérage	56
3.3.2.2	Éprouvettes pour les essais de retrait thermique empêché et de module complexe	57
3.3.2.3	Éprouvettes pour la mesure de la tenue à l'eau	63
3.3.3	Caractéristiques physiques des éprouvettes	66
CHAPITRE 4	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	73
4.1	Essais de formulation	73
4.1.1	Densité maximale du mélange (d_{mm})	74
4.1.2	Presse à cisaillement giratoire (pcg)	75
4.1.2.1	Enrobé de surface : ESG-10	75
4.1.2.2	Enrobé de base : GB-20	77
4.2	Essais thermomécaniques	80
4.2.1	Orniérage	80
4.2.1.1	Enrobé de surface : ESG-10	80
4.2.1.2	Enrobé de base : GB-20	83
4.2.2	Retrait thermique empêché (TSRST)	86
4.2.2.1	Traitement des résultats des essais jugés non conformes.	87
4.2.2.2	Enrobé de surface : ESG-10	89
4.2.2.3	Enrobé de base : GB-20	93
4.2.3	Modules complexes	97
4.2.3.1	Enrobé de surface : ESG-10	97
4.2.3.2	Enrobé de base : GB-20	101
4.3	Essais de durabilité	104
4.3.1	Tenue à l'eau	104
4.3.1.1	Enrobé de surface : ESG-10	105
4.3.1.2	Enrobé de base : GB-20	108
CHAPITRE 5	ANALYSE DES RÉSULTATS	113
5.1	Essais de formulation	113
5.1.1	Densité maximale du mélange	113

	5.1.1.1	Enrobé de surface : ESG-10.....	114
	5.1.1.2	Enrobé de base : GB-20.....	115
5.1.2		Presse à cisaillement giratoire (pcg).....	115
	5.1.2.1	Enrobé de surface : ESG-10.....	116
	5.1.2.2	Enrobé de base : GB-20.....	117
5.2		Essais thermomécaniques.....	118
	5.2.1	Orniérage.....	118
	5.2.1.1	Enrobé de surface : ESG-10.....	119
	5.2.1.2	Enrobé de base : GB-20.....	121
	5.2.2	Retrait thermique empêché.....	123
	5.2.2.1	Enrobé de surface : ESG-10.....	125
	5.2.2.2	Enrobé de base : GB-20.....	130
	5.2.3	Modules complexes.....	135
	5.2.3.1	Analyse selon le module vitreux (E_{∞}).....	136
	5.2.3.2	Analyse des courbes maîtresses.....	139
	5.2.3.3	Analyse selon la représentation de l'écart des modules complexes dans un domaine fréquentiel équivalent f_e ($f_e = a_T \cdot f_r$).....	141
5.3		Essais de durabilité.....	149
	5.3.1	Tenue à l'eau.....	149
	5.3.1.1	Enrobé de surface : ESG-10.....	149
	5.3.1.2	Enrobé de base : GB-20.....	150
		CONCLUSION.....	153
ANNEXE I		FORMULATION DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE DE TYPE ESG-10.....	157
ANNEXE II		FORMULATION DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE DE TYPE GB-20.....	161
ANNEXE III		FORMULATION DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE DE TYPE ESG-10 AVEC PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTFABRICATION.....	165
ANNEXE IV		FORMULATION DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE DE TYPE ESG-10 AVEC PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION.....	169
ANNEXE V		ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME DE GRADE PG64-34 UTILISÉ POUR LA CONFECTION DES DIFFÉRENTS ENROBÉS BITUMINEUX.....	173
ANNEXE VI		COMPOSITION MASSIQUE POUR LES ENROBÉS DE SURFACE DE TYPE ESG-10 AVEC PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION.....	177

ANNEXE VII	COMPOSITION MASSIQUE POUR LES ENROBÉS DE BASE DE TYPE GB-20 AVEC PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION.....	179
ANNEXE VIII	NORME ASTM D225-86	181
ANNEXE IX	NORME ASTM D3462-87	187
ANNEXE X	NORME AASHTO TP10-93	195
ANNEXE XI	NORME 4101 – BITUMES.....	211
ANNEXE XII	NORME 4202 – ENROBÉS À CHAUD FORMULÉS SELON LA MÉTHODE DE FORMULATION DU LABORATOIRE DES CHAUSSÉES	221
ANNEXE XIII	MÉTHODE D'ESSAI LC 26-001 – TENUE À L'EAU (PAR TREMPAGE).....	237
ANNEXE XIV	MÉTHODE D'ESSAI LC 26-003 – DÉTERMINATION DE L'APTITUDE AU COMPACTAGE DES ENROBÉS À CHAUD À LA PRESSE À CISAILLEMENT GIRATOIRE.....	243
ANNEXE XV	MÉTHODE D'ESSAI LC 26-020 – PRÉPARATION D'ÉPROUVETTES POUR LA MÉTHODE MARSHALL	257
ANNEXE XVI	MÉTHODE D'ESSAI LC 26-040 – DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ BRUTE ET DE LA MASSE VOLUMIQUE DES ENROBÉS À CHAUD COMPACTÉS	271
ANNEXE XVII	MÉTHODE D'ESSAI LC 26-045 – DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ MAXIMALE	281
ANNEXE XVIII	MÉTHODE D'ESSAI LC 26-060 – MÉTHODE MARSHALL DE DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE À LA DÉFORMATION D'ÉPROUVETTES	303
ANNEXE XIX	MÉTHODE D'ESSAI LC 26-400 – FABRICATION D'ÉPROUVETTES AU COMPACTEUR LCPC	315
ANNEXE XX	MÉTHODE D'ESSAI LC 26-410 – RÉSISTANCE À LA DÉFORMATION DES ENROBÉS À L'ESSAI D'ORNIÉRAGE.....	333
ANNEXE XXI	PROCÉDURE POUR CALIBRER LE MODÈLE 2S2P1D LORS DE L'ANALYSE D'UN ESSAI DE MODULE COMPLEXE (TIRÉE DE MEUNIER, 2012).....	345

ANNEXE XXII	NOTE TECHNIQUE ENROBÉ AVEC GBR ET/OU DES BPF : DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ BRUTE DES GRANULATS, MODE OPÉRATOIRE À UTILISER LORS DES MALAXAGES EN LABORATOIRE ET CHEVAUCHEMENT DES CLASSES GRANULAIRES.....	347
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		353

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Composition massique des matériaux de toiture récupérés	11
Tableau 1.2 Dosages proposés par le MTQ pour l'incorporation des particules de bardeaux de postfabrication dans les enrobés de surface.....	13
Tableau 2.1 Exigences de la méthode LC pour le pourcentage de vides interstitiels à obtenir lors de l'essai de la pcg	22
Tableau 2.2 Paramètres de fonctionnement de l'orniéreur MLPC	24
Tableau 2.3 Critères d'acceptation à l'essai à l'orniéreur dépendamment du type d'enrobé bitumineux à l'étude.....	26
Tableau 3.1 Codification des différents enrobés réalisés.....	36
Tableau 3.2 Distribution du bitume pour les différents enrobés de surface pour un dosage de 3 % de particules dont la teneur en bitume est de 20 %.....	38
Tableau 3.3 Caractéristiques des enrobés de surface de type ESG-10	40
Tableau 3.4 Granulométrie du combiné granulométrique des différents enrobés de surface (ESG-10).....	41
Tableau 3.5 Distribution du bitume pour les différents enrobés de base pour un dosage de 5 % de particules dont la teneur en bitume est de 20 %.....	42
Tableau 3.6 Caractéristiques des enrobés de base de type GB-20.....	44
Tableau 3.7 Granulométrie du combiné granulométrique des différents enrobés de base (GB-20)	45
Tableau 3.8 Caractéristiques principales du bitume PG 64-34.....	46
Tableau 3.9 Caractéristiques du manufacturier des différents granulats utilisés	48
Tableau 3.10 Principales caractéristiques des particules de bardeau d'asphalte d'après le manufacturier.....	52
Tableau 3.11 Température et équipement utilisé pour le chauffage des matériaux.....	54
Tableau 3.12 Propriétés physiques des éprouvettes pour les essais de retrait thermique empêché (TSRST) pour les enrobés de surface (ESG-10).....	66

Tableau 3.13	Propriétés physiques des éprouvettes pour les essais de retrait thermique empêché (TSRST) pour les enrobés de base (GB-20)	67
Tableau 3.14	Propriétés physiques des éprouvettes pour les essais de module complexe pour les enrobés de surface (ESG-10)	68
Tableau 3.15	Propriétés physiques des éprouvettes pour les essais de module complexe pour les enrobés de base (GB-20)	69
Tableau 3.16	Propriétés physiques des éprouvettes pour l'essai de la tenue à l'eau pour les enrobés de surface (ESG-10) provenant des éprouvettes de module complexe et de la presse à cisaillement giratoire	70
Tableau 3.18	Propriétés des éprouvettes pour l'essai de la tenue à l'eau pour les enrobés de base (GB-20) provenant des éprouvettes de module complexe et de la presse à cisaillement giratoire	71
Tableau 4.1	Résultats des différents enrobés pour la densité du mélange maximale	74
Tableau 4.2	Résultats obtenus à la pcg pour les différents enrobés de surface (ESG-10)	76
Tableau 4.3	Résultats obtenus à la pcg pour les différents enrobés de base (GB-20)	78
Tableau 4.4	Résultats du pourcentage d'ornières pour les différents enrobés de surface (ESG-10)	81
Tableau 4.5	Résultats du pourcentage d'ornières pour les différents enrobés de base (GB-20)	84
Tableau 4.6	Résultats obtenus à l'essai de TSRST pour les enrobés de surface (ESG-10)	90
Tableau 4.7	Résultats obtenus à l'essai de TSRST pour les enrobés de base (GB-20)	94
Tableau 4.8	Paramètres du modèle de 2S2P1D obtenus pour les enrobés de surface (ESG-10)	98
Tableau 4.9	Paramètres du modèle de 2S2P1D obtenus pour les enrobés de base (GB-20)	101
Tableau 4.10	Résultats de la tenue à l'eau pour les enrobés de surface (ESG-10)	106
Tableau 4.11	Résultats de la tenue à l'eau pour les enrobés de base (GB-20)	109
Tableau 5.1	Résultats de contrainte de rupture optimale obtenue pour toutes les éprouvettes de ESG-10 analysées	126

Tableau 5.2	Résultats de contrainte de rupture optimale obtenue pour toutes les éprouvettes de GB-20 analysées	131
Tableau 5.3	Résultats des modules vitreux des enrobés de surface de type ESG-10 et des enrobés de base de type GB-20 analysés	136
Tableau C.1	Mobilisation maximale à considérer pour les enrobés de surface (ESG-10) et les enrobés de base (GB-20) dépendamment des résultats des différents essais	154

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Répartition du tonnage de chacun des types d'enrobés bitumineux posé par le MTQ en 2009	4
Figure 1.2 Composition massique des bardeaux d'asphalte de postfabrication	7
Figure 1.3 Identification et emplacement des différents granulats sur un bardeau	8
Figure 1.4 Composition massique des bardeaux d'asphalte de postconsommation	10
Figure 2.1 Organigramme illustrant l'ensemble du programme de recherche pour les enrobés de surface (ESG-10).....	19
Figure 2.2 Organigramme illustrant l'ensemble du programme de recherche pour les enrobés de base (GB-20).....	20
Figure 2.3 Ornièreur MLPC	23
Figure 2.4 Localisation des points de mesure à la suite de chacun des cycles de contrôle .	25
Figure 2.5 Exemple de l'évolution du pourcentage d'ornières durant l'essai avec : a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques	25
Figure 2.6 Localisation des extensomètres sur une éprouvette pour l'essai de retrait thermique empêché (TSRST).....	27
Figure 2.7 Graphique obtenu suite à l'analyse des résultats d'un essai de TSRST	28
Figure 2.8 Résultats obtenus suite à un essai de module complexe sur un enrobé bitumineux.....	30
Figure 2.9 Représentation du modèle 2S2P1D.....	31
Figure 2.10 Presse Marshall	33
Figure 3.1 Composition massique pour l'enrobé de surface de référence (ESG10-B0)	39
Figure 3.2 Composition massique pour l'enrobé de base de référence (GB20-B0)	43
Figure 3.3 Photos des différents granulats utilisés	47
Figure 3.4 Courbes granulométriques des différents granulats utilisés	49

Figure 3.5	Particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation	50
Figure 3.6	Bardeaux usés.....	51
Figure 3.7	Concasseur pour effectuer le déchiquetage des bardeaux	51
Figure 3.8	Courbes granulométriques du granulat 0-5 mm comparativement aux particules de bardeaux d'asphalte	53
Figure 3.9	Malaxeur.....	55
Figure 3.10	Étuve.....	55
Figure 3.11	Compacteur de plaques MLPC	56
Figure 3.12	Photo illustrant le positionnement et les dimensions des plaques dans le compacteur pour une plaque d'enrobé de surface (GB-20)	57
Figure 3.13	Carotteuse.....	58
Figure 3.14	Plan de carottage des éprouvettes pour les essais de retrait thermique empêché et de module complexe	59
Figure 3.15	Photos de la rectifieuse utilisée pour procéder au resurfaçage des éprouvettes	60
Figure 3.16	Photo du vernier sur pied utilisé pour la mesure de la largeur des éprouvettes	60
Figure 3.17	Système de codification des éprouvettes.....	61
Figure 3.18	Photo illustrant le mode d'entreposage sur lit de sable.....	61
Figure 3.19	Photo démontrant la salle pour l'entreposage des éprouvettes	61
Figure 3.20	Photos du banc de collage utilisé pour assurer un alignement parfait lors de la mise en place de l'éprouvette	62
Figure 3.21	Presse hydraulique utilisée pour les essais thermomécaniques avec une éprouvette mise en place lors d'un essai de module complexe.....	63
Figure 3.22	Transformation des éprouvettes ayant servi à un essai de module complexe en éprouvettes pour réaliser l'essai de la tenue à l'eau	64
Figure 3.23	Transformation de la brique pcg d'un enrobé en deux éprouvettes pour l'essai de la tenue à l'eau.....	65

Figure 4.1	Comparatif des résultats à la pcg des enrobés de surface ESG10-B0 et ESG10-B3-0 (bitume d'ajout de 5,65 %).....	77
Figure 4.2	Comparatif des résultats à la pcg des enrobés de base GB20-B0 et GB20-B5-0 (bitume d'ajout de 4,77 %).....	79
Figure 4.3	Évolution du pourcentage d'ornières pour les enrobés de surface selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%) avec : a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques.....	82
Figure 4.4	Comparaison de l'évolution du pourcentage d'ornières durant l'essai pour les enrobés de surface ESG10-B0 et ESG10-B3-0 (bitume d'ajout de 5,65 %) avec : a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques	83
Figure 4.5	Évolution du pourcentage d'ornières pour les enrobés de base selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%) avec : a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques.....	85
Figure 4.6	Comparaison de l'évolution du pourcentage d'ornières durant l'essai pour les enrobés de base GB20-B0 et GB20-B5-0 (bitume d'ajout de 4,77 %) avec : a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques	86
Figure 4.7	Exemple d'un enrobé (ESG10-B3-60) ayant une éprouvette présentant des résultats aberrants et requérant que celle-ci soit tronquée.....	88
Figure 4.8	Évolution de la contrainte d'après la température pour les valeurs moyennes obtenues à l'essai de TSRST (taux de gel fixé à 10°C/h) des enrobés de surface ESG-10 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)	91
Figure 4.9	Comparaison entre l'enrobé de référence (ESG10-B0) et celui incorporant 3 % de particules de bardeaux (ESG10-B3-0) sur l'évolution de la contrainte d'après la température pour les valeurs obtenues au TSRST (bitume d'ajout de 5,65 %; taux de gel de 10°C/h).....	92
Figure 4.10	Évolution de la contrainte d'après la température pour les valeurs moyennes obtenues à l'essai de TSRST (taux de gel fixé à 10°C/h) des enrobés de base GB-20 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)	95
Figure 4.11	Comparaison entre l'enrobé de référence (GB20-B0) et celui incorporant 5 % de particules de bardeaux (GB20-B5-0) sur l'évolution de la contrainte d'après la température pour les valeurs obtenues au TSRST (bitume d'ajout de 4,77 %; taux de gel de 10°C/h).....	96
Figure 4.12	Présentation des résultats de module complexe dans le plan Cole-Cole pour les enrobés de surface (ESG-10) selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)	99

Figure 4.13	Comparaison des résultats de module complexe dans le plan Cole-Cole pour les enrobés ESG10-B0 et ESG10-B3-0 (bitume d'ajout de 5,65 %)	100
Figure 4.14	Présentation des résultats de module complexe dans le plan Cole-Cole pour les enrobés de base (GB-20) selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)	102
Figure 4.15	Comparaison des résultats de module complexe dans le plan Cole-Cole pour les enrobés GB20-B0 et GB20-B5-0 (bitume d'ajout de 4,77%)	103
Figure 4.16	Résultats obtenus pour la perte de stabilité pour les enrobés de surface de type ESG-10 avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : différence entre les éprouvettes provenant des briquettes de la pcg et de celles testées au E*	107
Figure 4.17	Résultats obtenus pour la tenue à l'eau pour les enrobés de surface de type ESG-10 avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : différence entre les éprouvettes provenant des briquettes de la pcg et de celles testées au E*	107
Figure 4.18	Résultats obtenus pour la perte de stabilité pour les enrobés de base de type GB-20 avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : différence entre les éprouvettes provenant des briquettes de la pcg et de celles testées au E*	110
Figure 4.19	Résultats obtenus pour la tenue à l'eau pour les enrobés de base de type GB-20 avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : différence entre les éprouvettes provenant des briquettes de la pcg et de celles testées au E*	111
Figure 5.1	Relation entre la densité maximale du mélange (dmm) et la teneur en bitume d'ajout pour les différents enrobés bitumineux confectionnés en laboratoire avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : a) les enrobés de surface (ESG-10) et b) les enrobés de base (GB-20)	114
Figure 5.2	Résultats obtenus à la pcg pour les enrobés de surface (ESG-10) incorporant 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation	116
Figure 5.3	Résultats obtenus à la pcg pour les enrobés de base (GB-20) incorporant 5 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation	117
Figure 5.4	Évolution du pourcentage d'ornières durant l'essai à l'orniéreur pour : a) les enrobés de surface de type ESG-10 et b) les enrobés de base de type GB-20 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)	119
Figure 5.5	Résultats à l'orniéreur à 1 000, 3 000 et 30 000 cycles pour les différents enrobés de surface ESG-10	121

Figure 5.6	Résultats à l'ornièreur à 1 000, 3 000 et 30 000 cycles pour les différents enrobés de base GB-20.....	123
Figure 5.7	Évolution de la contrainte avec la diminution de la température pour les valeurs moyennes obtenues à l'essai de TSRST (taux de gel de 10 °C/h) : a) les enrobés de surface de type ESG-10 et b) les enrobés de base de type GB-20 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)	124
Figure 5.8	Évolution de la contrainte d'un enrobé bitumineux dépendamment de la température.....	125
Figure 5.9	Relation entre la température de rupture moyenne obtenue à l'essai de TSRST et la teneur en bitume d'ajout pour les enrobés de surface de type ESG-10 (taux de gel de 10 °C/h).....	127
Figure 5.10	Contraintes moyennes de rupture mesurées (σ_u) et effectives (σ_0) obtenues des essais de TSRST sur les enrobés de surface ESG-10 (taux de gel de 10 °C/h)	129
Figure 5.11	Température de rupture moyenne obtenue à l'essai de TSRST pour les enrobés de base de type GB-20 (taux de gel de 10 °C/h).....	132
Figure 5.12	Contraintes moyennes de rupture mesurées (σ_u) et effectives (σ_0) obtenues des essais de TSRST sur les enrobés de base GB-20 (taux de gel de 10 °C/h)..	133
Figure 5.13	Présentation dans le plan Cole-Cole des résultats de module complexe pour : a) les enrobés de surface de type ESG-10 et b) les enrobés de base de type GB-20 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)	135
Figure 5.14	Présentation des résultats du module vitreux (E_∞) des différents enrobés de surface de type ESG-10.....	137
Figure 5.15	Présentation des résultats du module vitreux (E_∞) des différents enrobés de base de type GB-20	138
Figure 5.16	Courbes maîtresses à 10 °C calculées à partir de 2S2P1D pour les différents enrobés de surface de type ESG-10 testés dans le cadre de ce programme expérimental	140
Figure 5.17	Courbes maîtresses à 10 °C calculées à partir de 2S2P1D pour les différents enrobés de base de type GB-20 testés dans le cadre de ce programme expérimental	140
Figure 5.18	Évolution du coefficient d'écart des modules complexes dans le domaine de fréquence équivalente pour les enrobés de surface (ESG-10).....	144

Figure 5.19	Évolution l'angle de phase du coefficient d'écart des modules complexes dans le domaine de fréquence équivalente pour les enrobés de surface (ESG-10)	145
Figure 5.20	Évolution du coefficient d'écart des modules complexes dans le domaine de fréquence équivalente pour les enrobés de base (GB-20)	146
Figure 5.21	Évolution l'angle de phase du coefficient d'écart des modules complexes dans le domaine de fréquence équivalente pour les enrobés de base (GB-20) ..	148
Figure 5.22	Résultats obtenus pour la tenue à l'eau avec la différence entre les éprouvettes provenant des briquettes de la pcg et des éprouvettes testées au E^* pour : a) les enrobés de surface de type ESG-10 et b) les enrobés de base de type GB-20	149
Figure 5.23	Tenue à l'eau obtenue pour les différents enrobés de surface (ESG-10)	150
Figure 5.24	Tenue à l'eau obtenue pour les différents enrobés de base (GB-20)	151

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2S2P1D	Combinaison de deux ressorts, deux patins et un amortisseur
3RMCDQ	Regroupement des récupérateurs et des recycleurs de matériaux de construction et de démolition du Québec
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
Abs	Absorption
ASTM	American Society for Testing and Materials
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
C.V.	Coefficient de variation
Dépl.	Déplacement
DJMA	Débit journalier moyen annuel
EC	Enrobé de correction
Éch.	Échantillon
EG	Enrobé grenu
EGA	Enrobé grenu avec amiante
EGM	Enrobé grenu mince
ENTPE	École Nationale des Travaux Publics de l'État
ESG	Enrobé semi-grenu
ÉTS	École de technologie supérieure
GB	Grave bitume
GNM	Grosseur nominale maximale
LA	Los Angeles
LC	Laboratoire des Chaussées

LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
M.	Monsieur
Max	Maximum
MD	Micro-Deval
MLPC	Matériel du Laboratoire des Ponts et Chaussées
MM.	Messieurs
Moy.	Moyenne
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MTS	Materials Testing Solutions
PETT	Principe d'Équivalence Temps Température
pcg	Presse à cisaillement giratoire
PG	Grade de performance d'un bitume (<i>Performance Grade</i>)
s. o.	Sans objet
TSRST	Test de retrait thermique empêché (<i>Thermal Stress Restrained Speciment Test</i>)
WLF	Loi de Williams-Landel-Ferry

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
°	Degré
°C	Degré Celsius
Ø	Diamètre
\bar{X}	Moyenne
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_0	Contrainte de rupture effective
σ_u	Contrainte de rupture mesurée
τ_E	Temps de relaxation
ω	Fréquence
a_{T-Fr}	Fréquence équivalente
A_0	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 d'enrobé bitumineux avec trempage
b%	Pourcentage de bitume

XXX

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_{mm}	Densité maximale du mélange
d_{mb}	Densité brute de l'enrobé
CCM*	Coefficient Complexe de Mobilisation
$ CCM^* $	Norme du Coefficient Complexe de Mobilisation
E^*	Module Complexe
$ E^* $	Norme du Module Complexe
E_∞	Module vitreux
E_0	Module instantané du module complexe
E_1	Composante élastique
E_2	Composante visqueuse
Fr	Fréquence
g	Gramme
h	Exposant pour l'analyse des modules complexes
hz	Hertz
i	Nombre complexe
k	Exposant pour l'analyse des modules complexes
kg	Kilogramme

km	Kilomètre
kPa	Kilopascal
kN	Kilonewton
L	Litre
min	minute
mm	Millimètre
mPa*s	Millipascal seconde
MPa	Mégapascal
N	Newton
N	Nombre de girations
Pa	Pascal
P _{ba}	Pourcentage de bitume absorbé
s	Écart-type
S ₀	Module de rigidité
ST	Stabilité des éprouvettes d'enrobé sans trempage
T°	Température
T _b	Température basse de caractérisation
T _e	Température élevée de caractérisation
T _g	Température de transition vitreuse
V _{be}	Volume de bitume effectif
V _i	Volume des vides

INTRODUCTION

Présentement au Québec, annuellement, plus de 200 000 tonnes de bardeaux d'asphalte usés sont envoyées dans des sites d'enfouissement de matériaux secs (Noël *et al.*, 2006). Vivant à l'ère du développement durable, de la réutilisation et du recyclage, il est évident que de trouver une solution pour réduire cette quantité serait bénéfique pour la société. C'est dans cette optique qu'un projet a été mis de l'avant par le Regroupement des Récupérateurs et des Recycleurs de Matériaux de Construction et de Démolition du Québec (3R MCDQ) et par RECYC-QUÉBEC et réalisé par le Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure (ÉTS). Le projet consiste à déchiqueter en fines particules les bardeaux d'asphalte de postconsommation et de les incorporer dans un enrobé bitumineux. Ainsi, une deuxième vie serait offerte à ces matériaux usés tout en permettant une possible réduction de la quantité de bitume d'ajout à intégrer dans l'enrobé bitumineux étant donné que du bitume est également présent dans les bardeaux d'asphalte. Cette réduction serait positive pour le fabricant d'enrobés bitumineux ainsi que pour l'environnement puisque le bitume qui est incorporé dans les enrobés bitumineux est un matériau non renouvelable et très coûteux pour le producteur (Bitume Québec, 2011). Toutefois, il reste à déterminer si l'ajout de ces particules de bardeaux d'asphalte dans les enrobés bitumineux occasionnerait des pertes de performance de l'enrobé.

Dans l'intention de répondre à cette interrogation, des études ont été réalisées au LCMB sur deux différents types d'enrobés bitumineux couramment utilisés au Québec; un enrobé de surface de type ESG-10 et un enrobé de base de type GB-20. Dans les deux cas, des enrobés bitumineux incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation avec des teneurs en bitume variables ont été confectionnés en laboratoire. Puis sur chacun de ces enrobés, les essais suivants ont été réalisés afin d'en connaître leurs performances; densité maximale, aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire, résistance à l'orniérage, résistance à la fissuration thermique, détermination du module complexe et performance à la tenue à l'eau. Suite à la réalisation de ces essais et à l'analyse des résultats obtenus, il a été possible de tirer des relations entre l'ajout de particules de bardeaux

d'asphalte de postconsommation et la quantité de bitume d'ajout à intégrer dans l'enrobé pour obtenir des performances répondant aux exigences des donneurs d'ouvrage au Québec concernant les enrobés de type ESG-10 et GB-20. Avant la présentation et l'analyse des résultats, une revue de la littérature sur le sujet, le programme de recherche, la présentation des enrobés et la description détaillée des essais sont élaborés.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce présent chapitre traite de la documentation et de l'information disponible à ce jour sur les enrobés bitumineux, principalement ceux incorporant des particules de bardeaux d'asphalte. En procédant à une revue de la littérature détaillée, il sera donc possible de cerner plus facilement le but et les objectifs de cette recherche portant sur l'incorporation des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux. Ce chapitre traitera donc successivement des éléments suivants; les enrobés bitumineux, les bardeaux d'asphalte, l'historique québécois des enrobés bitumineux avec bardeaux d'asphalte et finalement la méthode de formulation LC utilisée présentement par le ministère des Transports du Québec.

1.1 Introduction aux enrobés bitumineux

Au Québec, le réseau routier est majoritairement revêtu d'enrobé bitumineux. Le ministère des Transports du Québec (MTQ) est responsable de plus de 30 000 km de routes et près de 97 % de celles-ci sont recouvertes d'enrobés bitumineux (MTQ, 2011).

Dans son guide décrivant la méthode de formulation employée au MTQ (2005), on décrit l'enrobé bitumineux comme étant un matériau constitué de granulats de dimensions différentes, allant habituellement de 0,080 à 28 mm de diamètre, composant le squelette granulaire. Ces granulats sont retenus entre eux par du bitume, d'où provient le terme enrobé bitumineux. Toujours d'après ce guide, afin que le mélange soit uniforme, les granulats et le bitume doivent être chauffés afin de les amener à une température appropriée qui varie selon le type de bitume utilisé dans la composition de l'enrobé. Une fois que la température désirée est atteinte pour l'ensemble des éléments, ceux-ci peuvent être mélangés par proportion préalablement déterminée afin de former l'enrobé bitumineux désiré (MTQ, 2005).

Il existe plusieurs types d'enrobé bitumineux et chacun d'eux a un usage bien précis. D'un type à l'autre, les éléments suivants peuvent varier (MTQ, 2005) :

- la granulométrie;
- la classe de bitume;
- la proportion de granulats et de bitume.

Au ministère des Transports du Québec, selon Boutin (2010) on utilise plus d'une dizaine de types d'enrobés différents. (*Voir Figure 1.1*)

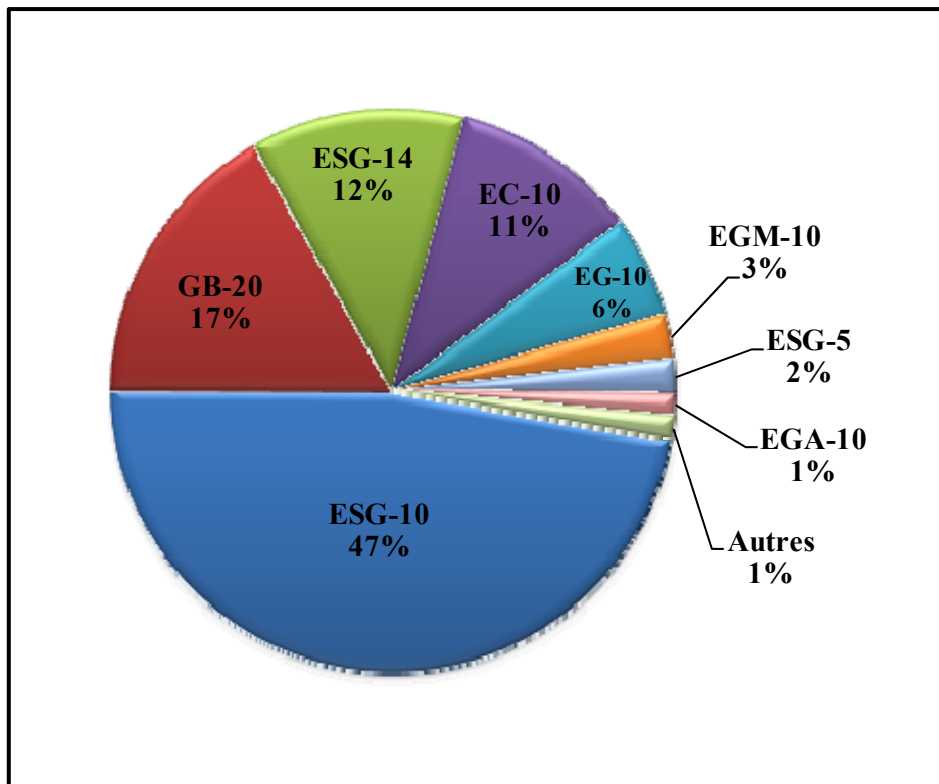


Figure 1.1 Répartition du tonnage de chacun des types d'enrobés bitumineux posé par le MTQ en 2009
Adaptée de Boutin (2010, p. 26)

Dans le cadre de cette étude, ce sont principalement l'enrobé de surface de type ESG-10 et l'enrobé de base de type GB-20 qui seront étudiés. Ces deux types d'enrobés seront élaborés dans les sous-sections suivantes.

1.1.1 L'enrobé de surface de type ESG-10

L'enrobé de surface de type ESG-10 est l'enrobé le plus couramment utilisé par le ministère des Transports du Québec. Selon la Direction du laboratoire des chaussées (2000), le terme ESG-10 signifie; enrobé semi-grenu avec des granulats de dimension nominale maximale (GNM) de 10 mm. Celui-ci est dense et sa courbe granulométrique se trouve sous la courbe de masse volumique maximale. Cette caractéristique offre une surface grenue, donc fortement imperméable. Pour ce type d'enrobé bitumineux, toutes les classes de bitume peuvent être utilisées. L'enrobé de surface de type ESG-10 peut être utilisé comme couche de roulement sur tous les types de routes (Direction du laboratoire des chaussées, 2000).

1.1.2 L'enrobé de base de type GB-20

L'enrobé de classe GB-20 reste quant à lui le choix le plus priorisé lorsque vient le temps de choisir un enrobé de base au MTQ (Paradis, 2008). D'après (MTQ, 2005), le terme GB-20 signifie; grave-bitume avec des granulats de dimension nominale maximale de 20 mm. Lors de la mise en œuvre, cet enrobé peut être mis en couche unique ou en plusieurs couches, variant individuellement de 60 à 150 mm d'épaisseur. Lorsqu'il est utilisé, il est recouvert d'enrobé intermédiaire et/ou d'enrobé de surface (MTQ, 2005).

1.2 Les bardeaux d'asphalte

De nos jours, connaissant la situation écologique qui survient dans le monde, il est important d'être conscientisé par rapport au recyclage et à la réutilisation. Selon le site internet de Toits de rêve (2008), près de 80 % des résidences québécoises possèdent une toiture recouverte de bardeaux d'asphalte. Toujours selon ce site, la durée de vie moyenne de ces matériaux est de 20 à 30 ans. Ces données expliquent donc pourquoi qu'au Québec, annuellement, près de 200 000 tonnes de bardeaux d'asphalte sont retirées des toitures et acheminées dans des sites d'enfouissement de matériaux secs (Noël *et al.*, 2006). Une situation envisagée afin de réduire cette grande quantité serait d'incorporer des particules de bardeaux d'asphalte dans les enrobés bitumineux.

À ce jour, le MTQ, suite à diverses études, approuve l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication dans la composition de certains enrobés bitumineux du réseau routier de la province (Paradis, 2008). Les bardeaux d'asphalte de postfabrication sont les rejets d'usine ou encore les rebus amassés lors de la fabrication de ce matériau. Afin de mieux cerner la composition de ces matériaux et de leurs différences, voici des informations relatives à chacun d'eux; les bardeaux d'asphalte de postfabrication et de postconsommation.

1.2.1 Les bardeaux d'asphalte de postfabrication

Au Québec, depuis quelques années, plusieurs études ont été réalisées afin d'approuver l'utilisation des particules de bardeaux d'asphalte dans les enrobés bitumineux. La grande majorité de ces recherches portaient sur les particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication. Ce sont majoritairement des retailles prises lors de la production de ce matériau de recouvrement de toiture ou encore des bardeaux ne répondant pas aux normes de qualité (Noël *et al.*, 2006).

Sur le marché, nous retrouvons des bardeaux d'asphalte de différentes formes, de différentes qualités, de différentes couleurs et de différents prix. Selon Noël *et al.* (2006), en Amérique du Nord, il existe essentiellement deux types de bardeaux et chacun de ces types doit répondre à une norme de fabrication :

- les bardeaux construits avec des fibres organiques (ASTM D225-86, *Voir Annexe VIII*);
- les bardeaux construits avec des fibres de verre (ASTM D3462-87, *Voir Annexe IX*).

Selon Baaj *et al.* (2004), tous les bardeaux d'asphalte, peu importe le type de fibre utilisé, ont sensiblement la même composition. Celle-ci est démontrée à la Figure 1.2.

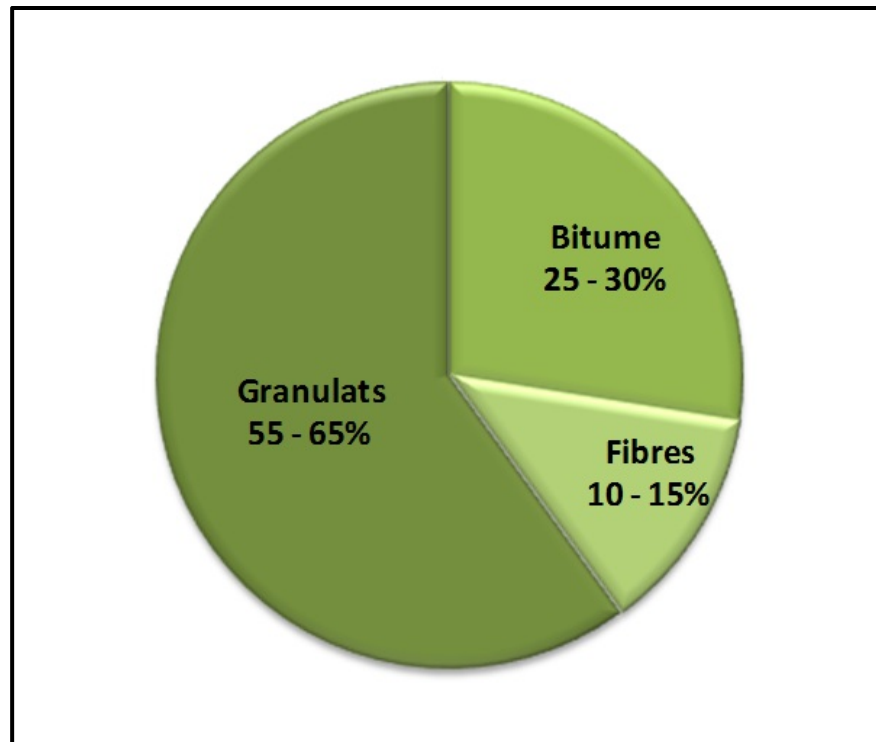


Figure 1.2 Composition massique des bardeaux d'asphalte de postfabrication
Adaptée de Baaj *et al.* (2010)

1.2.1.1 Composition des bardeaux; les granulats

Les granulats sont la composante majeure d'un bardeau d'asphalte. Dans la composition d'un bardeau, on retrouve différents types de granulats ayant chacun leur propre utilité. On peut retrouver des particules de céramique, des scories de charbon concassées, du sable et du stabilisateur de bitume (Noël *et al.*, 2006). L'emplacement sur le bardeau de ces différents granulats peut être observé à la Figure 1.3.



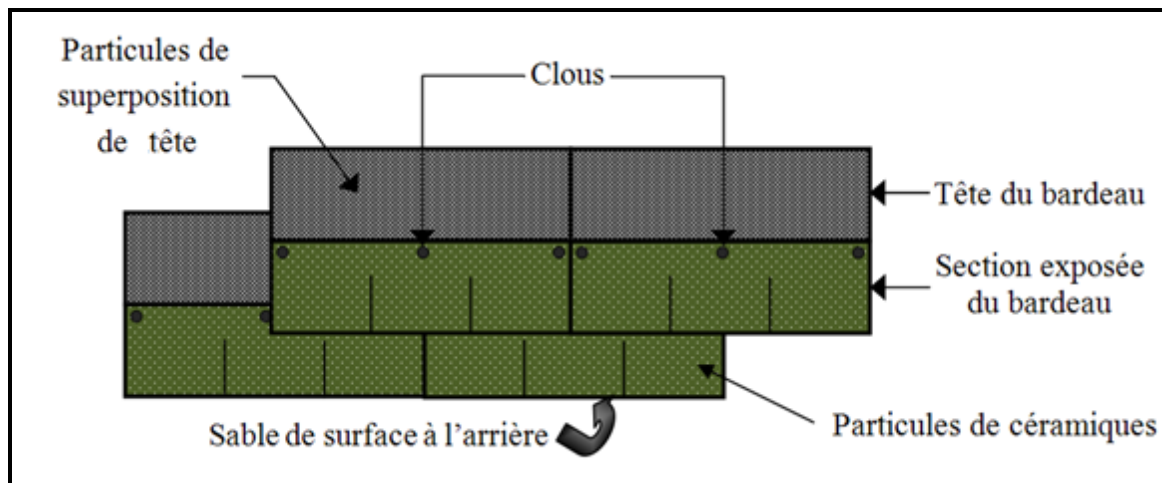


Figure 1.3 Identification et emplacement des différents granulats sur un bardeau
Tirée de Noël *et al.* (2006, p. 22)

D'après Noël *et al.* (2006), les particules de céramiques qui sont en réalité de la roche concassée recouverte de céramique sont les particules qui seront exposées sur la toiture. La couleur de ces particules est variable d'un échantillon à l'autre afin d'offrir une diversité de couleurs au client. Des scories de charbon concassées sont également présentes dans la composition d'un bardeau. Ceux-ci sont employés comme particules de superposition de tête. Cette section sera chevauchée par la rangée supérieure de bardeau et ainsi, non apparente une fois mise en place sur la toiture. Un bardeau est composé à faible quantité de sable naturel lavé. Celui-ci est ajouté sur la surface arrière de tous les bardeaux afin d'éviter que les bardeaux collent l'un à l'autre lors de l'emballage et de l'entreposage. Le dernier granulat présent dans la composition du bardeau est le stabilisateur de bitume qui, selon Germain et Charland (2000), est une poudre de calcaire.

1.2.1.2 Composition des bardeaux; les fibres

Lors de la fabrication de bardeaux d'asphalte, des fibres sont ajoutées à la composition, de l'ordre de 10 à 15 % de la masse totale. Celles-ci sont généralement des fibres de cellulose, mais elles peuvent également être de nature synthétique (polyester ou polypropylène) ou d'amiante (Noël *et al.*, 2006). Peu importe la nature des fibres, elles exercent toutes la même fonction dans le bardeau, c'est-à-dire, de renfort au matériau. Il a été démontré par Peltonen

(1991) que l'absorption de la fibre peu varier d'un type à un autre. Principalement pour les fibres minérales qui ont une absorption beaucoup plus faible que les fibres de cellulose et que les fibres synthétiques. Cette caractéristique devrait donc être tenue en compte si des bardeaux avec fibres minérales étaient utilisés lors de futures recherches. Cependant, selon Grzybowski (2003), les propriétés des fibres restent pratiquement inchangées avec le temps, suite à l'usure du bardeau.

1.2.1.3 Composition des bardeaux; le bitume

Dans la composition des bardeaux de toiture, tout comme dans les enrobés bitumineux, le bitume sert de liant à tous les autres matériaux constituant le bardeau, c'est-à-dire les granulats et les fibres (Noël *et al.*, 2006). De plus, le bitume a aussi comme utilité de rendre le matériau imperméable ce qui est une nécessité pour son utilisation future.

Des recherches ont été menées afin d'obtenir le type de bitume qui était utilisé par les fabricants, mais cette information n'a pas été rendue disponible. D'après une étude de Leclerc et Paradis (2002), le bitume constituant les bardeaux est un matériau excessivement dur et oxydé.

1.2.2 Les bardeaux d'asphalte de postconsommation

Lorsque des bardeaux sont mis en place sur une toiture, ils font face à différentes conditions climatiques telles que la pluie, la neige, le soleil et le vent. Une fois leur vie utile terminée, ces conditions ont modifié la composition du revêtement de toiture (Noël *et al.*, 2006). La composition de ces bardeaux a été déterminée par Grzybowski (2003) une fois ceux-ci retirés des toitures. Cette composition est présentée à la Figure 1.4.

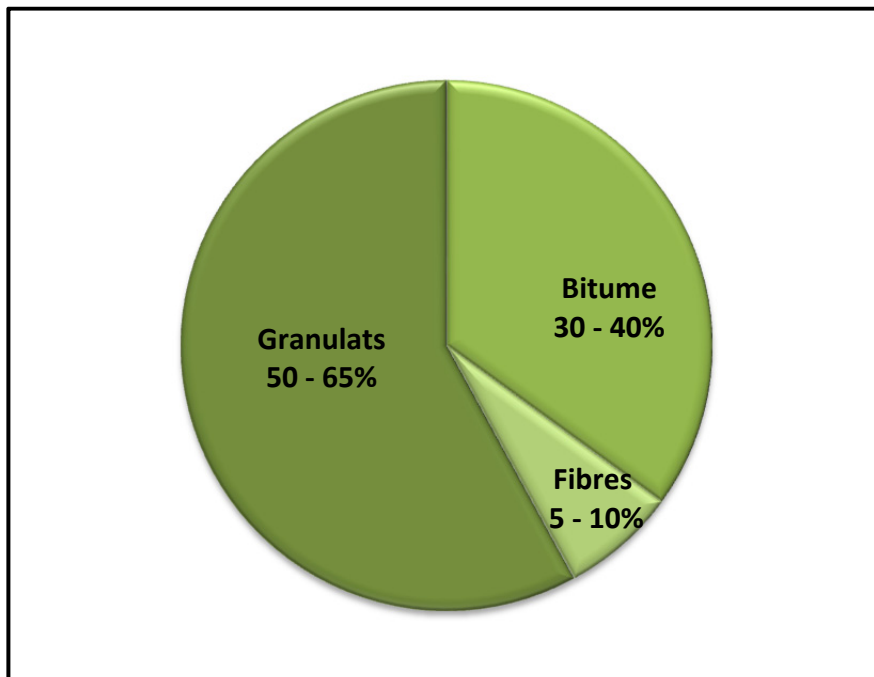


Figure 1.4 Composition massique des bardeaux d'asphalte de postconsommation
Adaptée de Grzybowski (2003)

Comme mentionné précédemment, au fil du temps, en faisant face aux rudes conditions climatiques québécoises, les bardeaux d'asphalte se dégradent. En comparant les compositions massiques des bardeaux avant et après leur vie utile, il est possible de remarquer que le pourcentage de granulats et de fibres a légèrement diminué. Avec le temps, ces matériaux se sont détachés du bardeau faisant en sorte que leur proportion massique a diminué. Ceci a pour cause d'augmenter le pourcentage de bitume présent dans le bardeau étant donné que celui-ci a comme propriété d'être visqueux, donc de rester plus facilement en place.

1.2.2.1 État des bardeaux d'asphalte de postconsommation à la réception

Au moment venu, lorsque les bardeaux d'asphalte sont retirés de la toiture, ils sont acheminés vers un site d'enfouissement de matériaux secs ou dans un centre de tri spécialisé dans le traitement des résidus de construction. Lors de leur enlèvement, divers autres matériaux de construction se mélangent aux bardeaux tels que des clous, du plastique, du

bois, du papier-feutre, etc. (Noël *et al.*, 2006). Une étude a été menée par Ali *et al.* (1995) afin de déterminer la composition des matériaux qui sont récupérés lors de l'enlèvement du revêtement d'une toiture en bardeau. Les pourcentages massiques des différents matériaux récupérés, selon Ali *et al.* (1995), sont démontrés au Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Composition massique des matériaux de toiture récupérés

MATÉRIAUX	POURCENTAGE MASSIQUE (%)
Bardeaux d'asphalte	96,0
Papier-feutre	3,3
Clous	0,5
Finition de métal	0,1
Bande de plastique	0,1

C'est donc dire que d'après cette étude, lors de la récupération des bardeaux usés, on retrouve à l'intérieur de ceux-ci environ 4 % massique de matériaux non désirables. Ils sont appelés matériaux non désirables étant donné que l'on ne souhaite pas de ce genre de matériaux dans la composition future de l'enrobé bitumineux qui sera confectionné avec des particules de bardeaux d'asphalte.

Cependant, il serait envisageable de croire que la façon de faire a changé aux cours des dernières années. Après discussion avec un responsable de la gestion d'un site d'enfouissement de matériaux secs, celui-ci mentionnait que depuis quelques années, lors de la réception de bardeaux usés à son centre, les matériaux sont classés selon leur degré de contamination. Au site d'enfouissement visité, les bardeaux pouvaient se voir attribuer la classe A, B ou C allant du matériau avec très peu de matières non désirables au matériau fortement contaminé. Évidemment, lorsqu'un entrepreneur livrait des bardeaux exempts de matières non désirables, les tarifs étaient beaucoup plus avantageux pour cet entrepreneur. Selon le responsable rencontré à l'été 2010, plusieurs entrepreneurs commençaient à livrer de plus en plus de bardeaux de classe A, donc exempt de matériaux indésirables. En procédant de cette façon, le point négatif relevé par plusieurs concernant les bardeaux d'asphalte de

postconsommation, c'est-à-dire la présence de divers autres matériaux dans la composition des particules de bardeaux, serait pratiquement éliminé. Il ne resterait qu'à poursuivre le processus à grande échelle pour que cette façon de faire soit employée à l'ensemble de la province par les différents entrepreneurs en rénovation de toiture et les divers centres de recyclage de matériaux secs.

1.3 Les enrobés bitumineux incorporant des particules de bardeaux d'asphalte au MTQ

Ces dernières années, le ministère des Transports du Québec a effectué diverses études, dont Boutin (2010) et Paradis (2009), afin de vérifier la faisabilité d'incorporer des particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication et de postconsommation dans les enrobés bitumineux. Le MTQ est intéressé par un tel processus étant donné que l'incorporation de particules recyclées réduirait la quantité de matériaux secs dirigés vers les sites d'enfouissement (Paradis, 2009). De plus, ce processus serait également bénéfique pour le producteur qui verrait la quantité de bitume d'ajout à incorporer à l'enrobé diminué, se traduisant directement par une économie d'argent lors de la production. Dans cette section, il sera traité de l'avancement des recherches du MTQ concernant les enrobés avec particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication et de postconsommation.

1.3.1 Les enrobés bitumineux avec bardeaux d'asphalte de postfabrication

D'après l'étude de Paradis (2009), au Québec, 1 000 000 de tonnes de bardeaux d'asphalte sont produits annuellement. Cette production engendre environ 40 000 tonnes de bardeaux qui sont rejetées provenant des retailles lors de la production en usine ou encore pour des raisons de qualité du matériau qui ne rencontre pas les standards du producteur (couleur, forme, etc.).

Le MTQ a donc mené, en partenariat avec différents collaborateurs, des études afin de valider la faisabilité d'incorporer ce type de bardeaux dans différents enrobés bitumineux. Suite à ces recherches, en 2005, le Ministère a établi des critères pour l'utilisation des

bardeaux de postfabrication dans certains enrobés bitumineux (Paradis, 2009). Les critères, toujours en vigueur en 2012, sont présentés au Tableau 1.2.

Tableau 1.2 Dosages proposés par le MTQ pour l’incorporation des particules de bardeaux de postfabrication dans les enrobés de surface
Tiré de Paradis (2009, p.6)

CRITÈRES	ENROBÉ DE SURFACE	ENROBÉ DE BASE
Dosage en particules de bardeaux autorisé à incorporer dans l’enrobé	$\leq 3,0 \text{ \%}^A$	$\leq 5,0 \text{ \%}^A$
Dimension maximale des particules	$\leq 10 \text{ mm}$	$\leq 10 \text{ mm}$
Ajustement de la teneur en bitume par rapport à la teneur initiale	$\leq 0,24 \text{ \%}^B$	$\leq 0,40 \text{ \%}^C$
Conditions de circulation	DJMA < 10 000 Non autorisé sur les autoroutes	Aucune restriction

^A Pourcentage de la masse totale de l’enrobé

^B Soit 40 % mobilisable pour 20 % de bitume dans les bardeaux : $40 \text{ \%} \times 20 \text{ \%} \times 3 \text{ \%}$

^C Soit 40 % mobilisable pour 20 % de bitume dans les bardeaux : $40 \text{ \%} \times 20 \text{ \%} \times 5 \text{ \%}$

Tel qu’affiché, le MTQ approuve l’utilisation de particules de bardeaux de postfabrication dans les enrobés de surface à dosage maximal de 3 %, alors que dans le cas des enrobés de base le maximum permis est de l’ordre de 5 %. À noter que dans le cas des enrobés de surface, l’utilisation sur autoroute n’est pas permise. Ce tableau a été intégré au Cahier des charges et devis généraux du Québec ainsi qu’à la norme 4202 (*Voir* Annexe XII) traitant des enrobés bitumineux à chaud.

1.3.2 La mobilisation du bitume des bardeaux dans les enrobés bitumineux selon le MTQ

Toujours d’après les études menées par le ministère des Transports et ses collaborateurs (Paradis, 2009), il a été déterminé que lorsque des particules de bardeaux d’asphalte sont incorporées dans la composition d’un enrobé bitumineux, le bitume contenu dans ses particules n’est pas totalement transmissible et utilisable comme liant à l’enrobé.

Effectivement, une partie du bitume des bardeaux reste imbibée dans les granulats et les fibres du bardeau et n'est pas effective pour l'enrobé bitumineux, donc ne se mélange pas au bitume d'ajout. Cependant, des recherches ont démontré qu'une certaine partie du bitume des bardeaux peut être considéré comme futur liant dans l'enrobé, cette proportion est appelée; bitume mobilisable (Paradis, 2009).

Le ministère des Transports du Québec dans son étude a statué que, pour les particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication 40 % du bitume présent dans le bardeau était mobilisable, d'où la présence de cette fraction dans le calcul présenté au Tableau 1.2 (Paradis, 2009). Cette valeur a donc servi de référence pour l'élaboration du programme de recherche présenté ultérieurement.

1.4 La méthode de formulation LC

Par le passé, le Québec a mis au point sa propre méthode de formulation pour les enrobés bitumineux mis en place sur leur territoire. Étant donné la situation géographique et climatique de la province, le MTQ a décidé de mettre sur pied un système répondant à leur propre situation particulière (MTQ, 2005). Effectivement, la province compte près de 8 000 000 d'habitants (Institut de la statistique du Québec, 2011) et possède une superficie de 1 667 441 km² (Institut de la statistique du Québec, 2012). Selon le MTQ (2011), afin de combler ce vaste territoire, plus de 30 000 km de routes sont sous la gestion du ministère des Transports du Québec. De telles statistiques font en sorte que le ratio kilomètres de routes par habitant est l'un des plus élevés au monde (MTQ, 2005). De plus, la variabilité du climat québécois, passant d'un extrême (canicule, environ 35 °C) à un autre (vague de froid, environ -40 °C) (Climat Québec, 2012), complexifie la gestion des routes. C'est donc principalement pour ses raisons que le MTQ a décidé de mettre au point sa propre méthode de formulation. Le guide Enrobés – *Formulation selon la méthode LC* (MTQ, 2005) élabore tous les principes de cette méthode et c'est selon celle-ci que les essais en laboratoire lors de ce programme de recherche ont été réalisés.

La méthode LC a été normalisée en 1997 (Paradis, 2008). Les représentants du MTQ se sont d'abord basés sur ce qui faisait au nord des États-Unis avec la méthode Superpave. Par contre, afin de répondre aux exigences qu'ils s'étaient préalablement fixés, le Laboratoire des Chaussées a décidé de modifier cette méthode en la combinant avec la méthode de Formulation Française mise au point en 1991 (MTQ, 2005). Ces deux méthodes combinées, la méthode de formulation québécoise a vu le jour. Celle-ci impose des teneurs en bitume optimales en fixant le volume de bitume effectif (V_{be}) dépendamment du type d'enrobé bitumineux (MTQ, 2005). En fait, la méthode LC a conservé les meilleurs éléments des deux méthodes. De la méthode de Formulation Française, le MTQ a retenu le concept des classes granulaires ainsi que l'utilisation d'appareil tel que l'orniéreur français, alors que de la méthode Superpave, il a retenu le système de classification des bitumes et les concepts volumétriques.

Pour ce qui est de la formulation en laboratoire, tout comme ce qui se fait en France, elle se réalise sur deux niveaux. D'abord en optimisant l'aptitude au compactage de l'enrobé à l'aide de la presse à cisaillement giratoire suivi de la vérification de la performance à l'orniérage à l'aide de l'orniéreur français (MTQ, 2005). Cependant, au MTQ, des études sont en cours afin de développer un troisième niveau de formulation. Celui-ci consistera à la caractérisation des enrobés bitumineux selon les modules dynamiques, la résistance à la fatigue et la résistance au retrait thermique empêché.

CHAPITRE 2

PROGRAMME DE RECHERCHE ET MÉTHODE D'ESSAI

Le présent chapitre vise à présenter le programme expérimental et la méthodologie proposés en vue d'évaluer l'effet de l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux. La recherche réalisée fait partie intégrante d'une commandite de recherche sur les bardeaux de postconsommation mandaté par le Regroupement des Récupérateurs et des Recycleurs de Matériaux de Construction et de Démolition du Québec (3R MCDQ) et RECYC-QUÉBEC. Ce mandat consiste à vérifier s'il est envisageable d'incorporer des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux couramment utilisés au Québec par le ministère des Transports du Québec. Le projet est divisé en deux thèmes distincts : 1) étudier l'influence de la provenance du bardeau sur les performances de l'enrobé et 2) déterminer une formulation optimale d'un enrobé bitumineux incorporant des particules de bardeaux d'asphalte. Dans le cadre de ce mémoire, les recherches seront concentrées sur la mise en relief d'une formulation optimale pour un enrobé de surface de type ESG-10 et un enrobé de base de type GB-20 incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation. Les formulations ainsi établies serviront de point de départ pour répondre au premier thème de la commandite qui consiste à vérifier si la provenance du bardeau influence les performances de l'enrobé.

La revue de la littérature a montré que pour l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication, une réduction de la teneur en bitume d'ajout est acceptée. Comme nous l'avons souligné à la section 1.3.1, l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication varie suivant le type d'enrobé : 3 % pour les enrobés de surface contrairement à 5 % pour les enrobés de base. Dans le cas de l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, les donneurs d'ouvrages sont mitigés à l'idée de permettre une réduction de la teneur en bitume d'ajout de l'enrobé (Les affaires.com, 2012), notamment en raison du vieillissement du bitume contenu dans les bardeaux de

postconsommation. On se questionne quant au réel potentiel du bitume des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation à se « mobiliser » et à se « mélanger » avec le bitume d'ajout et ainsi permettre l'enrobage de tous les granulats composant l'enrobé. Pour les producteurs d'enrobé, le gain en bitume associé à l'usage des particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication justifie et ajoute de l'intérêt de produire ce type d'enrobé étant donné que la quantité de bitume d'ajout se voit réduite entraînant une réduction significative du coût de production.

Le point de réflexion mis de l'avant dans la recherche d'une formulation optimale d'enrobé incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation focalise sur l'attente des performances escomptées. En d'autres termes, la question à laquelle cette recherche tente de répondre est la suivante : est-il possible de réduire la teneur en bitume d'ajout dans un enrobé de surface et un enrobé de base en y ajoutant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, tout en atteignant les performances recherchées pour l'enrobé produit? Dans cette perspective, des enrobés avec bardeaux de postconsommation ont été formulés suivant différents dosages en bitume d'ajout et comparés à un enrobé de référence couramment utilisé par le MTQ au terme de leurs performances de formulation (p_{cg} et d_{mm}), leurs performances thermomécaniques (orniérage, retrait thermique empêché et module complexe) et leur durabilité (tenue à l'eau). Les organigrammes présentés aux Figures 2.1 et 2.2 donnent une vue d'ensemble du programme de recherche réalisé dans le cadre de cette étude.

À noter que les formules de mélange des enrobés de référence ont été fournies par la compagnie Sintra Inc., provenant de leur usine n°102 de Victoriaville. L'enrobé de type ESG-10, formule n° 1a1ESG10-08a (*Voir Annexe I*), est celui qui a été employé sur la planche d'essai réalisée à l'automne 2008 par le MTQ en partenariat avec le LCMB. En ce qui concerne la formule de mélange de l'enrobé de type GB-20, formule n°1a1GB20-08a (*Voir Annexe II*), elle a été fournie à notre demande. Selon le responsable, cet enrobé est couramment utilisé comme enrobé de base sur le réseau routier du MTQ.

2.1 Programme de recherche

FORMULATION – ENROBÉ DE SURFACE (ESG-10)					
Type	Référence	Avec particules de bardeaux de postconsommation			
% bardeaux	0 %	3 %			
Mobilisation considérée ^A	-	0 %	20 %	40 %	60 %
Bitume bardeau considéré	-	0,00	0,12	0,24	0,36
Teneur en bitume d'ajout	5,65	5,65	5,53	5,41	5,29
Bitume bardeau considéré + bitume d'ajout ^B	5,65	5,65			
Appellation de l'enrobé ^C	ESG10-B0	ESG10-B3-0	ESG10-B3-20	ESG10-B3-40	ESG10-B3-60
MESURE DES PERFORMANCES					
Formulation (mix design)	<ul style="list-style-type: none"> • Presse à cisaillement giratoire • Densité (d_{mm} et d_{mb}) 				
Propriétés thermomécaniques	<ul style="list-style-type: none"> • Orniérage • Retrait thermique empêché • Module complexe 				
Durabilité	<ul style="list-style-type: none"> • Tenue à l'eau 				

Figure 2.1 Organigramme illustrant l'ensemble du programme de recherche pour les enrobés de surface (ESG-10)

^A Pourcentage du bitume des particules de bardeaux qui est considéré utilisable comme liant dans l'enrobé

^B Somme du bitume mobilisable considéré provenant des bardeaux et du bitume d'ajout

^C Ces appellations seront utilisées tout au long de ce mémoire

FORMULATION – ENROBÉ DE BASE (GB-20)					
Type	Référence	Avec particules de bardeaux de postconsommation			
% bardeaux	0 %	5 %			
Mobilisation considérée ^A	-	0 %	20 %	40 %	60 %
Bitume bardeau considéré	-	0,00	0,20	0,40	0,60
Teneur en bitume d'ajout	4,77	4,77	4,57	4,37	4,17
Bitume bardeau considéré + bitume d'ajout ^B	4,77	4,77			
Appellation de l'enrobé ^C	GB20-B0	GB20-B5-0	GB20-B5-20	GB20-B5-40	GB20-B5-60
MESURE DES PERFORMANCES					
Formulation (mix design)	<ul style="list-style-type: none"> • Presse à cisaillement giratoire • Densité (d_{mm} et d_{mb}) 				
Propriétés thermomécaniques	<ul style="list-style-type: none"> • Orniérage • Retrait thermique empêché • Module complexe 				
Durabilité	<ul style="list-style-type: none"> • Tenue à l'eau 				

Figure 2.2 Organigramme illustrant l'ensemble du programme de recherche pour les enrobés de base (GB-20)

^A Pourcentage du bitume des particules de bardeaux qui est considéré utilisable comme liant dans l'enrobé

^B Somme du bitume mobilisable considéré provenant des bardeaux et du bitume d'ajout

^C Ces appellations seront utilisées tout au long de ce mémoire

2.2 Présentation des différents essais réalisés

En laboratoire, différents essais seront réalisés sur les dix différents enrobés, cinq enrobés de type ESG-10 et cinq enrobés de type GB-20. Dans cette section, chacun des essais sera expliqué. Pour évaluer les différences de performances entre les enrobés, trois phases

d'essais sont mis à profit : 1) les essais de formulation (pcg et d_{mm}), 2) les essais thermomécaniques (orniérage, retrait thermique empêché et module complexe) et 3) essais de durabilité (tenue à l'eau). Ces essais seront présentés sommairement en séquence.

2.2.1 Essais de formulation

Avant d'entreprendre les essais thermomécaniques et les essais de durabilité sur les différents enrobés composant le programme de recherche, il est essentiel d'effectuer des essais de formulation. L'essai de la détermination de la densité maximale ainsi que l'essai de l'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire ont donc été les premiers essais réalisés en laboratoire sur l'ensemble des enrobés.

2.2.1.1 Détermination de la densité maximale

La densité maximale du mélange (d_{mm}) a été déterminée sur chacun des enrobés en laboratoire selon la méthode d'essai LC 26-045 : Détermination de la densité maximale (*Voir Annexe XVII*). L'obtention de cette donnée est nécessaire pour la réalisation et l'analyse de la majorité des essais concernant le programme de recherche.

2.2.1.2 Détermination de l'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire (pcg)

Concernant l'essai à la pcg, les essais ont également été réalisés en laboratoire suivant la méthode d'essai LC 26-003 : Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire (*Voir Annexe XIV*). Depuis quelques années, cet essai fait partie des essais de formulation pour la totalité des enrobés utilisés par le MTQ. Il était donc important, durant le programme expérimental, de s'assurer que les différents enrobés étudiés répondent aux exigences du Ministère au point de vue de l'aptitude au compactage.

Lors de la réalisation de cet essai, l'évolution des vides interstitiels présents dans l'enrobé bitumineux est déterminée. Le MTQ a instauré des exigences à obtenir à trois niveaux durant

le déroulement de l'essai. Ces niveaux correspondent à vérifier la hauteur de l'éprouvette et le pourcentage de vides contenu à l'intérieur de l'éprouvette après un nombre de girations précis de l'appareil (ng).

Tel que mentionné dans la méthode d'essai applicable, les trois critères sont nommés; le n_{initial} , le n_{design} et le n_{final} . Pour les enrobés à l'étude dans ce programme, soit le ESG-10 et le GB-20, le premier critère (n_{initial}) doit se faire après 10 girations de l'appareil. Alors que le dernier critère (n_{final}) se fait à la toute fin de l'essai, soit après 200 girations. En ce qui concerne le critère n_{design} , celui-ci est différent dépendamment du type d'enrobé bitumineux à l'essai. Dans le cas d'un ESG-10, le n_{design} correspond à 80 girations, alors que pour le GB-20, il correspond à 120 girations.

Selon la norme du Ministère (*Voir Annexe XII*), les exigences à obtenir pour les différents critères lors de l'essai à la presse à cisaillement giratoire sont démontrées au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Exigences de la méthode LC pour le pourcentage de vides interstitiels à obtenir lors de l'essai de la pcg
Adapté de la Méthode d'essai LC 26-003

CRITÈRE (ng)	EXIGENCE (%)
n_{ini}	$\geq 11,0$
n_{des}	4,0 à 7,0
n_{max}	$\geq 2,0$

2.2.2 Essais thermomécaniques

Une fois les essais de formulation réalisés, il était possible d'enclencher la deuxième phase du programme pour la mesure des performances des enrobés soit; les essais thermomécaniques. Cette phase comprend trois différents essais : 1) la mesure de la résistance à l'orniérage, 2) la mesure du retrait thermique empêché et 3) la mesure du module complexe.

2.2.2.1 Mesure de la résistance à l'orniérage

L'essai de la détermination de la résistance à l'orniérage permet de déterminer, à l'aide de l'orniéreur MLPC (*Voir* Figure 2.3) le comportement aux déformations permanentes (orniérage) d'un enrobé bitumineux soumis à une charge roulante répétée en condition isotherme tel que défini dans la méthode d'essai LC 26-410 : Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage (*Voir* Annexe XX).

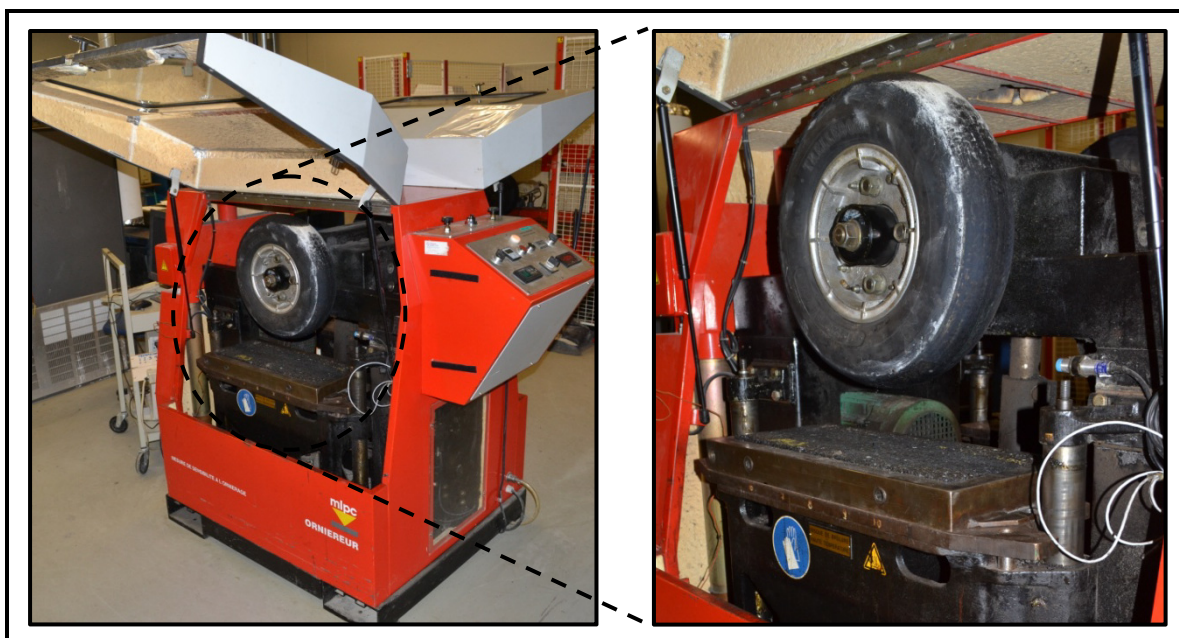


Figure 2.3 Orniéreur MLPC

La détermination de la résistance à l'orniérage a été réalisée sur deux éprouvettes pour chacun des enrobés. Les éprouvettes sont des plaques d'enrobé de dimensions suivantes : longueur de 500 mm, largeur de 180 mm et hauteur variable selon le type d'enrobé; 50 mm pour les enrobés de surface de type ESG-10 et 100 mm pour les enrobés de base de type GB-20 (Le matériel lpc, 2011). Ces plaques doivent être préalablement préparées selon la méthode d'essai LC 26-400 : Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC (*Voir* Annexe XIX). Le Tableau 2.2 donne les principales caractéristiques de l'orniéreur MLPC. Ces paramètres ont été ajustés sur l'appareil pour tous les enrobés analysés.

Tableau 2.2 Paramètres de fonctionnement de l'ornièreur MLPC
Tiré de Meunier (2005, p. 77)

PARAMÈTRES	DONNÉES	UNITÉS
Course du pneumatique	410 ± 5	mm
Fréquence du mouvement relatif	$1,0 \pm 0,1$	Hz
Pression du pneumatique (en début d'essai)	600 ± 30	Pa
Charge roulante appliquée	$5\,000 \pm 50$	N
Écart entre l'axe de la trace et l'axe théorique de l'éprouvette	< 5	mm
Angle d'envirage	$0,0 \pm 0,5$	°
Température de la plaque pour un enrobé avec un bitume PG 64-34 ^A	60 ± 2	°C
Température à l'intérieur de l'enceinte de l'ornièreur	≤ 75	°C

^A Bitume utilisé pour l'ensemble des enrobés bitumineux à l'étude

Suivant la procédure de la méthode d'essai (*Voir Annexe XX*), le tassement superficiel sous la trace de roue suivant des cycles de chargement prédéfini (*Voir Tableau 2.3*) est établi à partir de 15 mesures prises sur chacune des plaques à des endroits précis (*Voir Figure 2.4*). Ces lectures devaient se faire en tout temps aux mêmes endroits (± 1 mm).

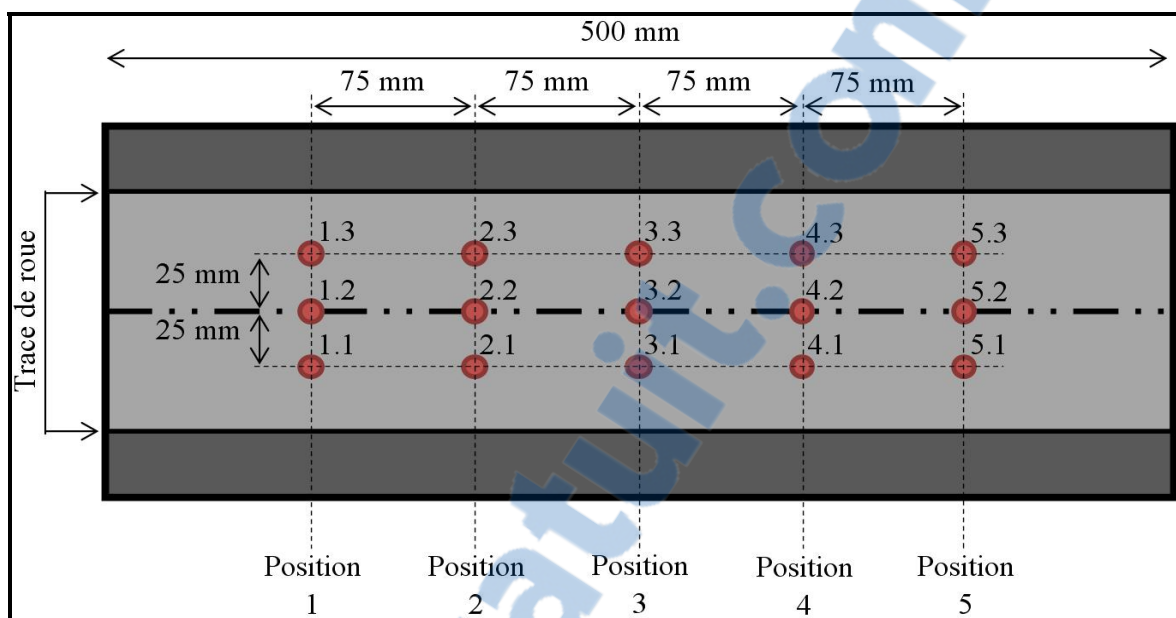


Figure 2.4 Localisation des points de mesure à la suite de chacun des cycles de contrôle
Adaptée de la Méthode d'essai LC 26-410 (2011, p. 10)

Une fois l'essai complété, l'analyse de celle-ci peut se faire. Le résultat obtenu à l'essai de l'ornièreur pour chacun des enrobés est démontré à la Figure 2.5. Dans le cadre de cette étude, l'évolution de l'ornièrage a été mesurée, pour tous les enrobés, après 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 passages du pneumatique, afin de pouvoir tirer le plus d'informations possibles de cet essai.

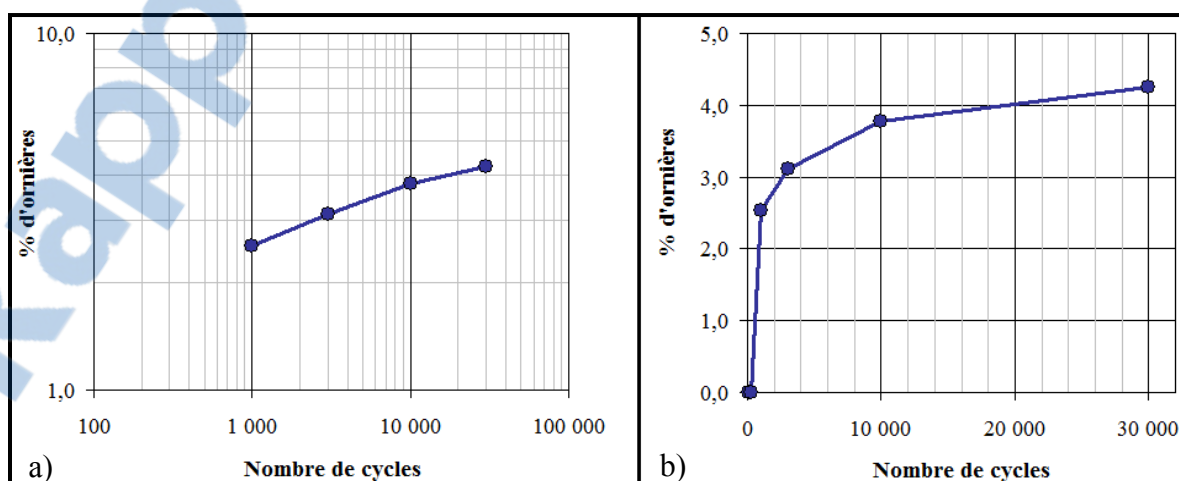


Figure 2.5 Exemple de l'évolution du pourcentage d'ornières durant l'essai avec :
a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques

Le ministère des Transports du Québec, via la norme 4202 (*Voir* Annexe XII), a émis des pourcentages d'ornières maximaux pour chaque type d'enrobé bitumineux. Ces critères doivent être respectés afin que l'enrobé soumis à l'essai puisse être mis en place sur le réseau routier du MTQ. Les enrobés étudiés dans le cadre de ce programme expérimental devront donc se soumettre aux exigences prescrites au Tableau 2.3. Lors de la réalisation de cet essai, les éprouvettes ne devront présenter aucune présence de ressuage afin d'être jugées conformes.

Tableau 2.3 Critères d'acceptation à l'essai à l'orniéreur dépendamment du type d'enrobé bitumineux à l'étude
Adapté de la norme 4202 (2011, p. 13)

ESG-10		GB-20	
Nombre de cycles	% d'ornières maximum	Nombre de cycles	% d'ornières maximum
1 000	10,0 %	30 000	10,0 %
3 000	20,0 %		

2.2.2.2 Mesure du retrait thermique empêché

L'essai de retrait thermique empêché a été réalisé conformément à la norme AASHTO TP10-93 : *Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength* (TSRST). Cet essai a pour but de déterminer la résistance à basse température des enrobés bitumineux en empêchant toute déformation longitudinale d'une éprouvette cylindrique (\varnothing 60 mm, longueur de \pm 250 mm) soumise à un taux de refroidissement constant de 10°C/heure. L'essai est réalisé dans une chambre thermorégulée. Le déplacement du vérin peut être contrôlé très précisément en fonction de la déformation de l'éprouvette mesurée à l'aide de trois extensomètres, d'une longueur de 165 mm, positionnés autour de l'éprouvette à 120° de distance l'un de l'autre (*Voir* Figure 2.6). Deux casques d'aluminium sont collés aux extrémités planes de l'éprouvette servant à installer l'éprouvette dans la presse

hydraulique. L'une des extrémités est attachée au vérin de la presse tandis que la deuxième extrémité est retenue à une cellule de charge (Meunier, 2005). L'éprouvette et les extensomètres doivent être mis en place adéquatement en suivant une procédure rigoureuse afin d'obtenir des résultats reproductibles.

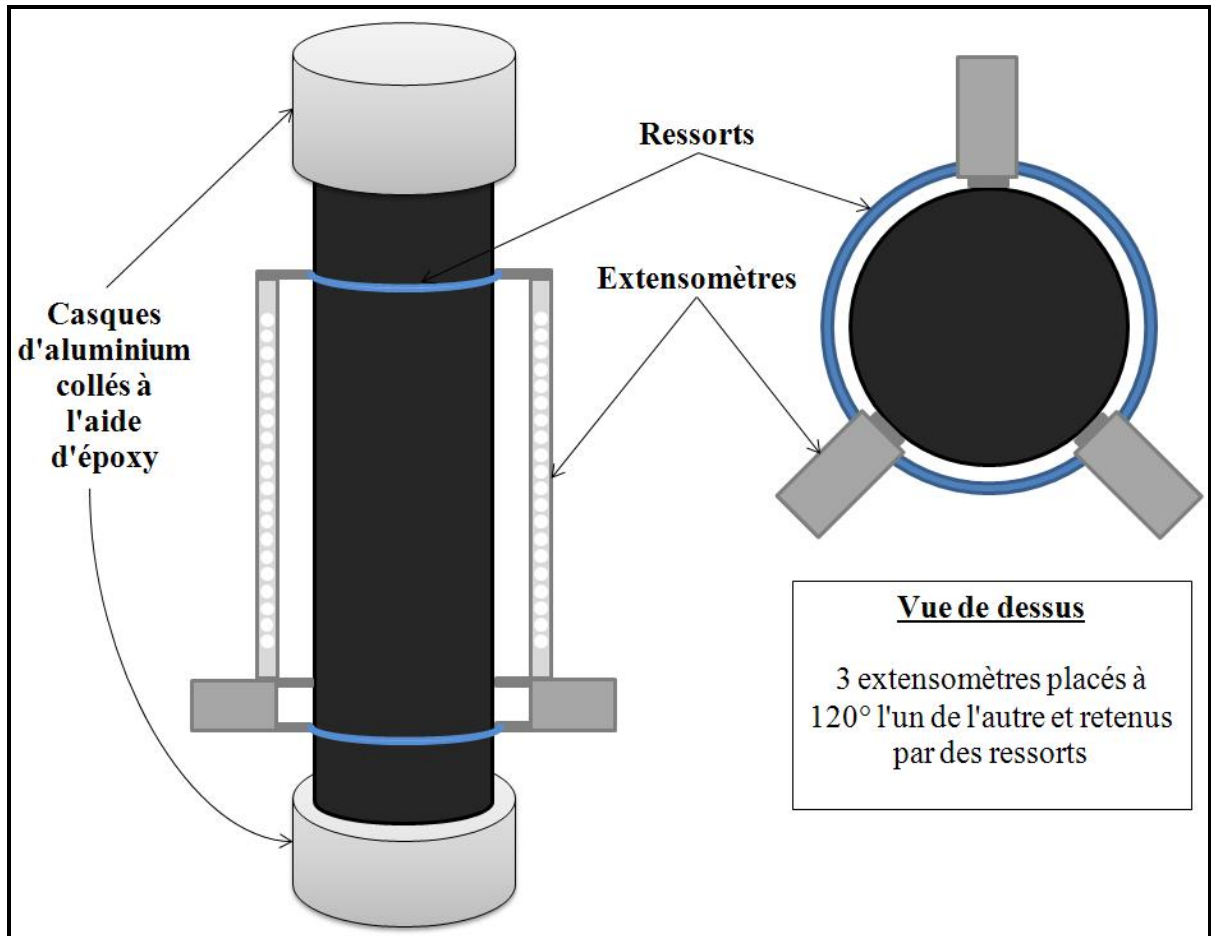


Figure 2.6 Localisation des extensomètres sur une éprouvette pour l'essai de retrait thermique empêché (TSRST)

En cours d'essai, à partir de la cellule de charge, la contrainte appliquée à l'éprouvette subissant le refroidissement ($10^{\circ}\text{C}/\text{heure}$) est mesurée pour maintenir une déformation nulle de l'éprouvette. Avant d'amorcer le refroidissement, l'éprouvette est placée dans l'enceinte thermique et conditionnée à 5°C pour une période de 6 heures. Suite au conditionnement, le refroidissement dans l'enceinte est lancé, et ce, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Tout au

long de l'essai, un système d'acquisition enregistre toutes les minutes, la température de l'éprouvette (en °C) et la force induite à l'éprouvette (en Newton).

À partir des données enregistrées, l'évolution de la contrainte en fonction de la température est calculée et mise sous forme de graphique. Pour chacun des enrobés formulés, trois éprouvettes ont été testées au TSRST afin d'obtenir des résultats représentatifs. La Figure 2.7 présente un exemple de résultat type (Meunier, 2005).

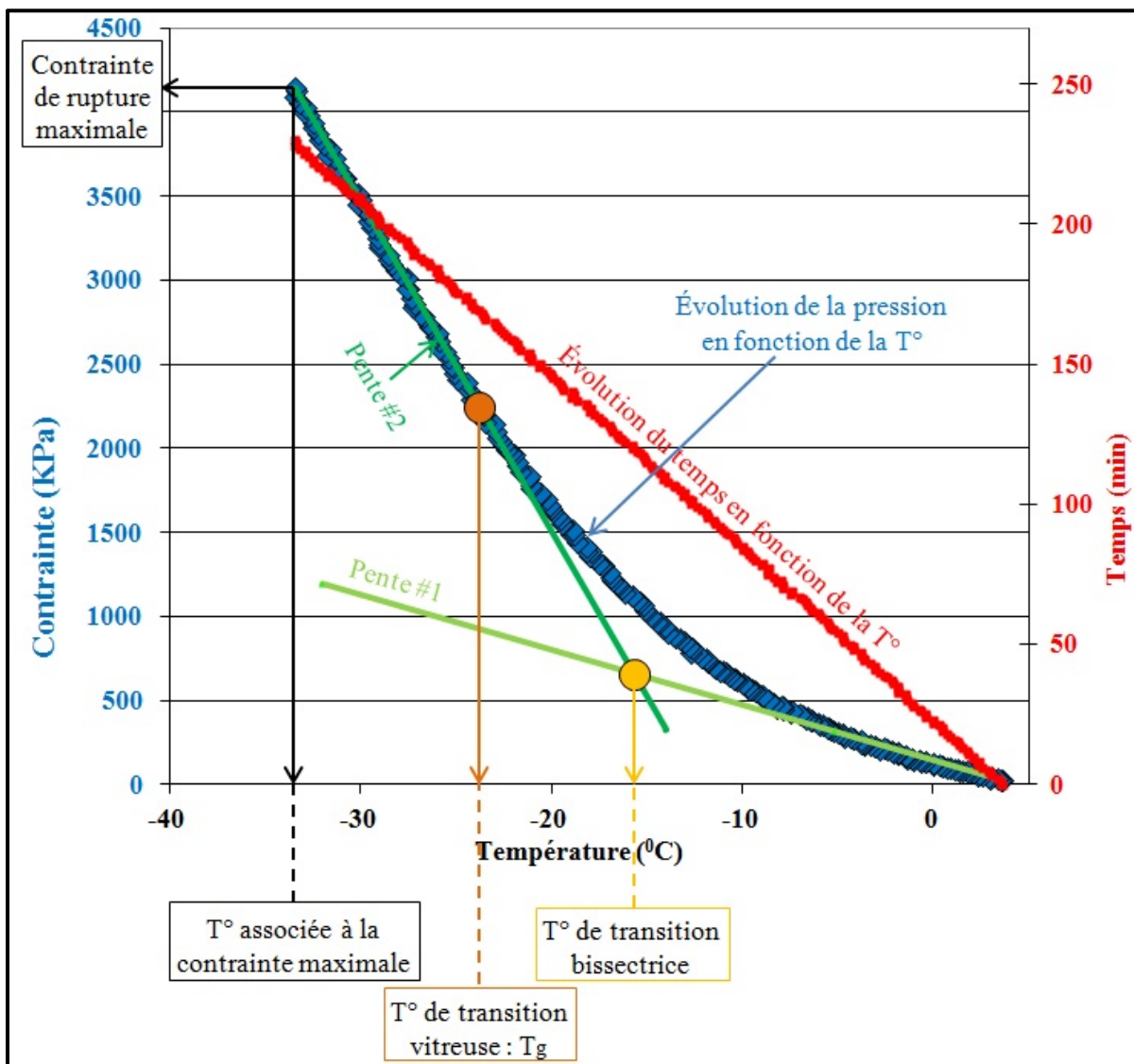


Figure 2.7 Graphique obtenu suite à l'analyse des résultats d'un essai de TSRST
Adaptée de Meunier (2005, p. 81)

Lors de l'analyse des résultats de l'essai de TSRST et de l'interprétation du graphique précédent, les données suivantes sont déduites (Meunier, 2005) :

- contrainte de rupture maximale obtenue au moment de la rupture (kPa);
- la température associée à la contrainte de rupture maximale (°C);
- la pente #1 qui représente le comportement pendant la période de relaxation (MPa/°C);
- la pente #2 qui correspond au comportement linéaire à basse température (MPa/°C);
- la température de transition vitreuse (T_g), qui représente la fin de la période de relaxation et le début du comportement linéaire (°C);
- la température de transition bissectrice, qui correspond à la jonction des pentes #1 et #2 (°C).

2.2.2.3 Mesure du module complexe

Selon Di Benedetto et Corté (2004), la détermination du module complexe d'un enrobé bitumineux sert à définir le comportement viscoélastique linéaire en petites déformations. Le module complexe (E^*) est obtenu en réalisant une série d'essais qui consiste à soumettre l'enrobé à des sollicitations sinusoïdales en condition isotherme suivant des fréquences variées pour différentes températures. Cela se réalise dans le domaine des petites déformations étant donné qu'un enrobé bitumineux est un matériau avec un comportement viscoélastique linéaire.

Di Benedetto et Corté (2004, p. 87) caractérisent le module complexe ainsi : « Le E^* est le nombre complexe défini comme le rapport entre l'amplitude complexe de la contrainte sinusoïdale de pulsation (ω) appliquée au matériau et l'amplitude complexe de la déformation sinusoïdale qui en résulte en régime établi. » Étant en présence d'un matériau à caractère viscoélastique, il existe un retard entre la déformation obtenue et la contrainte appliquée. Ce retard est traduit par l'angle de déphasage du matériau (ϕ). Ce déphasage est dû au comportement visqueux de l'enrobé.

L'essai consiste à imposer, à une éprouvette d'enrobé (\varnothing de 80 mm, longueur de 120 mm), une déformation longitudinale sinusoïdale alternant de la traction à la compression. Ceci se

réalise dans le même environnement que l'essai de retrait thermique empêché. Les sollicitations traction-compression se réalisent à diverses températures, dans ce cas-ci, la plage de température a été fixée de -35°C à $+35^{\circ}\text{C}$. Pour chacun des paliers de température, différentes fréquences de sollicitation sont exercées allant de 0,01 à 20 Hz (Di Benedetto et de La Roche, 1998). Suite à ces sollicitations en diverses conditions, une courbe dans le plan complexe (plan Cole-Cole) peut être mise en forme représentant le comportement rhéologique de l'enrobé. Un exemple de résultat obtenu suite à cet essai est démontré à la Figure 2.8.

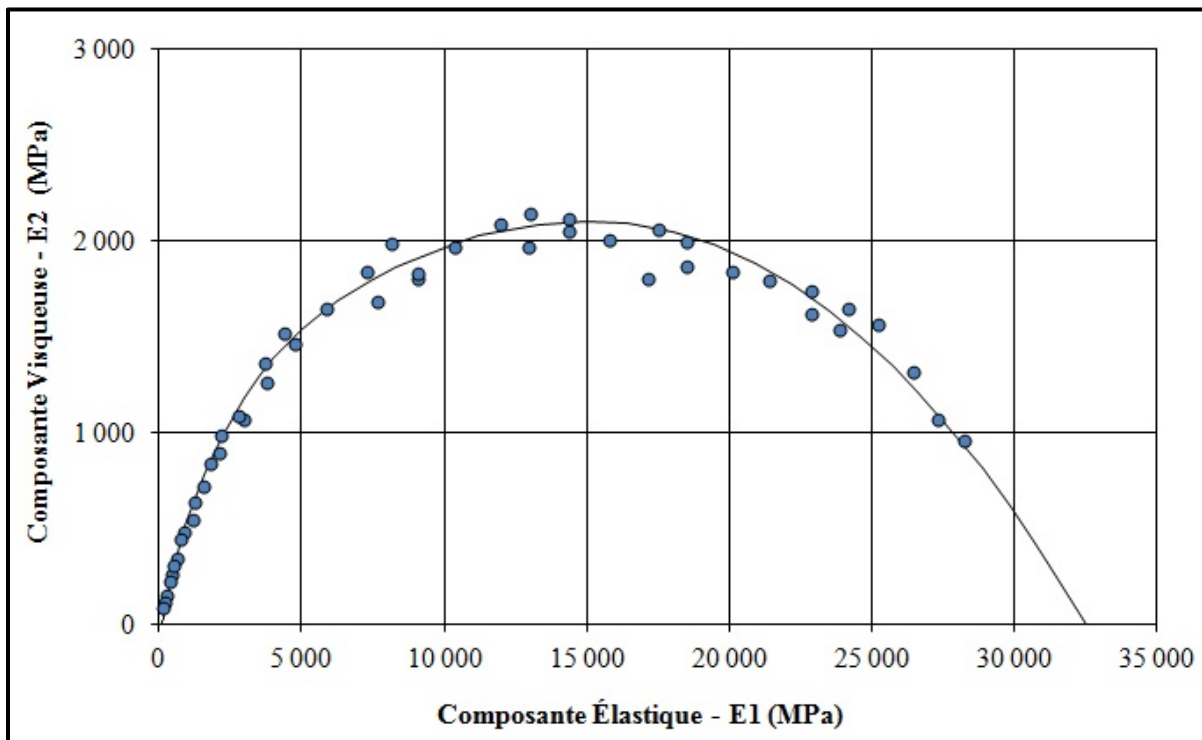


Figure 2.8 Résultats obtenus suite à un essai de module complexe sur un enrobé bitumineux

Dans l'intention de réaliser cet essai, le même matériel que l'essai de TSRST se doit d'être utilisé; presse mécanique avec système de collecte de données en temps réel, enceinte thermique et extensomètres. Par contre, dans ce cas-ci, les trois extensomètres doivent avoir une longueur de 50 mm. Ils sont placés exactement comme dans le cas de l'essai de retrait

thermique empêché, soit à 120° de distance l'un de l'autre autour de l'éprouvette et retenu entre eux par des ressorts.

Dans le cadre de cette étude, lorsque l'éprouvette est placée dans l'enceinte thermique et retenue par le vérin et la cellule de charge, huit paliers de température sont appliqués allant du plus froid vers le plus chaud : -35 ; -25 ; -15 ; -5 ; 5 ; 15 ; 25 et 35°C . Pour chacune de ces températures, huit niveaux de fréquence sont appliqués diminuant progressivement : 20 ; 10 ; 3 ; 1 ; $0,3$; $0,1$; $0,03$ et $0,01$ Hz. Entre chacun des paliers de température, un temps de conditionnement de quatre heures est appliqué dans l'enceinte thermique laissant le temps à l'éprouvette de s'acclimater à la nouvelle température. Alors qu'entre chacun des niveaux de fréquence, un léger temps de conditionnement doit également être appliqué pour assurer un déroulement adéquat de la presse mécanique.

Suite à plusieurs études, des chercheurs ont été en mesure de déterminer différents modèles rhéologiques représentant le comportement des enrobés bitumineux en petite déformation. Lors de l'analyse des résultats qui sera détaillée ultérieurement, les concepteurs de cette étude se sont basés sur l'un de ceux-ci, soit le modèle 2S2P1D mis de l'avant au laboratoire de l'ENTPE (Di Benedetto et Corté, 2004), qui lui, est basé sur le modèle de Huet-Sayegh avec l'ajout d'un amortisseur linéaire tel que démontré à la Figure 2.9 (Meunier, 2012).

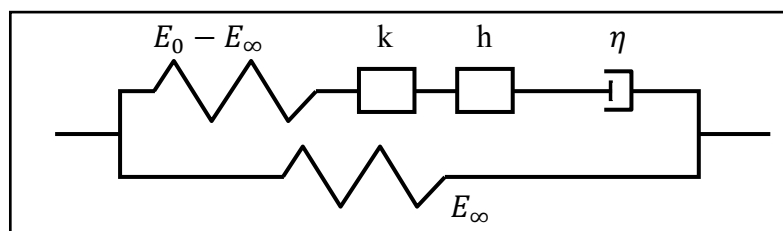


Figure 2.9 Représentation du modèle 2S2P1D
Tirée de Meunier (2012, p. 91)

L'ajout de l'amortisseur linéaire dans le modèle 2S2P1D, ajoute le comportement visqueux du bitume à haute température, c'est-à-dire, lorsque le E_∞ est égale à zéro (Meunier, 2012). Selon Di Benedetto et Corté (2004), le modèle 2S2P1D peut s'écrire ainsi :

$$E^*(i\omega\tau) = E_\infty + \frac{E_0 + E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (2.1)$$

Avec :

$$k = \frac{2 * \alpha}{\pi} \text{ et } h = \frac{2 * \beta}{\pi} \quad (2.2)$$

Où selon Meunier, 2012, les différents paramètres correspondent à :

- i → nombre complexe déterminé par $i^2 = -1$,
- ω → pulsation de $2\pi f$,
- k, h → exposants sachant que $0 < k < h < 1$,
- E_0 → module obtenu lorsque ω tend vers l'infini (fréquences élevées et/ou températures basses),
- E_∞ → module obtenu lorsque ω tend vers zéro (fréquences faibles et/ou hautes températures),
- α, β, δ → constante sans dimension,
- η → viscosité newtonienne de l'amortisseur, $\eta = (E_0 - E_\infty)\beta\tau_E$,
- τ_E → constante de temps, dépendant de la température de calcul.

Suite aux essais de module complexe, il est nécessaire de calibrer les différents paramètres du modèle de 2S2P1D afin de pouvoir en extraire des résultats pour une analyse complète. Pour ce faire, les paramètres sont ajustés afin d'offrir un modèle le plus représentatif des données expérimentales. Les paramètres à calibrer selon une température donnée sont dans l'ordre chronologique : E_∞ ; E_0 ; k ; h ; δ ; β et τ_E . Une procédure bien précise est déterminée afin d'effectuer cette calibration, celle-ci tirée de Meunier (2012) est présentée à l'Annexe XXI.

2.2.3 Essais de durabilité

La dernière phase d'essai comprise dans le programme de recherche consiste en la réalisation d'essais de durabilité. Dans cette dernière phase, un seul essai, soit la mesure de la tenue à l'eau, a été retenu.

2.2.3.1 Mesure de la tenue à l'eau

La mesure de la tenue à l'eau, réalisée selon la méthode d'essai LC 26-001 : Tenue à l'eau (par trempage) (*Voir* Annexe XIII), a pour but d'évaluer la chute de résistance d'un enrobé bitumineux ayant subi un vieillissement accéléré provoqué par une immersion dans l'eau. Pour ce faire, des briquettes d'enrobé sont confectionnées à la presse Marshall suivant la méthode d'essai LC 26-020 : Préparation d'éprouvettes pour la méthode Marshall (*Voir* Annexe XV). Suite à cette fabrication, les éprouvettes devaient être séparées en deux lots, un premier lot qui subira un vieillissement accéléré par trempage tandis que le second ne sera soumis à aucune condition particulière avant l'essai. Ensuite, ces éprouvettes seront toutes testées à la presse Marshall (*Voir* Figure 2.10) afin de déterminer leur résistance d'après la méthode d'essai LC 26-060 : Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes (*Voir* Annexe XVIII).

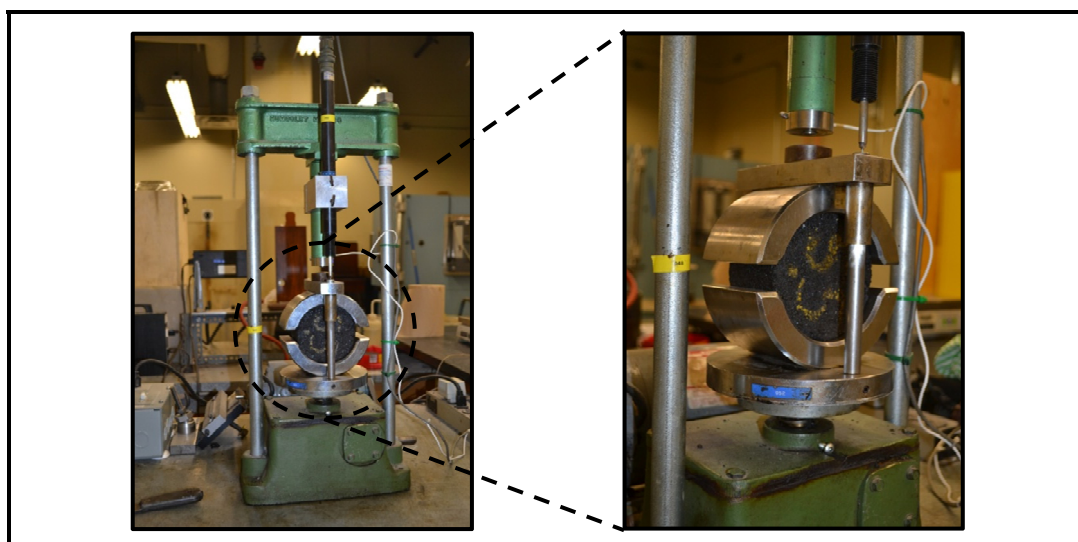


Figure 2.10 Presse Marshall

En réalisant cet essai sur les deux lots d'éprouvette pour chacun des enrobés, il est possible d'obtenir la tenue à l'eau de chacun d'eux selon le calcul suivant (*Voir* Équation 2.3) :

$$Tenue \text{ à l'eau (\%)} = \frac{AT}{ST} \times 100 \quad (2.3)$$

Où :

- AT : Stabilité des éprouvettes d'enrobé avec un vieillissement accéléré par trempage;
- ST : Stabilité des éprouvettes d'enrobé sans vieillissement accéléré par trempage.

Lors de la réalisation de l'essai, l'éprouvette cylindrique d'enrobé est placée à l'horizontale (*Voir* Figure 2.10) et une force est appliquée par la presse sur cette éprouvette. Avec un système de collecte de données, il est possible d'obtenir la force maximale induite ainsi que le déplacement vertical de l'éprouvette. Ce sont ces données qui serviront à déterminer la stabilité de l'éprouvette pour ensuite calculer la tenue à l'eau. Que l'éprouvette ait subi ou non un vieillissement par trempage, la procédure pour l'essai à la presse est la même.

Une fois la tenue à l'eau déterminée, le résultat est comparé à l'exigence de la norme 4202 du MTQ. Dans le cas des enrobés étudiés, les enrobés de type ESG-10 et GB-20 (avec un bitume PG 64-34), la norme demande un résultat à la tenue à l'eau supérieur ou égal à 70%.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DES ENROBÉS CONFECTIONNÉS, DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Dans l'intention de répondre au programme de recherche détaillé précédemment, il sera présenté dans ce chapitre, les différents enrobés à confectionner en laboratoire afin d'obtenir une formulation optimale pour un enrobé de surface de type ESG-10 et un enrobé de base de type GB-20. Ensuite, les matériaux utilisés dans la composition de ces enrobés seront décrits en détail, pour finalement terminer avec la préparation des éprouvettes servant à la réalisation de tous les essais en laboratoire.

3.1 Description des enrobés confectionnés

Dans la réalisation de ce projet de recherche, les efforts seront mis sur la détermination d'une formulation optimale pour deux types d'enrobé bitumineux couramment utilisés par le MTQ incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation :

- 1) enrobé de surface de type ESG-10;
- 2) enrobé de base de type GB-20.

Afin d'obtenir des résultats répondant aux objectifs du programme de recherche, il sera nécessaire de cerner l'effet de l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation sur les performances de l'enrobé. Pour ce faire, divers enrobés avec une teneur en bitume différente seront confectionnés pour être testés en laboratoire et ensuite être analysés. Ainsi, il sera possible de déterminer le taux de réduction du bitume d'ajout admissible afin d'obtenir des résultats similaires à ce qui se fait actuellement par le MTQ pour des enrobés standards.

Pour chacun des types, ESG-10 et GB-20, quatre enrobés avec bardeaux ont été réalisés en laboratoire. Chacun d'eux offrait une teneur en bitume différente. De plus, un enrobé de référence utilisé par le MTQ a également été analysé.

La détermination de la teneur en bitume d'ajout des différents enrobés a été déterminée considérant différents apports en bitume des particules de bardeaux. Selon les données du MTQ, le pourcentage de bitume mobilisable des particules de bardeaux de postfabrication est établi à 40 % de la masse de bitume du bardeau. Par conséquent, les enrobés ont été confectionnés en considérant différents apports en bitume des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation soient : 0 %; 20 %; 40 % et 60 % de la masse de bitume du bardeau.

Dix différents enrobés ont été confectionnés dans le cadre de cette étude. La codification de ces enrobés est présentée au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Codification des différents enrobés réalisés

ENROBÉ DE SURFACE	ENROBÉ DE BASE
ESG10-B0	GB20-B0
ESG10-B3-0	GB20-B5-0
ESG10-B3-20	GB20-B5-20
ESG10-B3-40	GB20-B5-40
ESG10-B3-60	GB20-B5-60

3.1.1 Enrobé de surface : ESG-10

Afin de déterminer la composition des enrobés de surface (ESG-10) à confectionner, les études du MTQ ont été considérées. Effectivement, tel que démontré dans la revue de la littérature, le Ministère a effectué diverses études sur les enrobés avec particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication et en est venu aux conclusions présentées au Tableau 1.2.

C'est donc d'après les critères de ce tableau que la composition des différents enrobés a été formulée. Il a été considéré que pour chacun des enrobés de surface avec bardeaux réalisés dans ce projet, une proportion de 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation sera substituée aux autres composantes de l'enrobé. Cependant, l'ajustement de la teneur en bitume d'ajout par rapport à celle de l'enrobé de référence sera modifié d'un enrobé à l'autre afin d'étudier son effet sur les performances de l'enrobé.

En ce qui concerne cet ajustement, à la suite de diverses études, le Ministère a statué que 40 % du bitume présent dans les particules de bardeau d'asphalte de postfabrication était mobilisable. L'équation 3.1 présente les paramètres qui définissent le dosage de réduction de la teneur en bitume d'ajout pour les enrobés avec bardeaux d'asphalte de postfabrication.

Ajustement de la teneur en bitume (%)	=	Particules ajoutées à l'enrobé (%)	x	Proportion de bitume dans les particules de bardeau (%)	x	Taux de mobilisation (%)	(3.1)
--	---	---	---	---	---	--------------------------------	-------

Exemple : 3 % de particules de bardeaux

Ajustement de la teneur en bitume (%)	=	3 %	x	20 %	x	40 %
Ajustement de la teneur en bitume (%)	=	0,24 %				

La réduction proposée par le MTQ ne concerne que les particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication. Dans le cadre de ce mémoire, la possibilité d'effectuer le même processus, mais avec des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, est étudiée. Pour ce faire, la teneur en bitume de 20 % dans les particules de bardeaux a été conservée lors de

cette analyse. La teneur en bitume des différents enrobés de surface, avec 3 % de particules de bardeaux d’asphalte de postconsommation, a été calculée et présentée au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Distribution du bitume pour les différents enrobés de surface pour un dosage de 3 % de particules dont la teneur en bitume est de 20 %

Appellation de l’enrobé	Mobilisation considérée du bitume des bardeaux	Bitume bardeau mobilisé considéré ^A	Bitume d’ajout	Bitume total ^B	Bitume bardeau mobilisé considéré + Bitume d’ajout
ESG10-B0	s. o.	-	5,65 %	5,65 %	5,65 %
ESG10-B3-0	0 %	0,00 %	5,65 %	6,25 %	
ESG10-B3-20	20 %	0,12 %	5,53 %	6,13 %	
ESG10-B3-40	40 %	0,24 %	5,41 %	6,01 %	
ESG10-B3-60	60 %	0,36 %	5,29 %	5,89 %	

^A Obtenu d’après le calcul : % bitume mobilisable des bardeaux x 20 % x 3 %

^B Tient compte du bitume d’ajout et de la quantité totale de bitume contenue dans les bardeaux

Au Tableau 3.2, on remarque que peu importe l’enrobé de surface et son ajustement de la teneur en bitume considérée, le bitume d’ajout est toujours ajusté afin d’obtenir un pourcentage de bitume considéré de 5,65 %, soit la teneur en bitume de l’enrobé de référence.

3.1.1.1 Formulation des enrobés de surface étudiés

Les formulations des enrobés de surface incorporant des particules de bardeaux sont fixées à partir d’un enrobé de référence. La composition de l’enrobé de référence (ESG10-B0) est montrée à la Figure 3.1. Cette formulation a été tirée de la formulation de l’enrobé de référence (Annexe I) mis en place sur la planche d’essai réalisée à l’été 2008 dans le cadre d’un projet sur les enrobés avec particules de bardeaux d’asphalte conjointement réalisé avec le MTQ.

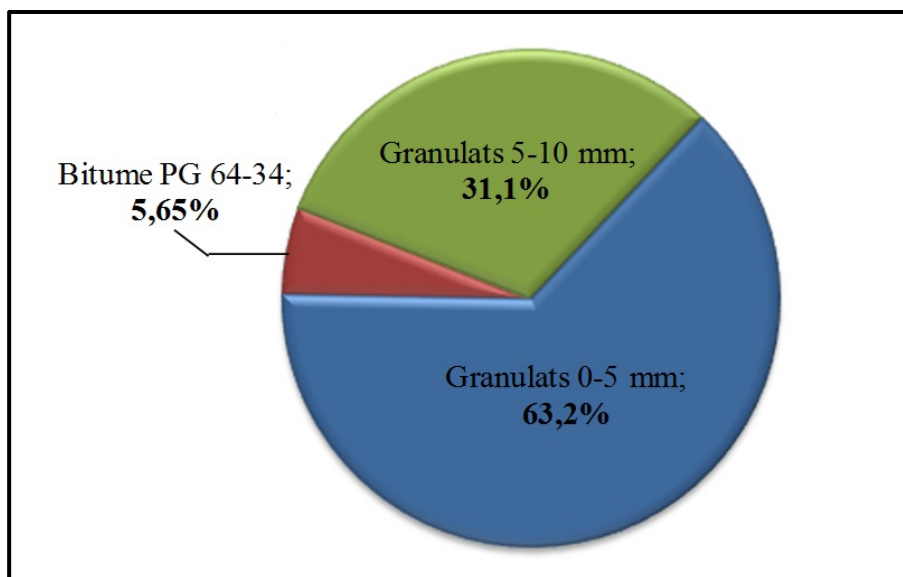


Figure 3.1 Composition massique pour l'enrobé de surface de référence (ESG10-B0)

L'ajout des particules de bardeaux a été considéré d'un point de vue de substitution à la masse granulaire. Étant donné que la granulométrie des particules de bardeaux d'asphalte est fortement comparable à celle de la fraction 0-5 mm (voir section 3.2.3.2), cette fraction granulaire a été réduite de la masse correspondante aux particules de bardeaux d'asphalte. Par ailleurs, dans les cas où une fraction du bitume des bardeaux est considérée mobilisable, la réduction de la fraction de granulats 0-5 mm est donc moindre, majorée de l'apport en bitume dans l'enrobé provenant des particules de bardeaux (*Voir* Tableau 3.3).

3.1.1.2 Caractéristiques des différents enrobés de surface

Chacun des différents enrobés de surface étudiés comporte des différences au point de vue de sa composition. Le Tableau 3.3 présente les dosages de chacun des constituants pour les cinq différents enrobés de surface.

Tableau 3.3 Caractéristiques des enrobés de surface de type ESG-10

		ESG10-B0	ESG10-B3-0	ESG10-B3-20	ESG10-B3-40	ESG10-B3-60
Classe du bitume (PG)		64-34	64-34	64-34	64-34	64-34
Composition de l'enrobé (%)	Bitume d'ajout	5,65	5,65	5,53	5,41	5,29
	Bardeau	Bitume ^A	0,00	0,60	0,60	0,60
		Granulats/ Fibres	0,00	2,40	2,40	2,40
	Granulats 0-5		63,2	60,2	60,3	60,5
	Granulats 5-10		31,1	31,1	31,1	31,1
	Granulats 10-14		-	-	-	-
	Granulats 14-20		-	-	-	-

^A Déterminé en estimant que les particules de bardeau sont composées à 20 % de bitume

La granulométrie du combiné granulométrique (*Voir* Tableau 3.4) des différents enrobés de surface peut également être déterminée suite aux informations mentionnées précédemment et en connaissant la granulométrie de chacun des matériaux contenus dans l'enrobé qui seront détaillées dans la section 3.2 « matériaux utilisés » de ce rapport.

Tableau 3.4 Granulométrie du combiné granulométrique des différents enrobés de surface (ESG-10)

ENROBÉ		ESG10-B0	ESG10-B3-0	ESG10-B3-20	ESG10-B3-40	ESG10-B3-60
BITUME D'AJOUT		5,65 %	5,65 %	5,53 %	5,41 %	5,29 %
Combiné granulométrique	28 mm	100	100	100	100	100
	20 mm	100	100	100	100	100
	14 mm	100	100	100	100	100
	10 mm	96	96	96	96	96
	5 mm	65	65	65	65	65
	2,5 mm	45	46	46	46	46
	1,25 mm	29	30	30	30	30
	630 µm	19	20	20	20	20
	315 µm	13	13	13	13	13
	160 µm	9,0	9,4	9,4	9,4	9,4
	80 µm	6,7	6,9	6,9	6,9	6,9

3.1.2 Enrobé de base : GB-20

Dans l'intention de déterminer la composition des différents enrobés de base de type GB-20 à confectionner, le même processus utilisé pour les enrobés de surface a été adapté, avec cependant, 5 % de particules de bardeaux admissibles, tirés des études du MTQ (Paradis, 2009) présentés précédemment au Tableau 1.2. D'après ces études réalisées sur les particules de bardeaux de postfabrication, la composition des différents enrobés de base avec particules de bardeaux de postconsommation a été formulée. Les ajustements de la teneur en bitume des différents enrobés sont présentés au Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Distribution du bitume pour les différents enrobés de base pour un dosage de 5 % de particules dont la teneur en bitume est de 20 %

Appellation de l'enrobé	Mobilisation considérée du bitume des bardeaux	Bitume bardeau mobilisé considéré ^A	Bitume d'ajout	Bitume total ^B	Bitume bardeau mobilisé considéré + Bitume d'ajout
GB20-B0	s. o.	-	4,77 %	4,77 %	4,77 %
GB20-B5-0	0 %	0,00 %	4,77 %	5,77 %	
GB20-B5-20	20 %	0,20 %	4,57 %	5,57 %	
GB20-B5-40	40 %	0,40 %	4,37 %	5,37 %	
GB20-B5-60	60 %	0,60 %	4,17 %	5,17 %	

^A Obtenu d'après le calcul : % bitume mobilisable des bardeaux x 20 % x 5 %

^B Tient compte du bitume d'ajout et de la quantité totale de bitume contenue dans les bardeaux

Au Tableau 3.5, il est possible de remarquer que peu importe l'enrobé et son ajustement de la teneur en bitume appliqué, le bitume d'ajout est toujours ajusté en conséquence afin d'obtenir un pourcentage de bitume considéré de 4,77 %, soit la teneur en bitume de l'enrobé de référence.

3.1.2.1 Formulation des enrobés de base étudiés

Les différentes formulations des enrobés de base avec particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation sont toutes fondées à partir de la formulation de l'enrobé de référence. La composition de cet enrobé (GB20-B0) est démontrée à la Figure 3.2. Cette formulation a été fournie par la compagnie Sintra Inc. (Annexe II).

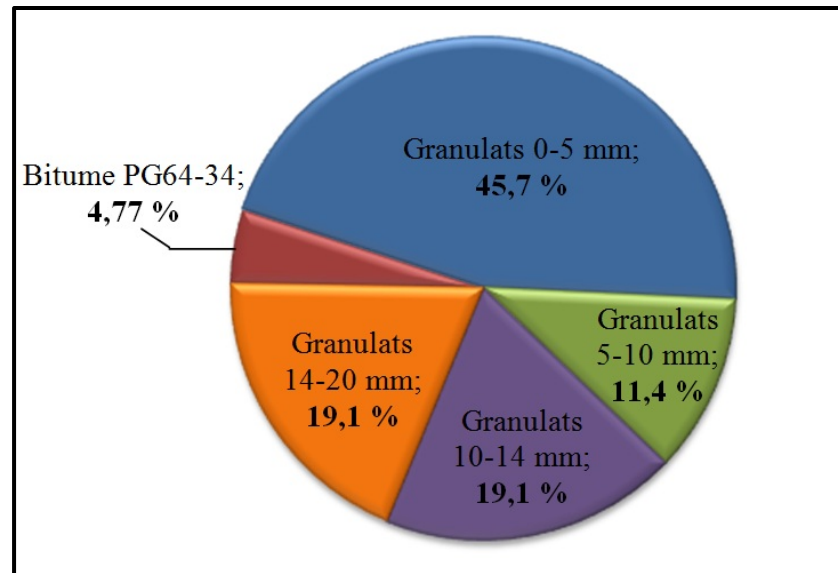


Figure 3.2 Composition massique pour l'enrobé de base de référence (GB20-B0)

Tout comme dans le cas des enrobés de surface, différentes teneurs en bitume d'ajout sont appliquées pour les enrobés étudiés. La substitution des particules de bardeaux se fait encore une fois sur la proportion de granulats de calibre 0-5 étant donné que les granulométries des deux matériaux sont comparables.

3.1.2.2 Caractéristiques des différents enrobés de base

Tout comme les enrobés de surface, chacun des enrobés de base étudiés possède une composition différente l'un de l'autre. Le Tableau 3.6 présente les dosages en granulats et en bitume de chacun de ces enrobés de base.

Tableau 3.6 Caractéristiques des enrobés de base de type GB-20

		GB20-B0	GB20-B5-0	GB20-B5-20	GB20-B5-40	GB20-B5-60
Classe du bitume (PG)		64-34	64-34	64-34	64-34	64-34
Composition de l'enrobé (%)	Bitume d'ajout	4,77	4,77	4,57	4,37	4,17
	Bardeau	Bitume ^A	0,00	1,00	1,00	1,00
		Granulats/ Fibres	0,00	4,00	4,00	4,00
	Granulats 0-5		45,7	45,7	40,9	41,1
	Granulats 5-10		11,4	11,4	11,4	11,4
	Granulats 10-14		19,1	19,1	19,1	19,1
	Granulats 14-20		19,1	19,1	19,1	19,1

^A Déterminé en estimant que les particules de bardeau sont composées à 20 % de bitume

En ayant les informations suivantes et en connaissant la granulométrie de chacun des matériaux granulaires contenus dans les enrobés de base, il est possible de déterminer la granulométrie de leur combiné granulométrique (*Voir* Tableau 3.7).

Tableau 3.7 Granulométrie du combiné granulométrique des différents enrobés de base (GB-20)

ENROBÉ		GB20-B0	GB20-B5-0	GB20-B5-20	GB20-B5-40	GB20-B5-60
BITUME D'AJOUT		4,77 %	4,77 %	4,57 %	4,37 %	4,17 %
Combiné granulométrique	28 mm	100	100	100	100	100
	20 mm	97	97	97	97	97
	14 mm	79	79	79	80	80
	10 mm	62	62	62	62	63
	5 mm	46	46	46	46	47
	2,5 mm	33	34	34	34	34
	1,25 mm	21	23	23	23	23
	630 µm	14	15	15	14	15
	315 µm	9,6	10	10	10	10
	160 µm	6,8	7,3	7,4	7,4	7,4
	80 µm	5,1	5,5	5,5	5,5	5,5

3.2 Matériaux utilisés

Une fois la composition des enrobés bitumineux déterminée et avant de procéder à la fabrication des différentes éprouvettes nécessaires à la réalisation des différents essais, il est important de s'attarder sur la nature des matériaux utilisés. Tout au long de la confection des enrobés bitumineux en laboratoire, les mêmes sources de matériaux ont été utilisées afin d'éviter une possible variabilité imputable aux matières premières. Dans cette section, les propriétés et les caractéristiques de ces matériaux sont présentées.

3.2.1 Bitume

Une seule source de bitume a été utilisée pour tous les enrobés confectionnés dans le cadre de ce programme de recherche, soit un bitume de classe PG 64-34 provenant de la compagnie Bitumar située à Montréal (# de lot : 086434-28). Le bitume a été produit le 12 octobre 2008 et a été entreposé au LCMB à partir du 15 octobre 2008 jusqu'au moment de son utilisation.

L'entreposage a été fait selon les recommandations du fournisseur. L'attestation de conformité du bitume est donnée à l'Annexe V et ses principales caractéristiques sont présentées au Tableau 3.8.

Tableau 3.8 Caractéristiques principales du bitume PG 64-34

ESSAIS DE CARACTÉRISATION	VALEUR OBTENUE	UNITÉ
Masse volumique à 25°C	1,018	g/cm ³
Stabilité au stockage	0,3	°C
Viscosité Brookfield à 135°C	688	mPa*s
Viscosité Brookfield à 165°C	247	mPa*s
Température élevée de caractérisation T _e	66,3	°C
Température basse de caractérisation T _b	-35,4	°C
Module de rigidité S ₀ (60)	66,6	MPa
Température de malaxage	156 à 170	°C
Température de compactage	156 à 175	°C

La température basse (T_b) mesurée (-35,4°C) est voisine de la température basse de la classe de bitume (-34,0°C). Ceci est un indicatif important du bitume qui sera considéré lors de certains essais thermomécaniques.

3.2.2 Granulats

Quatre sources distinctes de granulats ont été utilisées, soit les classes : 0-5; 5-10; 10-14 et 14-20 (*Voir* Figure 3.3). Les granulats de calibre 0-5 et 5-10 ont été utilisés pour la confection des enrobés de surface (ESG-10), tandis que les quatre calibres de granulats ont servi à la confection des enrobés de base (GB-20).

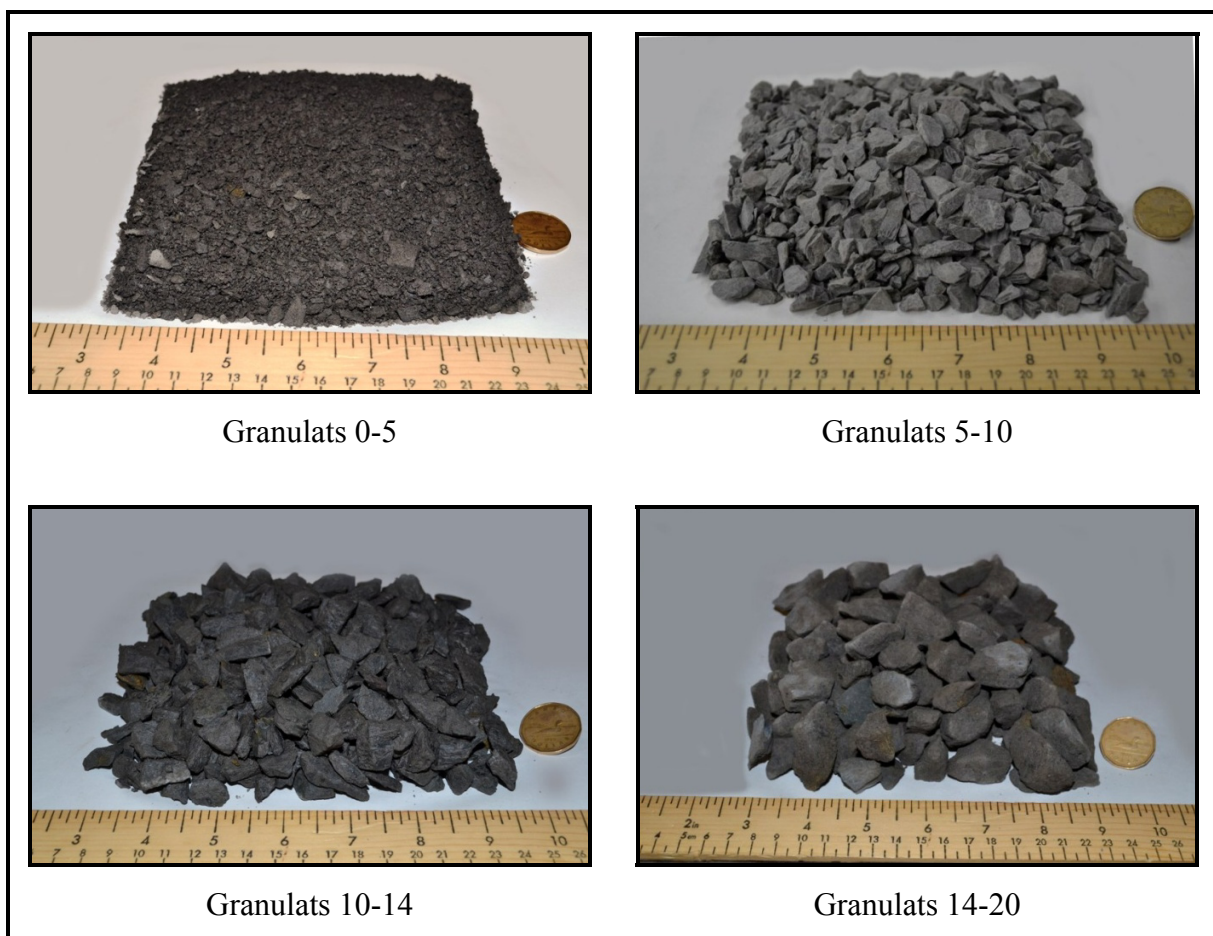


Figure 3.3 Photos des différents granulats utilisés

3.2.2.1 Provenance des granulats

Tous les granulats utilisés dans la composition des différents enrobés de cette recherche expérimentale ont été échantillonnés à la carrière PCM de Princeville. Ceux-ci étaient tous de même nature minéralogique (calcaire) et de même calibre (pierre concassée). Lors de l'échantillonnage, les granulats ont été mis dans des sacs étanches clairement identifiés à la classe de granulat correspondante qui eux ont été transvidés au laboratoire dans des chaudières de 20 litres, afin de faciliter l'entreposage et de s'assurer de l'étanchéité. Ces chaudières étaient également clairement identifiées afin de faciliter le suivi de l'inventaire des produits durant l'avancement du projet de recherche. Tout au long du projet, les chaudières ont été entreposées dans le dépôt du LCMB. Les caractéristiques intrinsèques et la



granularité, de chacun des granulats, sont données au Tableau 3.9, alors que les courbes granulométriques sont présentées à la Figure 3.4.

Tableau 3.9 Caractéristiques du manufacturier des différents granulats utilisés

PROPRIÉTÉS		GRANULATS			
		0-5	5-10	10-14	14-20
Nature minéralogique		Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire
Densité brute (d_{gb})		2,644	2,666	2,668	2,657
Densité apparente (d_{ga})		2,704	2,725	2,719	2,715
Absorption d'eau (Abs (%))		1,0	0,8	0,7	0,8
Granulométrie - Tamisat (%)	28 mm	100	100	100	100
	20 mm	100	100	100	86
	14 mm	100	100	87	10
	10 mm	100	89	14	4,0
	5 mm	92	9,0	2,0	2,0
	2,5 mm	66	2,0	2,0	2,0
	1,25 mm	42	2,0	2,0	2,0
	630 μ m	28	2,0	2,0	1,0
	315 μ m	19	1,1	1,1	1,0
	160 μ m	13	1,1	1,1	1,0
	80 μ m	9,4	1,1	1,1	1,0
Masse échantillonnée (kg)		900	450	450	450

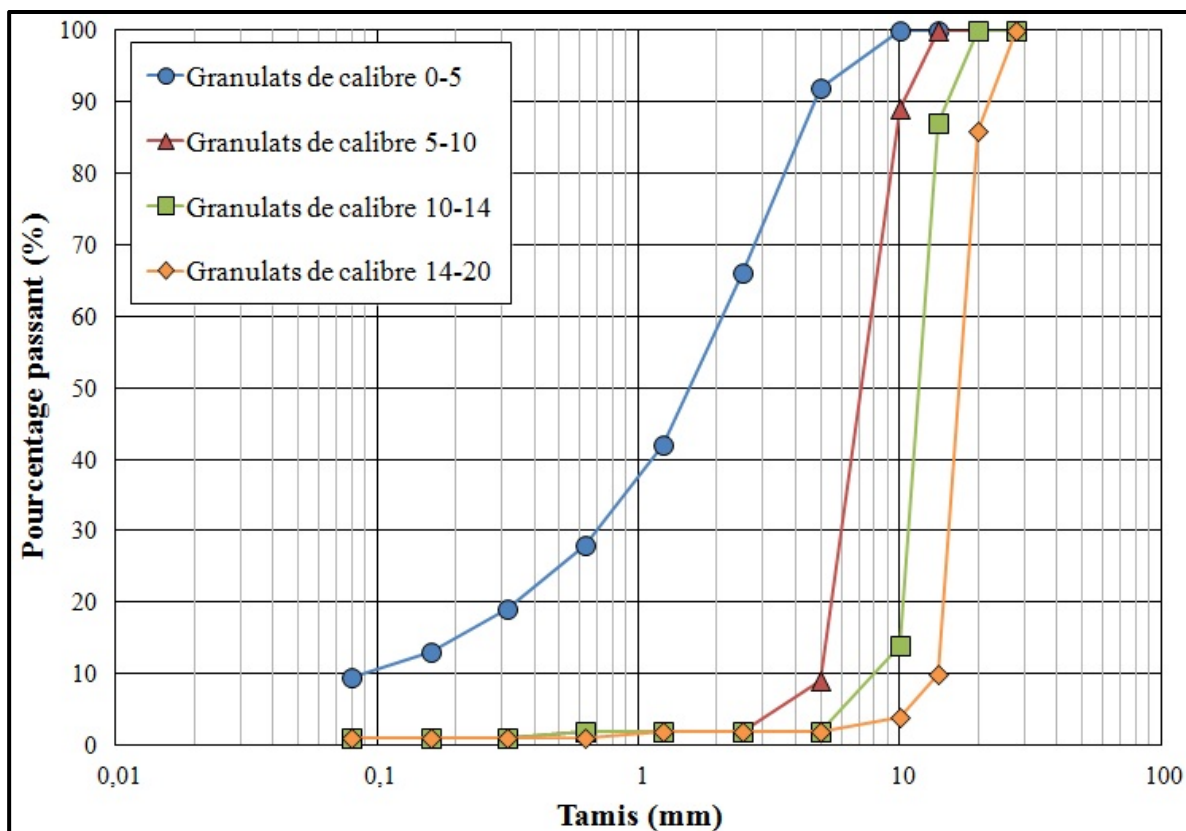


Figure 3.4 Courbes granulométriques des différents granulats utilisés

3.2.3 Bardeaux d'asphalte de postconsommation

Les particules de bardeaux d'asphalte utilisées pour la confection des enrobés ont été échantillonnées au Centre de recyclage du Groupe Bellemare, à Trois-Rivières. La Figure 3.5 présente une photo d'ensemble d'un échantillon de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation.



Figure 3.5 Particules de bardeaux
d'asphalte de postconsommation

Majoritairement, lorsque les entrepreneurs envoient leurs bardeaux de postconsommation aux différents centres de recyclage, le matériau est décontaminé, c'est-à-dire qu'il est nettoyé en chantier des matériaux dits polluants¹. Si le nettoyage n'a pas été convenablement réalisé et qu'une quantité appréciable de ces matériaux indésirables est présente dans le lot de bardeaux, un nouveau triage est effectué au Centre avant de procéder au déchiquetage proprement dit des bardeaux d'asphalte.

Une fois décontaminés, les bardeaux sont déchiquetés en particules inférieures à 10 millimètres à l'aide d'un concasseur industriel (*Voir les Figures 3.6 et 3.7*)

¹ On considère les matériaux tels que le bois, le plastique, les clous, etc. comme matériaux polluants dans les lots de bardeaux d'asphalte. (*Voir section 1.2.2.1*)



Figure 3.6
Bardeaux usés



Figure 3.7
Concasseur pour effectuer le
déchetage des bardeaux

Suite au déchetage, un prélèvement de particules de bardeaux a été effectué. Lors de l'échantillonnage, une masse de 100 kg a été prélevée afin de réaliser la confection des enrobés. Les échantillons ont été placés dans des sacs étanches puis acheminer au laboratoire du LCMB. Ensuite, ces particules ont été transvidées dans des chaudières identifiées et entreposées jusqu'à leur utilisation.

3.2.3.1 Granulométrie

Comme il a été démontré précédemment pour la formulation des enrobés incorporant des particules de bardeau, une partie du bitume des particules est considérée comme mobilisable. Cependant, l'excédant des particules est considéré comme une source de granulats dans l'enrobé. Il est donc important de connaître la granularité des particules de bardeaux pour la formulation des enrobés avec bardeaux (*Voir* Tableau 3.10). Dans ce tableau, la granulométrie des bardeaux de postfabrication y est également ajoutée étant donné que ceux-ci servent de référence. Ces informations ont été tirées des formules de mélange présentées aux Annexes III et IV, utilisées lors des études du MTQ en partenariat avec le LCMB. À noter que la teneur en bitume des bardeaux de postfabrication a été conservée pour les

bardeaux de postconsommation afin d'avoir un point de comparaison entre les deux types de bardeaux lors de l'analyse des résultats.

Tableau 3.10 Principales caractéristiques des particules de bardeau d'asphalte d'après le manufacturier

PROPRIÉTÉS		BARDEAU DE POSTCONSOMMATION	BARDEAU DE POSTFABRICATION
Granulométrie - tamisat (%)	28 mm	100	100
	20 mm	100	100
	14 mm	100	100
	10 mm	100	100
	5 mm	95	93
	2,5 mm	90	87
	1,25 mm	70	69
	630 µm	39	48
	315 µm	30	30
	160 µm	24	20
	80 µm	17	15
Teneur en bitume considérée (%)		20	20

3.2.3.2 Comparaison entre les particules de bardeaux et le granulat de calibre 0-5

Outre le bitume des particules de bardeau exerçant la fonction de liant dans l'enrobé, l'excédant des particules de bardeau agissent comme granulat. La granularité des particules de bardeaux étant similaire aux granulats de calibre 0-5 (*Voir* Figure 3.8), il a été décidé que ce seraient ces granulats qui seront substitués par les particules de bardeau lorsque l'ajout de bardeaux dans les enrobés est applicable. La granulométrie des particules de bardeaux de postfabrication a également été ajoutée sur cette figure à titre comparatif. Il est possible de remarquer de légères différences entre les granulométries des deux types de particules de bardeaux d'asphalte. Ceci peut être causé par la perte de certains granulats dans la composition des bardeaux de postconsommation dû au fait qu'ils subissent un endommagement continu durant leur durée de vie sur les toitures.

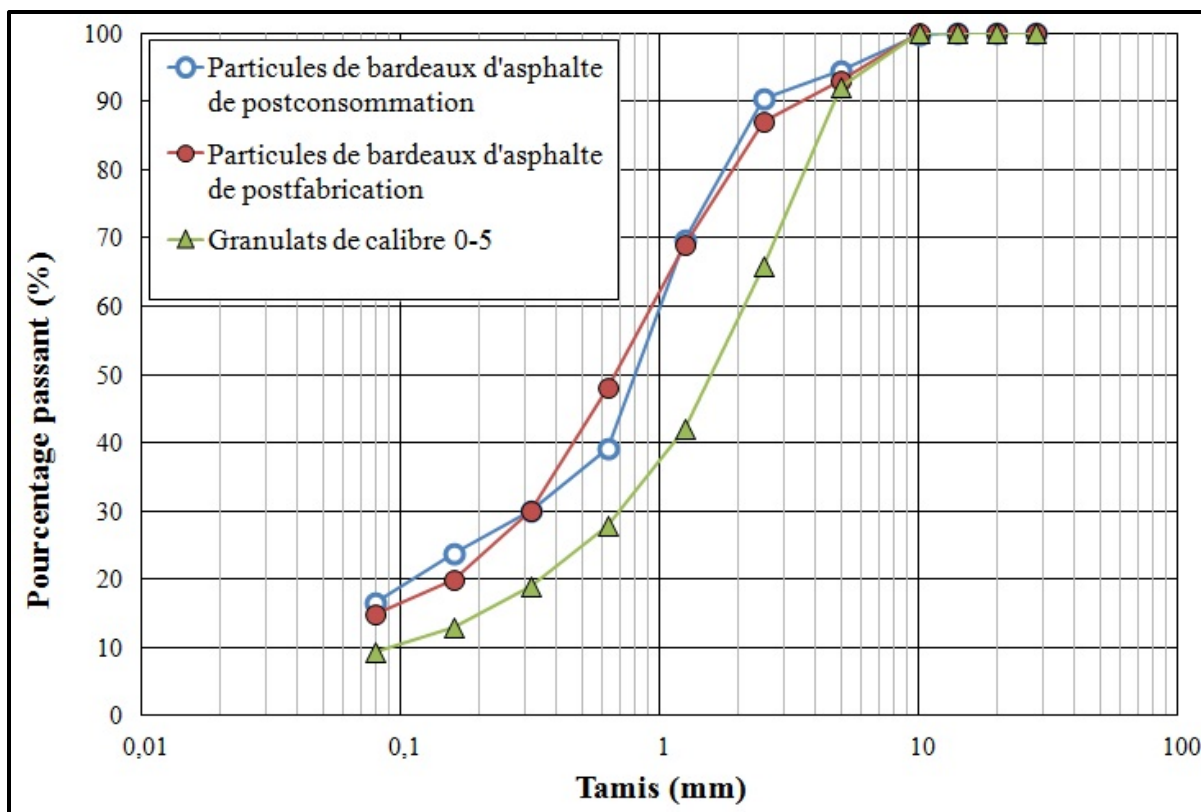


Figure 3.8 Courbes granulométriques du granulat 0-5 mm comparativement aux particules de bardeaux d'asphalte

3.3 Préparation en vue de réaliser les essais en laboratoire

La confection des enrobés bitumineux et la création des éprouvettes servant aux divers essais réalisés en laboratoire ont été réalisées suivant un plan de travail rigoureux. Dans le but de réaliser les différents essais de formulation, thermomécaniques et de durabilité qui ont été retenus pour le programme expérimental, la confection d'éprouvettes de diverses dimensions est requise. Pour ce faire, la première étape consistait à confectionner en laboratoire les enrobés bitumineux selon les formulations retenues.

3.3.1 Confection des enrobés en laboratoire

Afin de confectionner des éprouvettes pour la réalisation des essais, il fut d'abord nécessaire de fabriquer des plaques d'enrobés qui ont été par la suite carottées pour former les

éprouvettes. Avant tout, il était nécessaire de fabriquer l'enrobé. Pour ce faire, le malaxage se devait d'être réalisé à l'aide d'un malaxeur à batteur circulaire, d'une capacité de 30 L (*Voir* Figure 3.9).

Préalablement au malaxage, le bol et le batteur du malaxeur se devaient d'être chauffés à l'intérieur d'une étuve (*Voir* Figure 3.10) à 180°C. L'ensemble des granulats était aussi chauffé à cette température, alors que les particules de bardeaux eux, étaient chauffés à 100°C au four micro-onde. Le choix de la température de chauffage des bardeaux est basé sur une note technique destinée aux directions territoriales de la province (*Voir* Annexe XXII). Quant à lui, le bitume était chauffé à l'étuve à la température de 168°C. Le Tableau 3.11 donne les températures cibles et le mode de chauffage retenus pour chacun des constituants dans la confection des enrobés avec ou sans particules de bardeaux d'asphalte.

Tableau 3.11 Température et équipement utilisé pour le chauffage des matériaux

MATÉRIAUX ET MATÉRIEL	TEMPÉRATURE DE CHAUFFAGE (°C)	ÉQUIPEMENT UTILISÉ POUR LE CHAUFFAGE
Granulats concassés	180 ± 2	Étuve
Particules de bardeaux d'asphalte	100 ± 10	Micro-ondes
Bitume	168 ± 2	Étuve
Bol et batteur	180 ± 2	Étuve

Pour tous les enrobés confectionnés en laboratoire, la séquence de malaxage a été rigoureusement suivie, soit :

1. Introduction, dans le bol, des granulats concassés (du plus gros diamètre au plus petit);
2. introduction (si applicable) des particules de bardeaux d'asphalte;
3. malaxage manuel des matériaux;
4. ajout du bitume;
5. installation du bol et du batteur sur le malaxeur;
6. malaxage à la vitesse 1 des matériaux pour une durée de 60 à 90 secondes, soit jusqu'à ce que le mélange soit visiblement homogène;

7. raclage de la paroi et du fond du bol;
8. Malaxage de l'enrobé à la vitesse 2 pour une durée de 30 à 60 secondes, soit jusqu'à l'obtention d'un mélange parfaitement homogène.



Figure 3.9 Malaxeur



Figure 3.10 Étuve

Après le malaxage, l'enrobé bitumineux était transposé dans un récipient métallique, puis recouvert et le tout, était placé à l'étuve afin d'atteindre la température de compactage (160 ± 2 °C). Une fois la température atteinte, la fabrication des plaques pouvait être réalisée.

3.3.2 Fabrication des plaques et des éprouvettes

Dans l'intention de fabriquer les différentes éprouvettes nécessaires à la réalisation des essais, des plaques ont été compactées. Celles-ci ont été conçues à l'aide du compacteur de plaques MLPC (*Voir* Figure 3.11) suivant une séquence de compactage adéquate pour l'enrobé à réaliser. La dimension des plaques pour le compactage étant variable, dépendamment des essais, différentes séquences de compactage ont été appliquées.



Figure 3.11 Compacteur de plaques MLPC

3.3.2.1 Éprouvettes pour déterminer la résistance à l'orniérage

La détermination de la résistance à l'orniérage a été réalisée suivant les spécifications de la méthode d'essai LC 26-410 : Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage (*Voir Annexe XX*). Deux plaques pour chacun des enrobés ont été compactées et testées simultanément dans l'orniéreur MLPC. Le compactage a été réalisé à une température de 162°C et visant un niveau de compacité de 95 %. Les dimensions des plaques pour la détermination de la résistance à l'orniérage dépendent du type d'enrobé à tester, soit :

- plaque de 50 x 180 x 500 mm pour les enrobés de surface (ESG-10);
- plaque de 100 x 180 x 500 mm pour les enrobés de base (GB-20) (*Voir Figure 3.12*).



Figure 3.12 Photo illustrant le positionnement et les dimensions des plaques dans le compacteur pour une plaque d'enrobé de surface (GB-20)

Une fois la compacité obtenue, les plaques ont été entreposées à l'air ambiant dans le laboratoire pour une durée minimale de 48 heures avant de pouvoir être testées à l'ornièreur.

3.3.2.2 Éprouvettes pour les essais de retrait thermique empêché et de module complexe

Les essais de retrait thermique empêché et de module complexe sont réalisés à partir d'éprouvettes cylindriques carottées dans des plaques d'enrobés préalablement compactées au compacteur de plaques MLPC. Pour ce faire, une plaque de 120 mm x 180 mm x 500 mm a été compactée pour chacun des enrobés.

Après compactage, la plaque est démoulée et entreposée à l'air ambiant pour une cure d'une durée minimale de 14 jours. Suite à cette cure, des éprouvettes ont été carottées dans la plaque à l'aide d'une carotteuse (*Voir* Figure 3.13) et suivant le plan de carottage présenté à



la Figure 3.14. Celui-ci a été planifié afin de minimiser les pertes et maximiser le nombre d'éprouvettes prélevées dans la plaque.

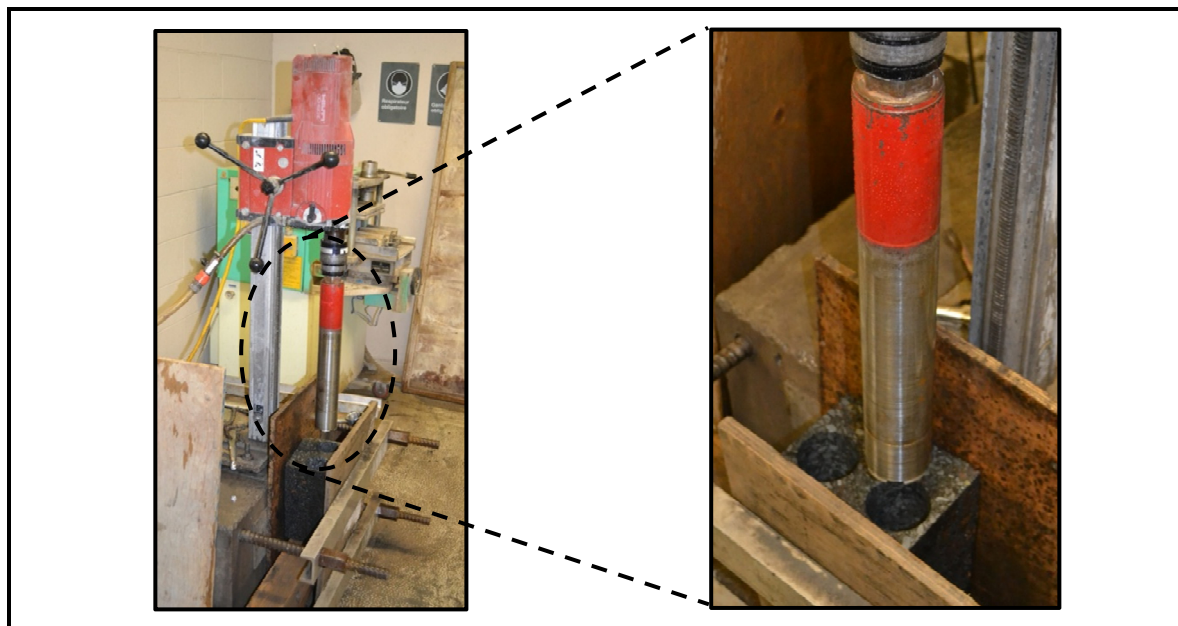


Figure 3.13 Carotteuse

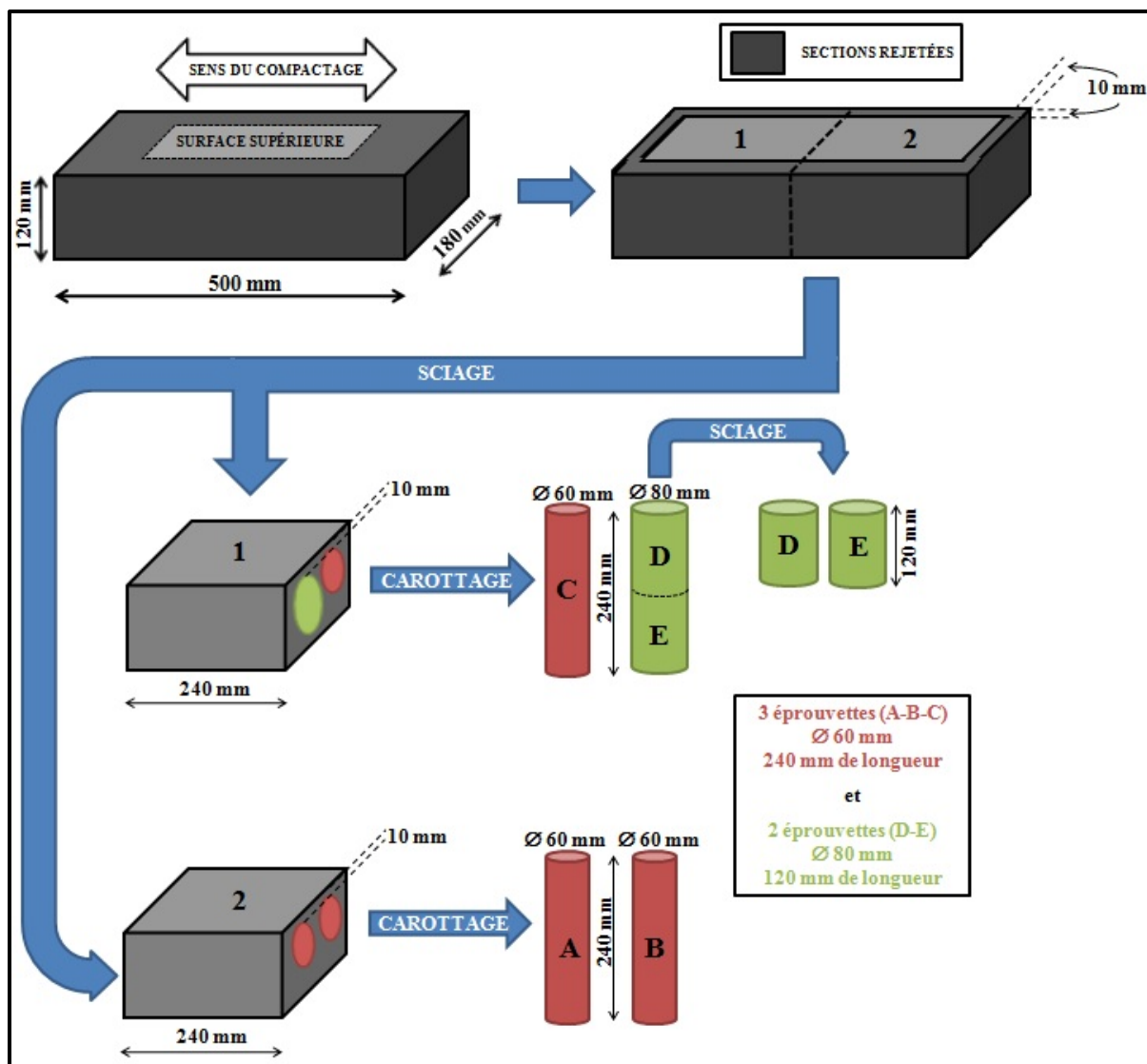


Figure 3.14 Plan de carottage des éprouvettes pour les essais de retrait thermique empêché et de module complexe

Une fois les éprouvettes extraites de la plaque, leurs surfaces planes ont été surfacées à l'aide d'une rectifieuse (*Voir* Figure 3.15) afin de rendre les deux extrémités parfaitement lisses et parallèles l'une à l'autre. Elles ont ensuite pu être pesées et mesurées (trois mesures pour la hauteur et trois mesures pour le diamètre). Les mesures de la hauteur ont été prises avec le vernier sur pied (*Voir* Figure 3.16), tandis que les mesures du diamètre ont été faites avec un pied à coulisse afin d'éviter les sources d'erreur provoquées par les irrégularités de l'éprouvette lorsqu'elle est déposée sur la plaque de marbre servant de base au vernier sur

pied. Cette façon de procéder a été adoptée au LCMB suite à des observations faites par l'un de ses membres, soit Monsieur Sébastien Lamothe (2011).



Figure 3.15 Photos de la rectifieuse utilisée pour procéder au resurfage des éprouvettes



Figure 3.16 Photo du vernier sur pied utilisé pour la mesure de la largeur des éprouvettes

Finalement, les éprouvettes ont été identifiées suivant une codification propre au projet définie à la Figure 3.17 :

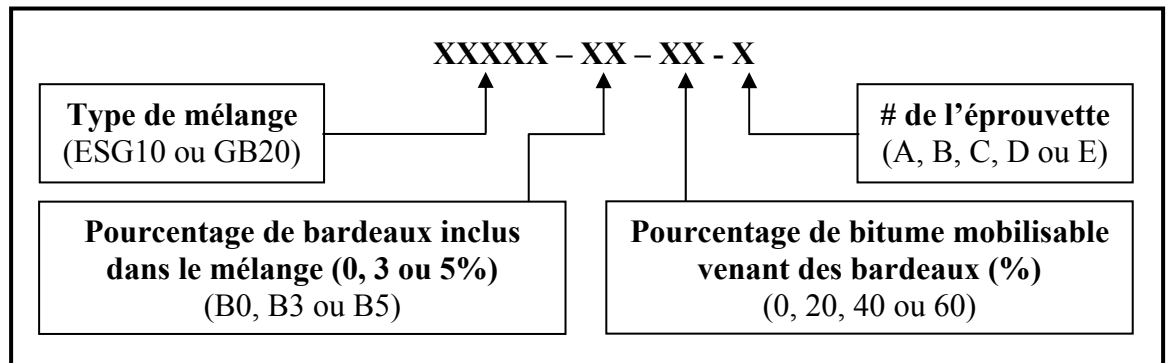


Figure 3.17 Système de codification des éprouvettes

Par la suite, l'ensemble des éprouvettes a été entreposé pour une période minimale de 14 jours avant de pouvoir les tester. Lors de l'entreposage, les éprouvettes ont été placées sur un lit de sable (*Voir* Figure 3.18) afin de s'assurer qu'aucune déformation indésirable ne puisse survenir. Au LCMB, les éprouvettes sont conservées dans une pièce dédiée à cet effet (*Voir* Figure 3.19).



Figure 3.18
Photo illustrant le mode
d'entreposage sur lit de sable



Figure 3.19
Photo démontrant la salle
pour l'entreposage des
éprouvettes

Une fois la cure de 14 jours réalisée, les éprouvettes pouvaient être testées en séquence. Pour la réalisation des essais de retrait thermique empêché et de module complexe, des casques d'aluminium devaient préalablement être collés aux extrémités planes. Ces casques servent à l'encrage de l'éprouvette sur la presse : une extrémité attachée au vérin et l'autre à la cellule de charge. Les casques d'aluminium ont été collés à l'éprouvette avec un époxy (Sikadur 31, Hi-Mod Gel) à l'aide d'un banc de collage fabriqué à cet effet (*Voir Figure 3.20*).

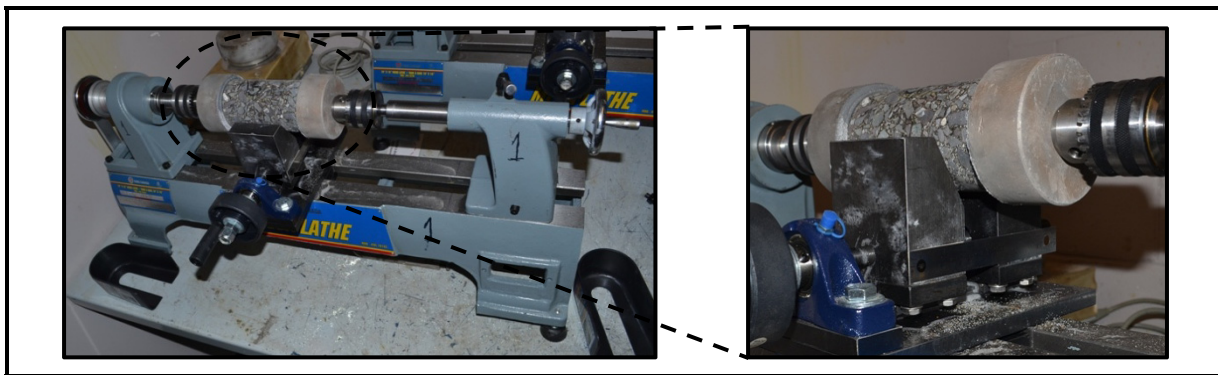


Figure 3.20 Photos du banc de collage utilisé pour assurer un alignement parfait lors de la mise en place de l'éprouvette

Pour s'assurer d'avoir un collage adéquat, c'est-à-dire un bon alignement et un bon parallélisme des casques, l'éprouvette devait être laissée sur le banc de collage pendant une période minimale de six heures. Suite à ce temps de cure, l'éprouvette était fin prête à être testée. Que ce soit un essai de retrait thermique empêché ou de module complexe, l'essai se réalisait à l'aide d'une presse hydraulique commercialisée par la compagnie MTS. (*Voir Figure 3.21*).



Figure 3.21 Presse hydraulique utilisée pour les essais thermomécaniques avec une éprouvette mise en place lors d'un essai de module complexe

3.3.2.3 Éprouvettes pour la mesure de la tenue à l'eau

La mesure de la tenue à l'eau est décrite dans la méthode d'essai LC 26-001 : Tenue à l'eau (par trempage) (*Voir* Annexe XIII). Généralement, on utilise des éprouvettes ayant un diamètre de 100 mm, d'une longueur approximative de 50 mm et préparées suivant la méthode d'essai de préparation d'éprouvette pour la méthode Marshall. Cependant, compte tenu d'une disponibilité limitée de matières premières, une solution de rechange a dû être trouvée afin de trouver des éprouvettes pouvant être utilisées pour cet essai. Il a donc été décidé de prendre les éprouvettes ayant servi aux essais de module complexe² préalablement testées puis de les couper afin de pouvoir effectuer l'essai de la tenue à l'eau (*Voir* Figure 3.22).

² Soulignons que ces essais sont réalisés en petites déformations sous sollicitation cyclique de déformation imposée de traction/compression centrée sur zéro. Par conséquent, il est tout à fait concevable de considérer qu'aucun endommagement significatif ne soit induit à l'éprouvette suite à l'essai.

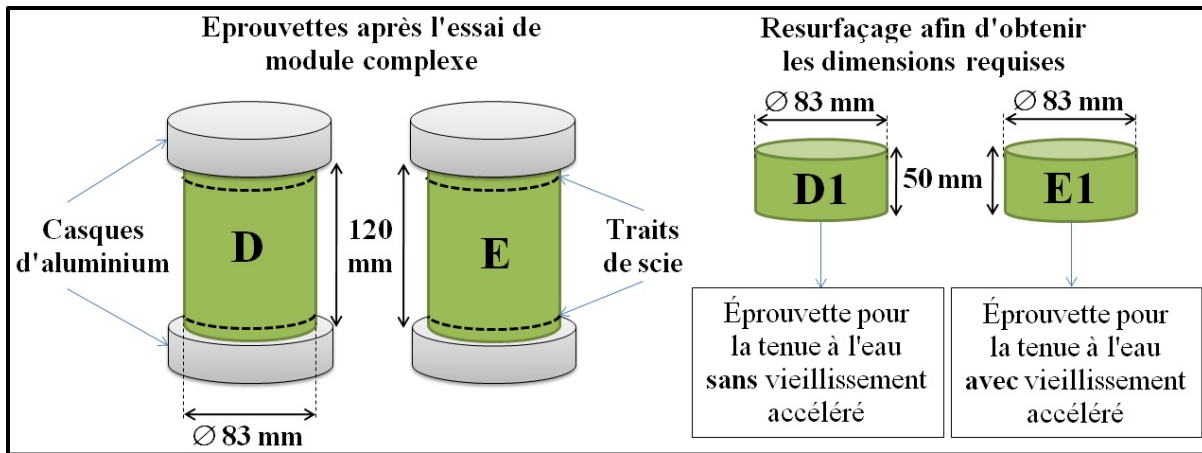


Figure 3.22 Transformation des éprouvettes ayant servi à un essai de module complexe en éprouvettes pour réaliser l'essai de la tenue à l'eau

En raison du resurfaçage réalisé sur les éprouvettes de module complexe après sciage, une seule éprouvette pour la mesure de la tenue à l'eau pouvait être récupérée. Donc, à partir des deux éprouvettes pour la mesure des modules complexes pour chacun des enrobés (D et E), il a été possible d'obtenir deux éprouvettes représentatives pour la mesure de la tenue à l'eau (D1 et E1).

En complément, il a été convenu d'utiliser les briquettes compactées à la presse à cisaillement giratoire pour obtenir une autre paire d'éprouvettes pour la mesure de la tenue à l'eau (*Voir* Figure 3.23). Effectivement, pour chacun des enrobés formulés en laboratoire, une briquette de pcg de 150 mm de diamètre a été confectionnée. Il a donc été possible de les carotter à un diamètre de 83 mm pour ainsi obtenir deux nouvelles éprouvettes pouvant servir à la mesure de la tenue à l'eau.

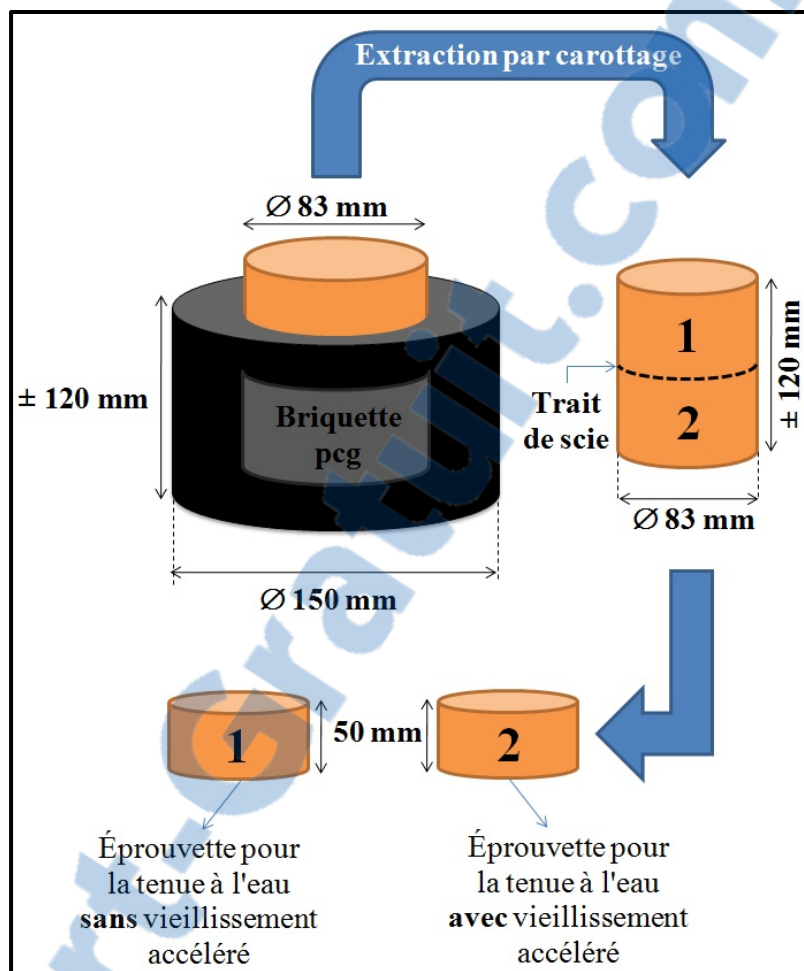


Figure 3.23 Transformation de la brique pcg d'un enrobé en deux éprouvettes pour l'essai de la tenue à l'eau

Il est important de souligner que selon la méthode d'essai de la mesure de la tenue à l'eau, une variation de résistance entre deux éprouvettes sujettes à deux modes de conditionnement différents (avec ou sans vieillissement accéléré) est appliquée. Par conséquent, les deux éprouvettes provenant des éprouvettes de module complexe ont été jumelées et les deux éprouvettes tirées de la brique de pcg ont également été jumelées.

3.3.3 Caractéristiques physiques des éprouvettes

Les Tableaux 3.12 à 3.17 regroupent l'ensemble des caractéristiques physiques et les propriétés de toutes les éprouvettes qui ont servi à réaliser les essais de retrait thermique empêché, de module complexe et de tenue à l'eau.

Tableau 3.12 Propriétés physiques des éprouvettes pour les essais de retrait thermique empêché (TSRST) pour les enrobés de surface (ESG-10)

Type d'enrobé	% Bitume d'ajout	d _{mm}	# Éch.	Hauteur ^A (mm)	Diamètre ^A (mm)	Masse (g)	d _{mb} ^B	Vi (%)
ESG10-B0	5,65	2,478	A	242,8	58,9	1515,2	2,293	7,5
			B	241,0	58,8	1497,8	2,288	7,7
			C	240,0	58,8	1482,1	2,276	8,2
ESG10-B3-0	5,65	2,443	A	240,2	58,5	1527,1	2,368	3,1
			B	239,4	58,5	1515,4	2,355	3,6
			C	239,6	58,5	1488,0	2,309	5,5
ESG10-B3-20	5,53	2,453	A	236,6	58,5	1479,9	2,317	5,5
			B	236,4	58,5	1474,6	2,319	5,5
			C	233,8	58,5	1436,9	2,284	6,9
ESG10-B3-40	5,41	2,466	A	222,8	58,5	1383,4	2,308	6,4
			B	243,0	58,5	1514,7	2,318	6,0
			C	242,3	58,5	1503,1	2,309	6,4
ESG10-B3-60	5,29	2,469	A	243,4	58,6	1517,6	2,315	6,3
			B	241,3	58,6	1490,5	2,294	7,1
			C	240,4	58,6	1487,7	2,298	6,9

^A Moyenne de trois valeurs espacées l'une de l'autre à 120°

^B Établie à partir des mesures géométriques de l'éprouvette

Tableau 3.13 Propriétés physiques des éprouvettes pour les essais de retrait thermique empêché (TSRST) pour les enrobés de base (GB-20)

Type d'enrobé	% Bitume d'ajout	d _{mm}	# Éch.	Hauteur ^A (mm)	Diamètre ^A (mm)	Masse (g)	d _{mb} ^B	Vi (%)
GB20-B0	4,77	2,503	A	244,9	58,8	1595,0	2,395	3,9
			B	241,6	58,8	1589,0	2,424	2,7
			C	241,9	58,8	1572,0	2,393	3,9
GB20-B5-0	4,77	2,492	A	242,2	58,4	1566,2	2,418	3,0
			B	243,0	58,4	1567,3	2,410	3,3
			C	227,1	58,4	1444,3	2,375	4,7
GB20-B5-20	4,57	2,490	A	236,6	58,4	1521,9	2,402	3,1
			B	238,1	58,4	1539,3	2,416	2,5
			C	Non utilisable				
GB20-B5-40	4,37	2,492	A	243,6	58,9	1541,9	2,327	6,6
			B	242,6	58,8	1521,7	2,307	7,4
			C	240,3	58,8	1523,6	2,331	6,5
GB20-B5-60	4,17	2,491	A	230,6	58,8	1510,4	2,409	3,3
			B	233,1	58,8	1533,0	2,422	2,8
			C	Non utilisable				

^A Moyenne de trois valeurs espacées l'une de l'autre à 120°

^B Établie à partir des mesures géométriques de l'éprouvette

Tableau 3.14 Propriétés physiques des éprouvettes pour les essais de module complexe pour les enrobés de surface (ESG-10)

Type d'enrobé	% Bitume d'ajout	d _{mm}	# Éch.	Hauteur ^A (mm)	Diamètre ^A (mm)	Masse (g)	d _{mb} ^B	Vi (%)
ESG10-B0	5,65	2,478	D	118,5	83,8	1482,1	2,267	8,5
			E	117,2	83,8	1456,2	2,256	9,0
ESG10-B0-0	5,65	2,443	D	114,1	83,3	1436,8	2,313	5,3
			E	116,8	83,2	1485,1	2,337	4,3
ESG10-B0-20	5,53	2,453	D	119,5	83,3	1540,6	2,365	3,6
			E	114,4	83,3	1428,2	2,294	6,5
ESG10-B0-40	5,41	2,466	D	114,5	83,2	1487,2	2,387	3,2
			E	113,4	83,2	1426,8	2,313	6,2
ESG10-B0-60	5,29	2,469	D	117,8	83,3	1502,7	2,343	5,1
			E	119,3	83,3	1484,0	2,284	7,5

^A Moyenne de trois valeurs espacées l'une de l'autre à 120°

^B Établie à partir des mesures géométriques de l'éprouvette

Tableau 3.15 Propriétés physiques des éprouvettes pour les essais de module complexe pour les enrobés de base (GB-20)

Type d'enrobé	% Bitume d'ajout	d _{mm}	# Éch.	Hauteur ^A (mm)	Diamètre ^A (mm)	Masse (g)	d _{mb} ^B	Vi (%)
GB20-B0	4,77	2,503	D	121,0	83,8	1605,0	2,406	3,4
			E	117,3	83,8	1557,0	2,404	3,5
GB20-B5-0	4,77	2,492	D	116,1	83,1	1511,4	2,399	3,8
			E	115,0	83,2	1512,3	2,421	2,9
GB20-B5-20	4,57	2,490	D	113,9	83,2	1483,5	2,399	3,2
			E	113,3	83,2	1473,6	2,393	3,4
GB20-B5-40	4,37	2,492	D	105,2	83,7	1335,3	2,309	7,3
			E	111,6	83,9	1445,2	2,342	6,0
GB20-B5-60	4,17	2,491	D	118,6	83,8	1578,9	2,443	3,1
			E	115,9	83,8	1531,4	2,396	3,8

^A Moyenne de trois valeurs espacées l'une de l'autre à 120°

^B Établie à partir des mesures géométriques de l'éprouvette

Tableau 3.16 Propriétés physiques des éprouvettes pour l'essai de la tenue à l'eau pour les enrobés de surface (ESG-10) provenant des éprouvettes de module complexe et de la presse à cisaillement giratoire

	Type d'enrobé	% Bitume d'ajout	# Éch.	Hauteur ^A (mm)	Diamètre ^A (mm)	Masse (g)	d _{mb} ^B	Vi (%)
Module complexe	ESG10-B0	5,65	D1	53,8	83,8	702,0	2,365	5,1
			E1	52,9	83,8	684,5	2,345	5,9
	ESG10-B3-0	5,65	D1	58,0	83,3	726,7	2,303	7,6
			E1	55,8	83,2	708,7	2,336	6,3
	ESG10-B3-20	5,53	D1	58,8	83,3	757,9	2,365	4,6
			E1	61,1	83,3	767,4	2,306	7,0
	ESG10-B3-40	5,41	D1	58,4	83,2	756,2	2,381	4,4
			E1	58,6	83,2	745,5	2,337	6,2
	ESG10-B3-60	5,29	D1	59,4	83,3	742,0	2,296	7,8
			E1	60,0	83,3	747,3	2,288	8,2
Presse à cisaillement giratoire	ESG10-B0	5,65	1	58,5	83,8	778,4	2,415	3,2
			2	51,2	84,0	675,5	2,384	4,3
	ESG10-B3-0	5,65	1	52,0	83,3	687,3	2,427	2,6
			2	54,1	83,2	708,7	2,411	3,2
	ESG10-B3-20	5,53	1	52,1	83,3	683,4	2,408	2,8
			2	56,2	83,3	725,0	2,365	4,5
	ESG10-B3-40	5,41	1	55,9	83,3	729,6	2,396	3,9
			2	55,1	83,5	727,4	2,410	3,3
	ESG10-B3-60	5,29	1	51,5	83,3	679,1	2,424	2,7
			2	51,1	83,3	674,0	2,422	2,8

^A Moyenne de trois valeurs espacées l'une de l'autre à 120°

^B Établie à partir des mesures géométriques de l'éprouvette

Tableau 3.17 Propriétés des éprouvettes pour l'essai de la tenue à l'eau pour les enrobés de base (GB-20) provenant des éprouvettes de module complexe et de la presse à cisaillement giratoire

	Type d'enrobé	% Bitume d'ajout	# Éch.	Hauteur ^A (mm)	Diamètre ^A (mm)	Masse (g)	d _{mb} ^B	Vi (%)
Module complexe	GB20-B0	4,77	D1	58,7	83,8	777,5	2,404	3,5
			E1	58,8	83,8	785,6	2,421	2,8
	GB20-B5-0	4,77	D1	59,6	83,1	789,6	2,440	2,1
			E1	59,5	83,2	781,8	2,417	3,0
	GB20-B5-20	4,57	D1	57,6	83,2	746,7	2,387	3,7
			E1	60,2	83,2	784,0	2,395	3,4
	GB20-B5-40	4,37	D1	59,8	83,7	772,1	2,349	5,8
			E1	55,4	83,9	715,9	2,339	6,2
	GB20-B5-60	4,17	D1	59,6	83,8	789,9	2,403	3,5
			E1	57,5	83,8	765,8	2,415	3,1
Presse à cisaillement giratoire	GB20-B0	4,77	1	54,6	83,2	714,2	2,404	3,5
			2	54,5	82,3	704,5	2,431	2,4
	GB20-B5-0	4,77	1	54,7	83,2	715,1	2,407	3,4
			2	54,2	83,2	706,0	2,400	3,7
	GB20-B5-20	4,57	1	54,0	83,4	711,4	2,409	2,8
			2	54,1	83,5	710,1	2,401	3,1
	GB20-B5-40	4,37	1	54,2	83,7	718,4	2,410	3,3
			2	54,2	83,5	716,9	2,418	3,0
	GB20-B5-60	4,17	1	54,3	83,8	725,0	2,422	2,8
			2	54,3	83,8	728,4	2,435	2,3

^A Moyenne de trois valeurs espacées l'une de l'autre à 120°

^B Établie à partir des mesures géométriques de l'éprouvette

En analysant la teneur en vides des différentes enrobés, on constate que dans certains cas il y a une variabilité importante entre les différentes éprouvettes d'un même lot d'enrobé. Cette information devra être prise en compte lors de la réalisation des essais et particulièrement lors de l'analyse des résultats. À noter que deux éprouvettes de retrait thermique empêché (GB20-B5-20-C et GB20-B5-60-C) présentaient des pourcentages de vides anormalement élevés, des dégradations étaient également visibles sur ces éprouvettes. Pour ces raisons, ces deux éprouvettes n'ont pas été retenues pour la réalisation des essais.

Finalement, il est important de noter que les pourcentages de vides calculés représentent une valeur globale de chaque éprouvette ne permettant pas de cerner les écarts dans chacune des éprouvettes en fonction de l'axe longitudinal.

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Afin d'étudier l'effet de la réduction de la teneur en bitume d'ajout des enrobés incorporant des particules de bardeaux, trois niveaux d'essais ont été réalisés en laboratoire pour les deux familles d'enrobés considérées (ESG-10 et GB-20) : les essais de formulation (d_{mm} et pcg); les essais thermomécaniques (orniérage, TSRST et E^*) et finalement, un essai de durabilité (tenue à l'eau).

Dans ce chapitre, les résultats des essais sont présentés. De plus, une brève analyse est proposée, tant pour l'enrobé de surface que pour l'enrobé de base, en comparant les performances d'un enrobé de référence à celles des enrobés incorporant des bardeaux en ne considérant aucune mobilisation du bitume des bardeaux. C'est donc dire que l'enrobé ESG10-B0 sera comparé au ESG10-B3-0, alors que les résultats du GB20-B0 sera comparé à ceux du GB20-B5-0. Ces comparaisons serviront de base pour l'analyse détaillée qui sera élaborée au chapitre suivant.

Pour chacun des essais, les résultats seront présentés dans un premier temps pour l'enrobé de surface (ESG-10) et, dans un deuxième temps, pour l'enrobé de base (GB-20).

4.1 Essais de formulation

Pour tout nouvel enrobé réalisé en laboratoire, des essais de formulation (*mix design*) doivent être réalisés. La détermination de la densité maximale (d_{mm}) et l'essai à la presse à cisaillement giratoire (pcg) se doivent d'être effectués, et ce, en début de projet puisqu'ils servent de critères de formulation. Les résultats obtenus pour les essais de d_{mm} et de pcg sont ici présentés.

4.1.1 Densité maximale du mélange (d_{mm})

Cette donnée, établie en laboratoire, était cruciale pour la réalisation de la majorité des essais. Deux essais de la mesure de la d_{mm} pour chacun des enrobés ont été réalisés. Les résultats moyens pour l'ensemble des enrobés analysés sont présentés au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Résultats des différents enrobés pour la densité du mélange maximale

ENROBÉS DE SURFACE			ENROBÉ DE BASE		
Type d'enrobé	% bitume d'ajout	d_{mm}	Type d'enrobé	% bitume d'ajout	d_{mm}
ESG10-B0	5,65	2,478	GB20-B0	4,77	2,503
ESG10-B3-0	5,65	2,443	GB20-B5-0	4,77	2,492
ESG10-B3-20	5,53	2,453	GB20-B5-20	4,57	2,490
ESG10-B3-40	5,41	2,466	GB20-B5-40	4,37	2,492
ESG10-B3-60	5,29	2,469	GB20-B5-60	4,17	2,491

En ce qui concerne les résultats de l'enrobé de surface, lorsque l'on s'attarde aux résultats de l'enrobé de référence (ESG10-B0) et à l'enrobé ne considérant aucune mobilisation du bitume des bardeaux (ESG10-B3-0), on constate que l'ajout de bardeaux dans l'enrobé apporte une diminution considérable de 0,035 de la densité maximale. Ceci est dû au fait qu'en ajoutant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, la quantité de granulat de classe 0-5 a été diminuée. Ces granulats possédant une densité plus élevée que les particules de bardeaux explique pourquoi l'enrobé de référence, sans bardeau, offre une densité maximale plus élevée que l'enrobé avec bardeau.

Concernant l'enrobé de base, la même constatation peut être faite entre l'enrobé de référence (GB20-B0) et l'enrobé avec la même quantité de bitume d'ajout (GB20-B5-0). La raison mentionnée dans le cas des enrobés de surface est également valable dans ce cas-ci.

4.1.2 Presse à cisaillement giratoire (pcg)

Suite à l'essai de la densité maximale, l'essai à la presse à cisaillement giratoire a été réalisé sur l'ensemble des enrobés. Pour chacun des enrobés, deux essais à la pcg ont été réalisés en laboratoire. Les résultats de ces essais nous permettent d'évaluer l'aptitude au compactage de l'enrobé. L'essai à la pcg permet de s'assurer que les enrobés testés sont conformes aux exigences du ministère des Transports du Québec pour l'application visée.

4.1.2.1 Enrobé de surface : ESG-10

Les résultats obtenus à la pcg pour les cinq enrobés de surface confectionnés en laboratoire sont présentés au Tableau 4.2. Dans ce tableau, les valeurs individuelles pour chacun des essais sont inscrites ainsi que la moyenne calculée. Étant donné que deux essais ont été réalisés pour tous les enrobés, il est important de noter que dans tous les cas la valeur maximale admise dans la méthode d'essai du MTQ (LC 26-003, Voir Annexe XIV) concernant la répétabilité entre deux essais réalisés par un même opérateur fixée à 0,7 pour un nombre de girations supérieur ou égal à 20, n'a pas été dépassée.

Tableau 4.2 Résultats obtenus à la pcg pour les différents enrobés de surface (ESG-10)

ENROBÉ	BITUME D'AJOUT (%)	#	POURCENTAGE (%) DE VIDES À N GIRATIONS (ng)		
			10	80	200
			EXIGENCES DE LA NORME DU MTQ 4202		
			≥ 11 %	4 à 7 %	≥ 2 %
ESG10-B0	5,65	1	14,1	6,8	4,0
		2	13,7	6,4	4,0
		Moy.	13,9	6,6	4,0
ESG10-B3-0	5,65	1	11,1	4,1	3,8
		2	11,0	4,0	3,4
		Moy.	11,1	4,1	3,6
ESG10-B3-20	5,53	1	11,5	4,1	3,1
		2	12,3	4,5	2,9
		Moy.	11,9	4,3	3,0
ESG10-B3-40	5,41	1	13,4	6,9	4,9
		2	12,6	6,5	4,7
		Moy.	13,0	6,7	4,8
ESG10-B3-60	5,29	1	14,8	6,1	4,4
		2	14,2	6,1	4,5
		Moy.	14,5	6,1	4,5

Étant donné que la teneur en bitume dans la composition de l'enrobé de référence (ESG10-B0) est identique à celle de l'enrobé ESG10-B3-0 (comportant 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation), leur résultat à la pcg ont été comparés graphiquement (Voir Figure 4.1).

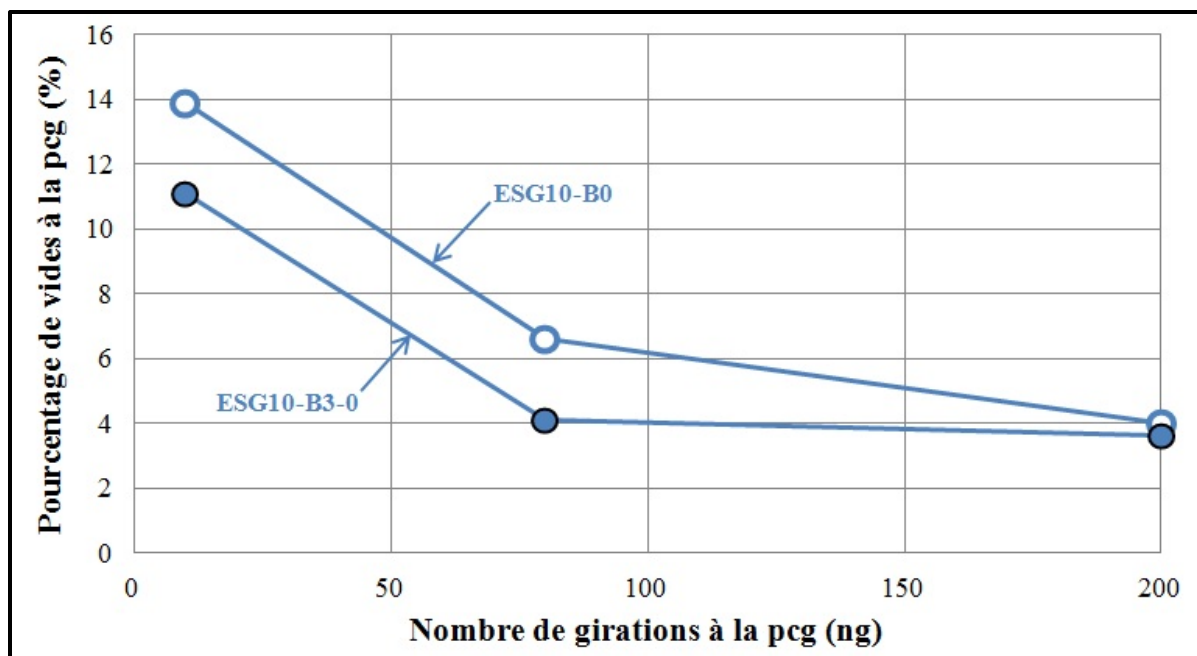


Figure 4.1 Comparatif des résultats à la pcg des enrobés de surface ESG10-B0 et ESG10-B3-0 (bitume d'ajout de 5,65 %)

Il est montré dans ce graphique, que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans un enrobé de surface contribue à diminuer le pourcentage de vides tout au long de la réalisation de l'essai à la pcg, facilitant donc la mise en œuvre de l'enrobé.

4.1.2.2 Enrobé de base : GB-20

Pour les cinq enrobés de base, les résultats obtenus à la pcg sont présentés au Tableau 4.3. Dans tous les cas, deux essais ont été réalisés et les valeurs de chacun d'eux sont inscrites dans ce tableau ainsi que la moyenne correspondante. À noter que dans tous les cas, la répétabilité admise par le MTQ entre deux essais effectués par un même opérateur a une fois de plus été respectée. À noter que, tel que mentionné à la section 2.2.1.2, pour un enrobé de type GB-20 l'exigence du MTQ à n_{design} est différent de celui pour un enrobé de type ESG-10, passant de 120 girations comparativement à 80.



Tableau 4.3 Résultats obtenus à la pcg pour les différents enrobés de base (GB-20)

ENROBÉ	BITUME D'AJOUT (%)	#	POURCENTAGE (%) DE VIDES À N GIRATIONS (ng)		
			10	120	200
			EXIGENCES DE LA NORME DU MTQ 4202		
			≥ 11 %	4 à 7 %	≥ 2 %
GB20-B0	4,77	1	14,7	6,2	3,9
		2	15,3	5,8	3,7
		Moy.	15,0	6,0	3,8
GB20-B5-0	4,77	1	12,0	5,0	3,1
		2	11,6	4,7	3,0
		Moy.	11,8	4,9	3,1
GB20-B5-20	4,57	1	13,7	5,9	4,1
		2	14,5	6,0	4,1
		Moy.	14,1	6,0	4,1
GB20-B5-40	4,37	1	15,0	6,0	3,4
		2	14,5	5,7	3,5
		Moy.	14,8	5,9	3,5
GB20-B5-60	4,17	1	15,9	6,3	5,0
		2	15,7	6,3	5,1
		Moy.	15,8	6,3	5,1

Les résultats à la pcg pour l'enrobé de base de référence (GB20-B0) a été comparé (*Voir* Figure 4.2) à ceux de l'enrobé ayant le même pourcentage de bitume, c'est-à-dire, l'enrobé GB20-5B-0 (comportant 5 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation).

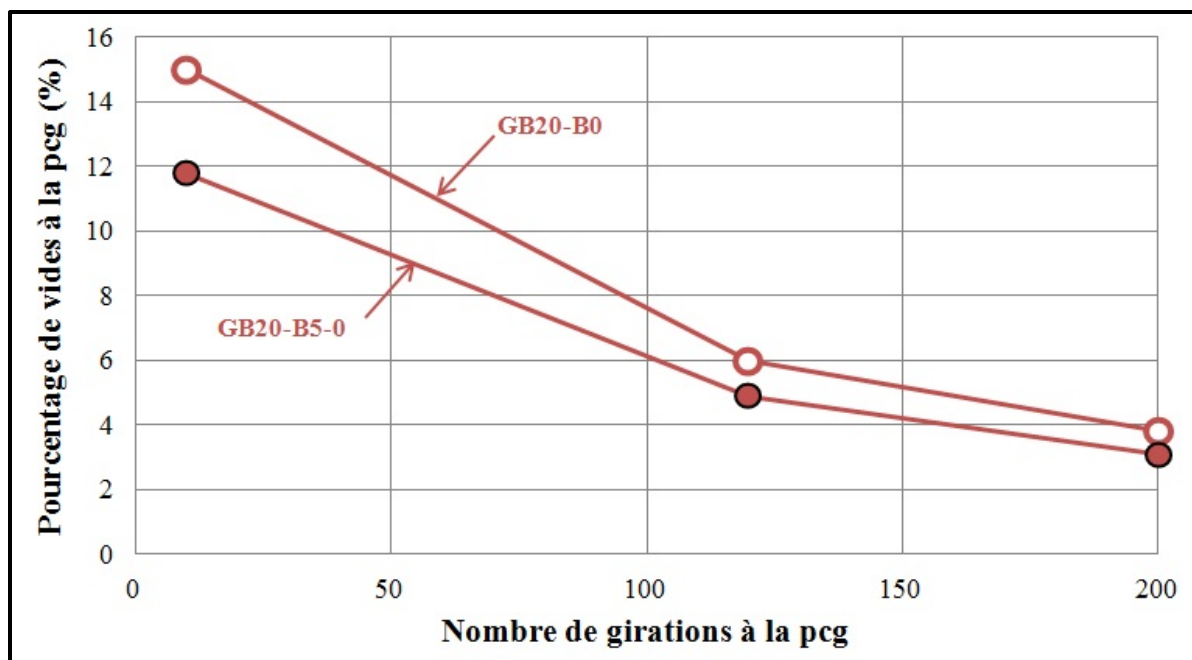


Figure 4.2 Comparatif des résultats à la pcg des enrobés de base GB20-B0 et GB20-B5-0 (bitume d'ajout de 4,77 %)

Sur ce dernier graphique, il est montré que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans un enrobé de base contribue à diminuer le pourcentage de vides durant la réalisation de l'essai à la pcg, tout comme l'essai réalisé sur les enrobés de surface. Ceci signifie donc encore une fois que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation contribue à augmenter l'aptitude au compactage de l'enrobé. Ces diminutions pourraient être dues au fait que pour les enrobés incorporant des particules de bardeau d'asphalte de postconsommation la quantité de granulats de calibre 0-5 a dû être diminuée comparativement aux enrobés de référence.

Il est à noter que même si une diminution des vides est notée, les exigences du MTQ sont tout de même respectées. En ce qui concerne les résultats des autres enrobés avec particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, l'analyse sera réalisée au chapitre suivant.

4.2 Essais thermomécaniques

Suite aux essais de formulation, les essais thermomécaniques ont pu être réalisés. Ce type d'essai comprend la mesure de la résistance à l'orniérage, la mesure du retrait thermique empêché et la mesure du module complexe. C'est essentiellement avec les résultats de ces essais qu'il sera possible de cerner l'effet qu'a l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans un enrobé bitumineux sur ses performances.

4.2.1 Orniérage

À l'aide de l'orniéreur MLPC, l'évolution de la résistance à l'orniérage a été déterminée pour tous les enrobés. Deux plaques ont été testées pour chacun des enrobés. La teneur en vides de celle-ci est une donnée importante qui peut avoir une incidence marquée sur l'analyse des résultats. Dans cette optique, le pourcentage de vides a été déterminé pour chacune des plaques par pesée hydrostatique après compactage en considérant la densité maximale (d_{mm}) de l'enrobé.

4.2.1.1 Enrobé de surface : ESG-10

Dans le cas des cinq enrobés de surface confectionnés, les résultats obtenus à l'orniéreur ont été regroupés au Tableau 4.4. Les résultats de chacune des plaques sont inscrits à ce tableau, la moyenne du résultat des deux plaques y est également ajoutée et c'est cette valeur qui sera considérée lors de l'analyse. Le pourcentage de vides des plaques y est également indiqué.

À noter que dans la norme en vigueur du MTQ concernant les enrobés de surface de type ESG-10, trois exigences sont à prendre en considération. En premier lieu, après 1 000 cycles, le pourcentage d'ornières doit être inférieur à 10 %, alors qu'après 3 000 cycles, le pourcentage ne doit pas excéder 20 %. Finalement, les plaques doivent être exemptes de ressuage après 10 000 cycles.

Tableau 4.4 Résultats du pourcentage d'ornières pour les différents enrobés de surface (ESG-10)

Enrobé	Bitume d'ajout (%)	#	Vi ^A (%)	% d'ornières			
				1 000 cycles	3 000 cycles	10 000 cycles	30 000 cycles
ESG10-B0	5,65	1	7,3	1,8	2,2	3,3	4,2
		2	7,5	1,8	2,9	3,8	4,8
		Moy.	7,4	1,8	2,6	3,6	4,5
ESG10-B3-0	5,65	1	- ^B	2,2	3,4	4,3	4,8
		2	- ^B	1,9	2,9	3,6	4,0
		Moy.	- ^B	2,1	3,1	4,0	4,4
ESG10-B3-20	5,53	1	7,9	2,9	3,7	4,5	5,5
		2	8,5	2,3	3,1	3,9	5,0
		Moy.	8,2	2,6	3,4	4,2	5,2
ESG10-B3-40	5,41	1	6,3	2,8	2,9	3,8	4,1
		2	6,0	2,3	3,4	3,8	4,4
		Moy.	6,2	2,5	3,1	3,8	4,3
ESG10-B3-60	5,29	1	7,9	1,7	2,3	2,9	3,5
		2	7,6	1,4	1,9	2,5	2,9
		Moy.	7,8	1,6	2,1	2,7	3,2

^A Déterminé par pesée hydrostatique sur les plaques compactées

^B Pour les éprouvettes de l'enrobé ESG10-B0, la teneur en vides n'a pas été déterminée.

Afin de montrer l'évolution de l'orniérage des différents enrobés de surface testés, la Figure 4.3 illustre les résultats à 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 cycles pour tous les enrobés de surface. Dans le but d'alléger ce graphique, pour chacun des enrobés, la moyenne du pourcentage d'ornières des deux éprouvettes a été utilisée pour tracer les courbes. Les exigences du MTQ ont été ajoutées au graphique de gauche aux fins d'analyse. À noter que dans tous les cas, aucune présence de ressuage n'a été décelée.

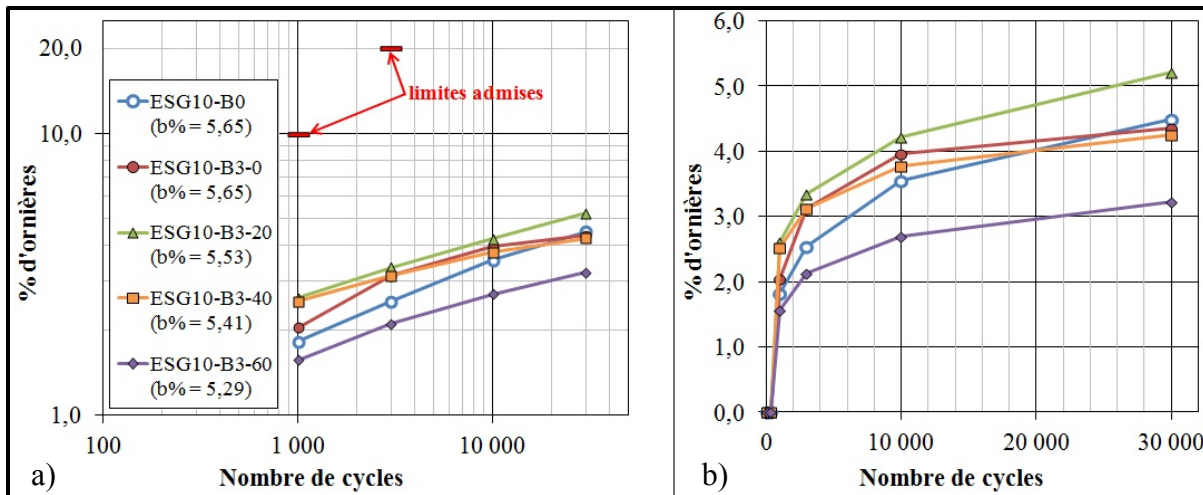


Figure 4.3 Évolution du pourcentage d'ornières³ pour les enrobés de surface selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%) avec :
a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques

À la suite des observations de la Figure 4.3, il est possible d'affirmer que l'ajout de particules de bardeaux de postconsommation dans les enrobés de surface, à teneur de 3 %, n'affecte pas les performances de l'enrobé au point de vue de la résistance à l'orniérage, car les résultats obtenus sont inférieurs aux exigences du MTQ. L'analyse complète de ces résultats sera élaborée au chapitre suivant. Par contre, aux fins de comparaison entre l'enrobé de référence (ESG10-B0) et l'enrobé de surface ayant le même taux de bitume d'ajout et 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation (ESG10-B3-0), leurs résultats sont présentés au graphique suivant. (Voir Figure 4.4).

³ La température de l'essai a été fixée à 60 ± 2 °C pour tous les enrobés testés tel que spécifié dans la méthode d'essai LC 26-410

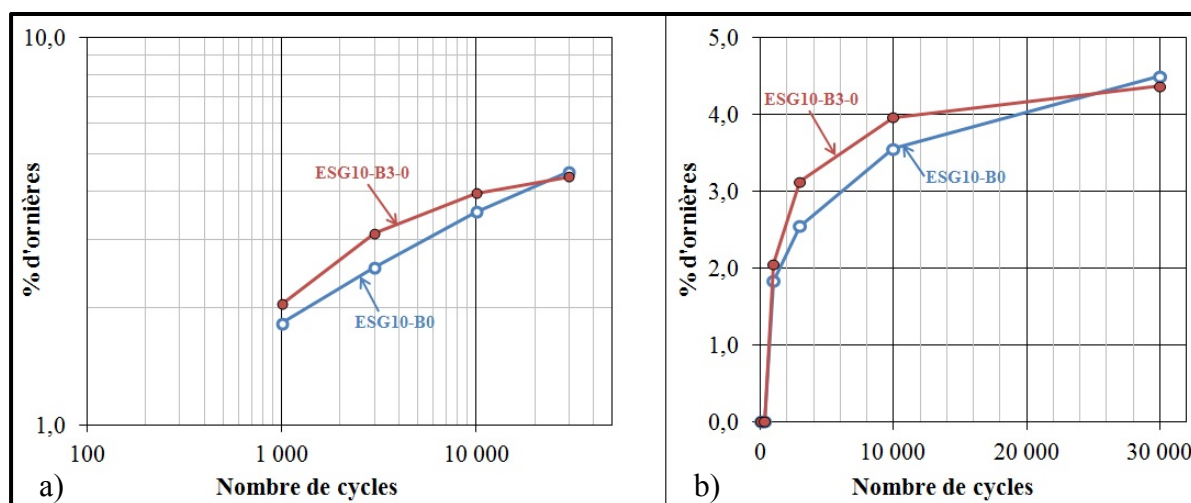


Figure 4.4 Comparaison de l'évolution du pourcentage d'ornières durant l'essai⁴ pour les enrobés de surface ESG10-B0 et ESG10-B3-0 (bitume d'ajout de 5,65 %) avec :
a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques

Lors de l'analyse des deux critères du MTQ, soit après 1 000 et 3 000 cycles, l'enrobé de référence présente légèrement de meilleurs résultats. Aux fins d'analyse, l'essai a été poursuivi jusqu'à 30 000 cycles. Après cette durée, les deux enrobés ont pratiquement le même pourcentage d'ornièr, voir même que l'enrobé comportant 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation (ESG10-B3-0) offre une meilleure performance que l'enrobé de référence. C'est donc dire que les deux enrobés, avec et sans bardeaux, semblent se comporter essentiellement de la même façon vis-à-vis de la performance à l'orniérage.

4.2.1.2 Enrobé de base : GB-20

En ce qui concerne les cinq différents enrobés de base, les résultats obtenus à l'orniérage sont présentés au Tableau 4.5. Pour tous les enrobés, également deux plaques ont été analysées et les résultats individuels et la moyenne de ces deux plaques sont inscrits dans ce tableau.

⁴ La température de l'essai a été fixée à 60 ± 2 °C pour tous les enrobés testés tel que spécifié dans la méthode d'essai LC 26-410

Dans la norme du MTQ, concernant les enrobés de base de type GB-20, l'exigence à prendre en considération est après 30 000 cycles. Le pourcentage d'ornières, suite à ce nombre de passages du pneumatique, doit être inférieur à 10 %. Tout comme dans le cas des enrobés de surface, les plaques soumises à l'essai à l'orniéreur doivent être exemptes de ressuage, mais dans le cas des enrobés de base cette observation se fait après 30 000 cycles.

Tableau 4.5 Résultats du pourcentage d'ornières pour les différents enrobés de base (GB-20)

Enrobé	Bitume d'ajout (%)	#	Vi ^A (%)	% d'ornières			
				1 000 cycles	3 000 cycles	10 000 cycles	30 000 cycles
GB20-B0	4,77	1	4,4	2,68	3,61	4,56	5,29
		2	4,3	2,29	3,10	3,51	3,96
		Moy.	4,4	2,49	3,35	4,40	4,63
GB20-B5-0	4,77	1	4,4	3,05	3,86	4,83	5,57
		2	5,0	2,52	3,07	3,59	4,01
		Moy.	4,7	2,79	3,47	4,21	4,79
GB20-B5-20	4,57	1	5,7	1,81	2,20	2,60	3,22
		2	5,7	1,61	1,94	2,29	2,67
		Moy.	5,7	1,71	2,07	2,45	2,95
GB20-B5-40	4,37	1	5,1	1,99	2,50	2,87	3,21
		2	5,0	2,40	2,98	3,44	3,91
		Moy.	5,1	2,20	2,74	3,16	3,56
GB20-B5-60	4,17	1	6,8	1,16	1,46	1,74	1,97
		2	6,5	1,29	1,56	1,89	2,10
		Moy.	6,7	1,23	1,51	1,82	2,04

^A Déterminé par pesée hydrostatique sur les plaques compactées

À la Figure 4.5, l'évolution des résultats à 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 cycles à l'essai de l'orniéreur est illustrée pour tous les enrobés de base. Les résultats apparaissant sur ce graphique sont les moyennes du résultat des deux plaques pour chacun des enrobés. À noter qu'aucune plaque n'a présentée de ressuage.

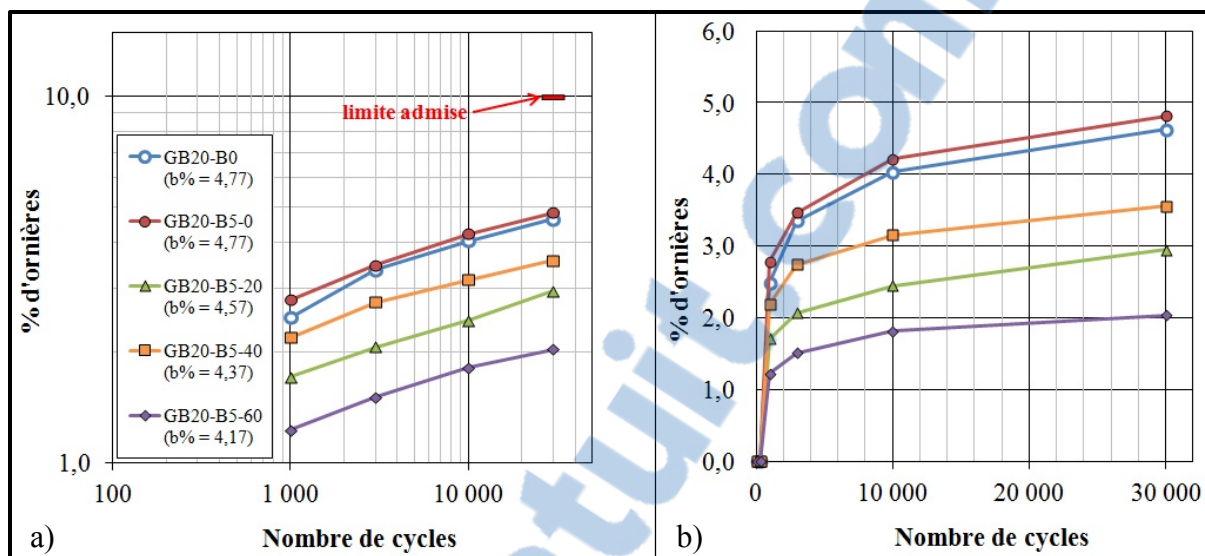


Figure 4.5 Évolution du pourcentage d'ornières⁵ pour les enrobés de base selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%) avec :
a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques

Au regard de ces graphiques, tout comme dans le cas des enrobés de surface, chacun d'eux est largement inférieur à l'exigence. De plus, l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, à teneur de 5 %, n'affecte pas les performances de l'enrobé au point de vue de la résistance à l'orniérage. Il sera mis en perspective, au chapitre suivant, l'effet de l'ajout des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés de base sur la performance à l'orniérage de l'enrobé. Alors qu'ici, les résultats de l'enrobé de référence (GB20-B0) et l'enrobé de base ayant le même taux de bitume d'ajout et 5 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation (GB20-B5-0), sont présentés au graphique suivant. (Voir Figure 4.6).

⁵ La température de l'essai a été fixée à 60 ± 2 °C pour tous les enrobés testés tel que spécifié dans la méthode d'essai LC 26-410

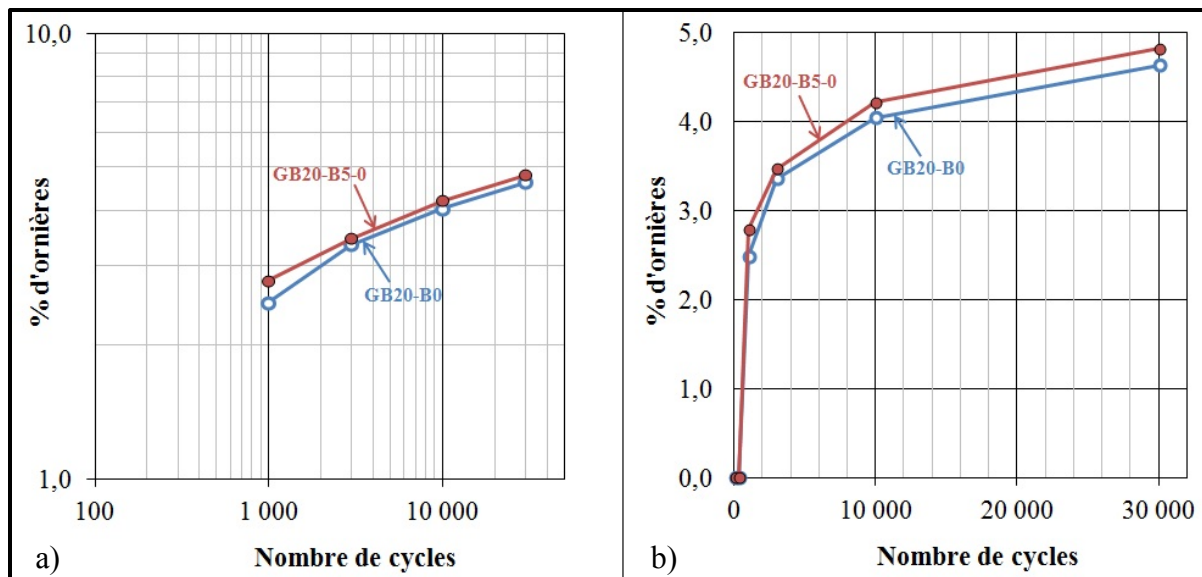


Figure 4.6 Comparaison de l'évolution du pourcentage d'ornières durant l'essai⁶ pour les enrobés de base GB20-B0 et GB20-B5-0 (bitume d'ajout de 4,77 %) avec :
a) des échelles logarithmiques et b) des échelles arithmétiques

Dans le cas d'un essai à l'ornièreur sur un enrobé de base, les exigences du MTQ demandent de vérifier le pourcentage d'ornières après 30 000 cycles. Lors de la vérification à ce niveau, les deux enrobés analysés offrent un pourcentage de vides pratiquement identique, l'enrobé de référence offrant tout juste une meilleure résistance à l'orniérage. Il est à noter que pour la durée totale de l'essai, les résultats entre les deux enrobés sont fortement similaires. Lors de l'analyse complète au prochain chapitre, l'influence de l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte dans les enrobés de base sera détaillée, mais à première vue, cet ajout semble tout à fait réalisable vis-à-vis la résistance à l'orniérage.

4.2.2 Retrait thermique empêché (TSRST)

L'essai de retrait thermique empêché (TSRST) permet d'évaluer la performance à basse température d'un enrobé. Pour tous les enrobés, trois éprouvettes ont été préparées en laboratoire pour les essais de TSRST. D'après la norme AASHTO TP10-93 (Annexe X),

⁶ La température de l'essai a été fixée à 60 ± 2 °C pour tous les enrobés testés tel que spécifié dans la méthode d'essai LC 26-410

trois éprouvettes est le nombre minimum pour obtenir des résultats représentatifs. C'est ce qui avait été préparé, cependant étant donné que le plan de carottage était extrêmement serré en raison de la dimension des plaques confectionnées, certains résultats se sont avérés non conformes. Le traitement de ces résultats est présenté à la sous-section suivante.

4.2.2.1 Traitement des résultats des essais jugés non conformes.

En raison de la taille restreinte des plaques et du plan de carottage, dans certains cas, des résultats de TSRST se sont avérés aberrants. Après observations et analyses, il a été déduit que ces résultats étaient essentiellement liés à l'hétérogénéité du matériau aux extrémités des éprouvettes dues notamment à des effets de bout. En effet, suite à l'observation du plan de rupture des éprouvettes ayant présenté des contraintes et des températures de rupture inférieures aux attentes, la présence d'une teneur en vides importante a été constatée. Pour chacun des cas, la zone représentée par la rupture correspondait à l'une des deux extrémités de la plaque lors du carottage. C'est donc dire que lors du carottage, le compactage au pourtour de la plaque n'a pas été atteint à son plein potentiel. Lors du carottage, 10 mm sur le pourtour de la plaque ont été supprimés (*Voir* Figure 3.14), mais cette valeur aurait dû être plus élevée pour s'assurer d'éliminer tout effet de bout. Cependant, d'après le plan de carottage choisi, ceci n'était pas possible, car la longueur des éprouvettes de TSRST aurait considérablement été diminuée et inférieure aux exigences de la norme applicable.

Pour valider notre hypothèse, les éprouvettes ayant présenté des résultats aberrants ont été testées une deuxième fois, mais en réduisant leur longueur effective de 20 à 25 millimètres. Pour ce faire, l'extrémité présentant des vides excessifs a été tronquée. Après avoir collé à nouveau des casques sur les éprouvettes de longueur réduite, l'essai de TSRST a été à nouveau réalisé. Les résultats obtenus ont été très concluants. En effet, l'évolution de la contrainte des éprouvettes tronquées s'avère tout à fait similaire à celle des éprouvettes du même lot et n'ayant pas présentées de résultats aberrants. Un exemple d'éprouvettes ayant présenté de tels résultats est présenté à la Figure 4.7. À noter que les courbes de l'éprouvette ESG10-B3-60-B avant et après être tronquée sont tout à fait superposables indiquant un

comportement similaire. Le fait d'enlever la zone fortement poreuse en bout d'éprouvette permet d'évaluer la performance aux basses températures de l'enrobé.

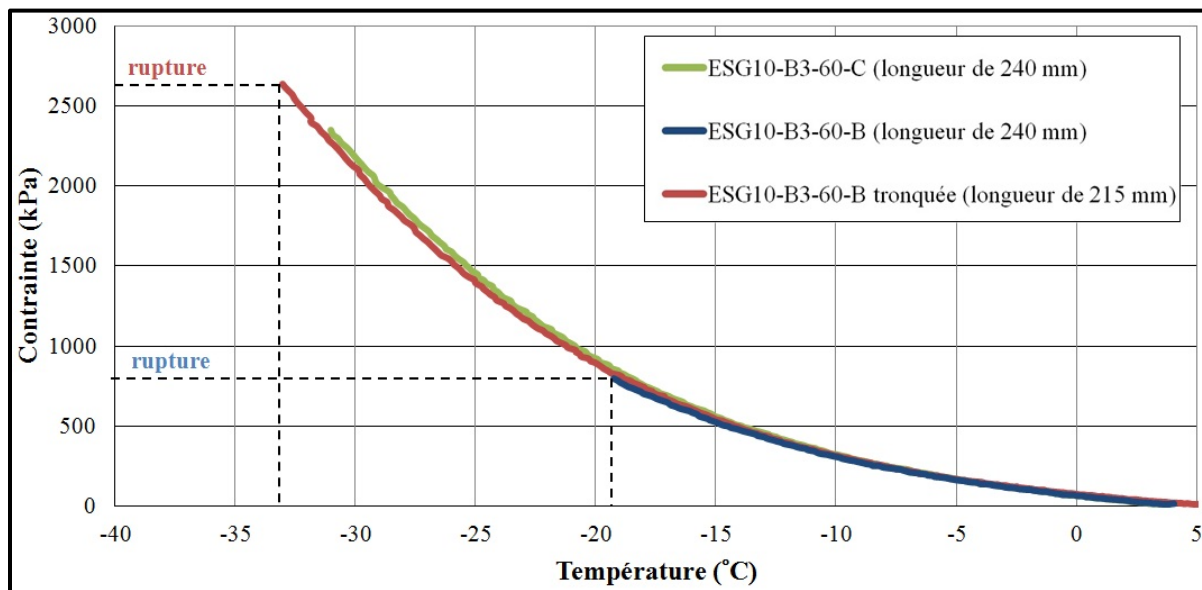


Figure 4.7 Exemple d'un enrobé (ESG10-B3-60) ayant une éprouvette présentant des résultats aberrants et requérant que celle-ci soit tronquée

Il est tout à fait justifié de s'interroger quant à la validité des résultats dus au fait que d'une part des éprouvettes de taille plus courte ont été utilisées que celle prescrite dans la norme AASHTO TP10-93, et d'autre part, du fait que les éprouvettes sont soumises à deux essais de TSRST successivement. En ce qui a trait au fait que l'on teste à deux reprises la même éprouvette (longueur de 240 mm et ensuite longueur de 215 mm) cela ne semble pas constituer un problème. En effet, en comparant l'évolution de la contrainte de rupture, il a été constaté que les courbes des deux essais sont à toute fin superposées (*Voir* Figure 4.7). La rupture prématurée des éprouvettes liée à la présence d'un excès de vides en bout n'est pas en soi préjudiciable pour le cœur de l'éprouvette. D'autre part, Carter *et al.* (2008) a montré que deux éprouvettes d'un même enrobé ayant des longueurs très différentes (120 mm versus 250 mm) présentent des résultats tout à fait comparables au TSRST. Il est donc possible de conclure que la diminution de longueur de certaines éprouvettes, passant de 240 mm à 215 mm, n'induit pas d'effet jugé néfaste sur le résultat. Quoi qu'il en soit, dans la présentation des résultats, les éprouvettes ayant été tronquées sont identifiées d'un astérisque.

4.2.2.2 Enrobé de surface : ESG-10

Les résultats des essais de TSRST pour les enrobés de surface testés sont présentés au Tableau 4.6. Le tableau compile la contrainte de rupture maximale, la force maximale induite à l'éprouvette et la température associée à cette force. De plus, des critères obtenus lors de l'analyse des résultats tels que les températures de transition vitreuse et bissectrice et les pentes sont ajoutés à ce tableau.

Lors de l'analyse des résultats, la valeur de la température basse du bitume utilisé dans la confection des enrobés est importante, servant de référence. Dans ce cas-ci, le même bitume a été utilisé pour tous les enrobés. Les essais de BBR⁷ sur le bitume indiquent que la température basse est de -35,4°C.

⁷ L'essai au BBR se réalise à l'aide du rhéomètre à flexion de poutre afin de mesurer les propriétés du bitume à basse température et est fourni par le manufacturier Bitumar, la fiche signalétique du bitume est présente à l'Annexe III.

Tableau 4.6 Résultats obtenus à l'essai de TSRST pour les enrobés de surface (ESG-10)

Enrobé	Bitume d'ajout (%)	#	Rupture			Vi (%)	T° de transition vitreuse (°C)	T° de transition bissectrice (°C)	Pente #1	Pente #2
			T° (°C)	Contrainte (MPa)	Force (kN)					
ESG10-B0	5,65	A	-34,2	3,40	9,26	7,5	-28,5	-19,4	-0,021	-0,196
		B*	-35,9	3,52	9,80	7,7	-29,9	-20,8	-0,018	-0,205
		C	Éprouvette non retenue pour l'analyse							
		Moy.	-35,0	3,46	9,53	7,6	-29,2	-20,1	-0,019	-0,201
		s	-	-	-	-	-	-	-	-
ESG10-B3-0	5,65	A*	-34,2	3,69	9,78	3,1	-28,5	-20,0	-0,014	-0,160
		B	-34,0	3,32	9,56	3,6	-27,8	-19,7	-0,010	-0,168
		C	Éprouvette non retenue pour l'analyse							
		Moy.	-34,1	3,51	9,67	3,3	-28,2	-19,9	-0,012	-0,164
		s	-	-	-	-	-	-	-	-
ESG10-B3-20	5,53	A*	-35,0	3,14	8,65	5,5	-28,4	-19,1	-0,017	-0,163
		B	-34,2	2,84	7,83	5,5	-28,0	-18,8	-0,020	-0,154
		C*	-36,0	3,34	9,20	6,9	-29,0	-20,3	-0,015	-0,169
		Moy.	-35,1	3,11	8,56	6,0	-28,5	-19,4	-0,017	-0,169
		s	0,9	0,25	0,69	0,8	0,6	0,8	0,003	0,018
ESG10-B3-40	5,41	A	-27,3	2,27	6,23	6,4	-21,9	-14,5	-0,028	-0,142
		B	-30,6	3,07	8,45	6,0	-25,5	-16,3	-0,021	-0,182
		C*	-29,1	2,64	7,27	6,4	-23,6	-16,3	-0,022	-0,166
		Moy.	-29,0	2,66	7,32	6,3	-23,7	-15,7	-0,021	-0,163
		s	1,6	0,40	1,11	0,2	1,8	1,1	0,001	0,020
ESG10-B3-60	5,29	A	-29,8	2,16	5,93	6,3	-25,6	-18,3	-0,015	-0,157
		B*	-31,0	2,35	6,46	7,1	-26,5	-18,1	-0,015	-0,155
		C	-33,1	2,64	7,26	6,9	-27,6	-18,8	-0,012	-0,164
		Moy.	-31,3	2,38	6,55	6,8	-26,6	-18,4	-0,014	-0,159
		s	1,6	0,24	0,67	0,4	1,0	0,4	0,002	0,005

*Éprouvette dont il a été nécessaire de la raccourcir et de refaire l'essai en raison de présence de vides majeurs à l'une des deux extrémités de l'éprouvette

Les résultats présentés au Tableau 4.6 ont également été mis sous forme de graphique (*Voir* Figure 4.8) afin de visualiser les écarts entre les différents enrobés. Sur ce graphique, on retrouve l'évolution de la contrainte par rapport à la baisse de la température. Afin d'alléger le graphique, ce sont les valeurs moyennes des 2 ou 3 éprouvettes pour chacun des enrobés que l'on retrouve sur celui-ci. La température basse du bitume obtenue à l'essai de BBR est aussi ajoutée au graphique. Notons qu'il est d'usage d'observer la rupture à l'essai de TSRST suivant une température avoisinant la température basse du bitume.

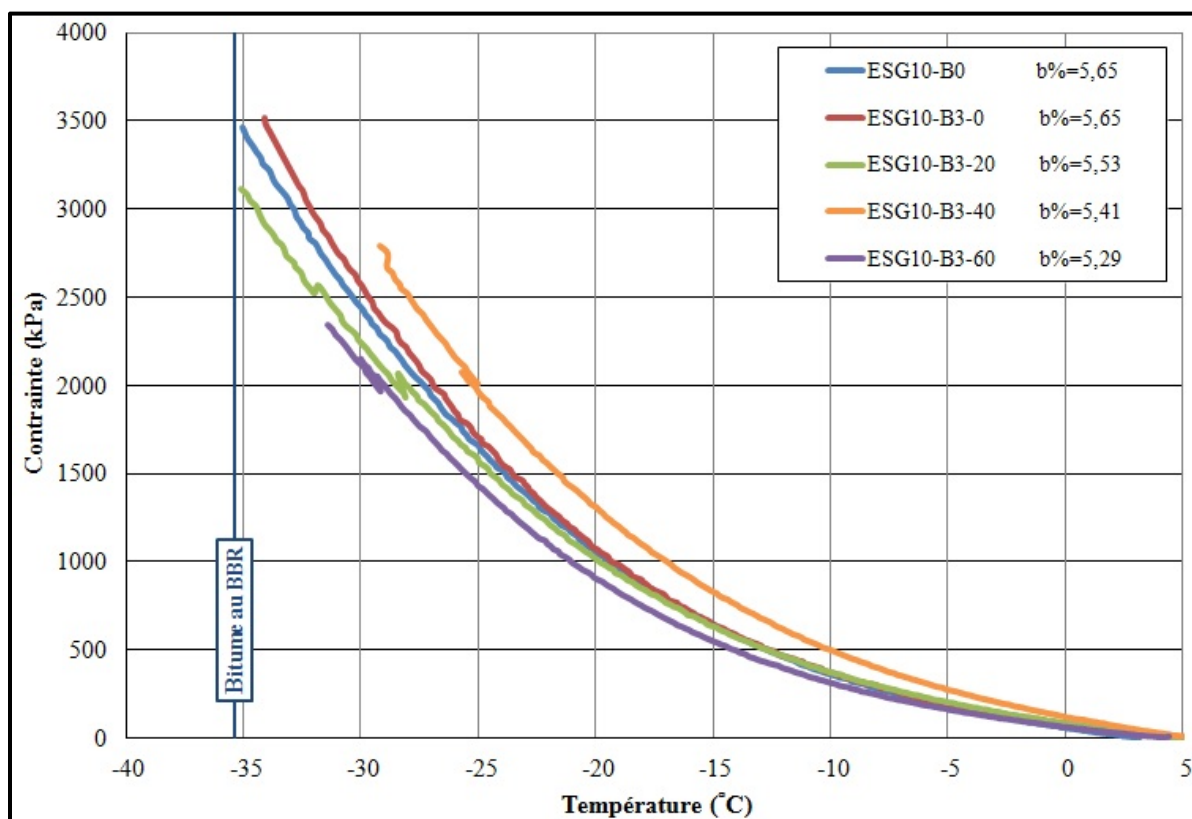


Figure 4.8 Évolution de la contrainte d'après la température pour les valeurs moyennes obtenues à l'essai de TSRST (taux de gel fixé à 10°C/h) des enrobés de surface ESG-10 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)

Suite à l'analyse partielle de ce graphique, il est possible de remarquer que l'enrobé de référence (ESG10-B0) et l'enrobé considérant une mobilisation du bitume des bardeaux de 20% (ESG10-B3-20) sont à quelques décimales près d'obtenir un résultat égal ou inférieur à la température basse du bitume (bitume au BBR). Alors que l'enrobé ESG10-B3-0 est à un

peu plus d'un degré Celsius de cette valeur. À noter que tout au long de l'essai, les trois enrobés mentionnés ci-haut, soit ESG10-B0, ESG10-B3-0 et ESG10-B3-20 ont obtenu une progression similaire durant la réalisation de l'essai. En ce qui concerne les autres enrobés bitumineux, soit ESG10-B3-40 et ESG10-B3-60, leur résultat final et leur progression sont à l'écart des trois autres enrobés et de la valeur de référence (bitume au BBR).

Afin de poursuivre l'analyse entre l'enrobé de référence et l'enrobé ayant le même dosage de bitume et 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, le graphique suivant (Voir Figure 4.9) présente le résultat de ces deux enrobés analysés.

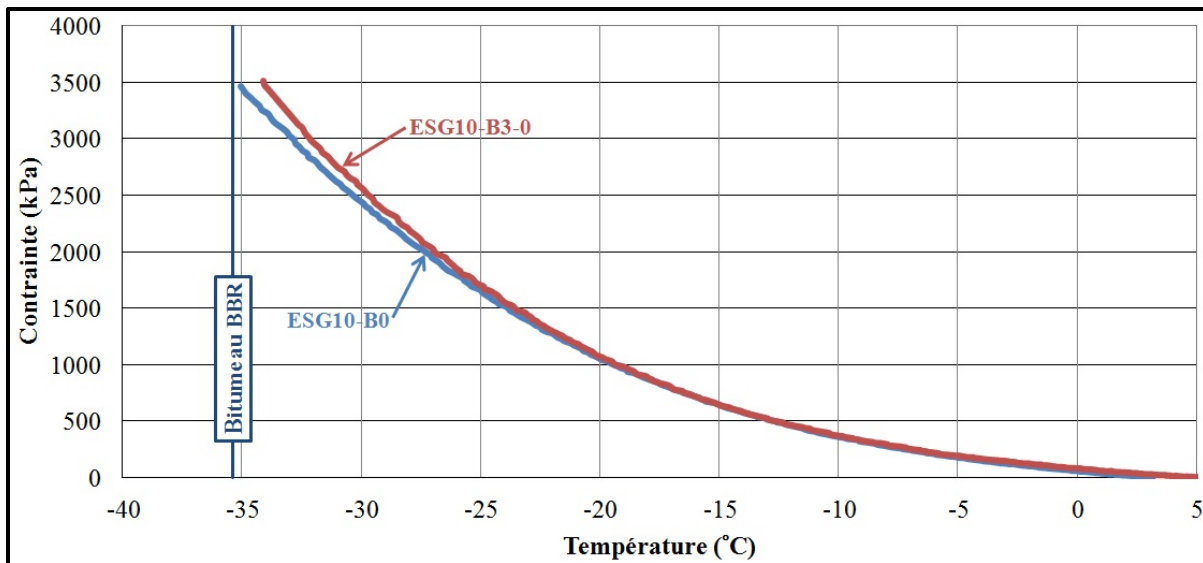


Figure 4.9 Comparaison entre l'enrobé de référence (ESG10-B0) et celui incorporant 3 % de particules de bardeaux (ESG10-B3-0) sur l'évolution de la contrainte d'après la température pour les valeurs obtenues au TSRST (bitume d'ajout de 5,65 %; taux de gel de 10°C/h)

Tel qu'affiché sur ce dernier, les deux enrobés étudiés ont démontré des résultats fort similaires. C'est donc dire que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans un enrobé de surface, affecte peu les performances de l'enrobé à l'essai du retrait thermique empêché pour autant que le pourcentage de bitume d'ajout ne soit pas modifié.

4.2.2.3 Enrobé de base : GB-20

En ce qui concerne les enrobés de base, la synthèse des résultats des essais de TSRST réalisés est présentée au Tableau 4.7. Le bitume utilisé provenait du même lot de production que dans le cas des enrobés de surface. C'est donc dire que la température basse au BBR est toujours fixée à $-35,4^{\circ}\text{C}$.

Comme il a été souligné à la section 4.2.2.1, dans certains cas, une des trois éprouvettes n'a pas été retenue pour la suite des analyses en raison de résultats aberrants associés à une grande présence de vides ou encore en raison de complications notées lors de la réalisation de l'essai.

Tableau 4.7 Résultats obtenus à l'essai de TSRST pour les enrobés de base (GB-20)

Enrobé	Bitume d'ajout (%)	#	Rupture			Vi (%)	T° de transition vitreuse (°C)	T° de transition bissectrice (°C)	Pente #1	Pente #2
			T° (°C)	Contrainte (MPa)	Force (kN)					
GB20-B0	4,77	A*	-34,2	3,66	10,07	3,9	-28,5	-21,2	-0,011	-0,262
		B	Éprouvette non retenue pour l'analyse							
		C	-36,7	3,93	10,82	3,9	-31,3	-22,5	-0,009	-0,260
		Moy.	-35,4	3,80	10,45	3,9	-29,9	-21,8	-0,010	-0,261
		s	-	-	-	-	-	-	-	-
GB20-B5-0	4,77	A	-35,9	4,43	12,20	3,0	-30,6	-21,1	-0,018	-0,268
		B*	-32,5	3,10	8,54	3,3	-28,0	-19,1	-0,016	-0,202
		C	Éprouvette non retenue pour l'analyse							
		Moy.	-34,2	3,77	10,37	3,2	-29,3	-20,1	-0,017	-0,235
		s	-	-	-	-	-	-	-	-
GB20-B5-20	4,57	A*	-31,8	2,64	7,27	3,1	-27,4	-19,3	-0,024	-0,163
		B*	-33,2	4,08	11,23	2,5	-27,6	-18,5	-0,023	-0,239
		C	Éprouvette non retenue pour l'analyse							
		Moy.	-32,5	3,36	9,25	2,8	-27,5	-18,9	-0,024	-0,201
		s	-	-	-	-	-	-	-	-
GB20-B5-40	4,37	A*	-30,2	3,38	9,30	6,6	-25,1	-16,7	-0,021	-0,182
		B*	-31,0	3,10	8,52	7,4	-24,1	-16,4	-0,021	-0,188
		C	Éprouvette non retenue pour l'analyse							
		Moy.	-30,6	3,24	8,91	7,0	-24,6	-16,5	-0,021	-0,185
		s	-	-	-	-	-	-	-	-
GB20-B5-60	4,17	A	-27,6	2,47	6,80	3,3	-22,8	-14,7	-0,019	-0,161
		B*	-28,5	2,81	7,74	2,8	-23,3	-14,8	-0,023	-0,171
		C	Éprouvette non retenue pour l'analyse							
		Moy.	-28,0	2,64	7,27	3,0	-23,0	-14,8	-0,021	-0,166
		s	-	-	-	-	-	-	-	-

*Éprouvette dont il a été nécessaire de la raccourcir et de refaire l'essai en raison de présence de vides majeurs à l'une des deux extrémités de l'éprouvette

L'évolution de la contrainte en cours de gel est montrée à la Figure 4.10 afin de mieux voir les écarts entre les différents enrobés de base. Les courbes présentes sur ce graphique montrent l'évolution de la contrainte suivant la baisse de la température. Dans l'intention d'alléger le graphique, ce sont les valeurs moyennes des 2 ou 3 éprouvettes pour chacun des enrobés qui ont été prises en compte pour le traçage des courbes. La température basse du bitume obtenue à l'essai de BBR est encore une fois ajoutée au graphique à titre de référence.

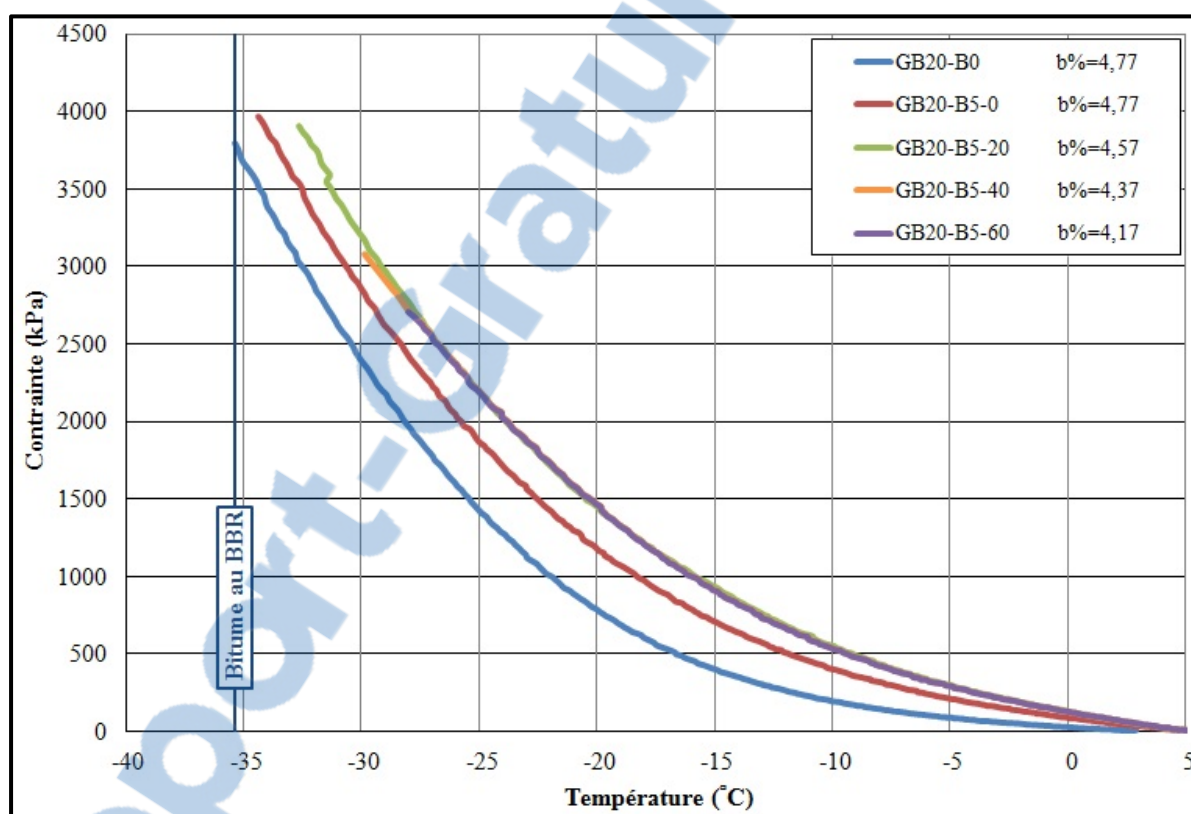


Figure 4.10 Évolution de la contrainte d'après la température pour les valeurs moyennes obtenues à l'essai de TSRST (taux de gel fixé à 10°C/h) des enrobés de base GB-20 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)

Contrairement aux enrobés de surface, un enrobé de base présente une température de rupture au TSRST inférieure à celle du BBR, soit l'enrobé de référence (GB20-B0). Cela signifie donc, qu'aucun enrobé de base contenant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation n'a obtenu de résultats positifs à cet essai. Cependant, tout comme dans le cas des enrobés de surface, les enrobés dont il a été considéré une mobilisation du bitume des

bardeaux de 0 et 20% (GB20-B5-0 et GB20-B5-20) montrent des résultats similaires à l'enrobé de référence. Ces deux enrobés ont cédé pratiquement à la même contrainte de rupture que l'enrobé de référence. Contrairement aux enrobés GB20-B5-40 et GB20-B5-60, qui eux, affichent des résultats nettement inférieurs aux attentes.

Dans l'intention de poursuivre l'analyse entre l'enrobé de référence (GB20-B0) et l'enrobé de base ayant le même dosage de bitume et 5 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation (GB20-B5-0), les résultats de l'essai au TSRST de ces deux enrobés sont présentés à la Figure 4.11.

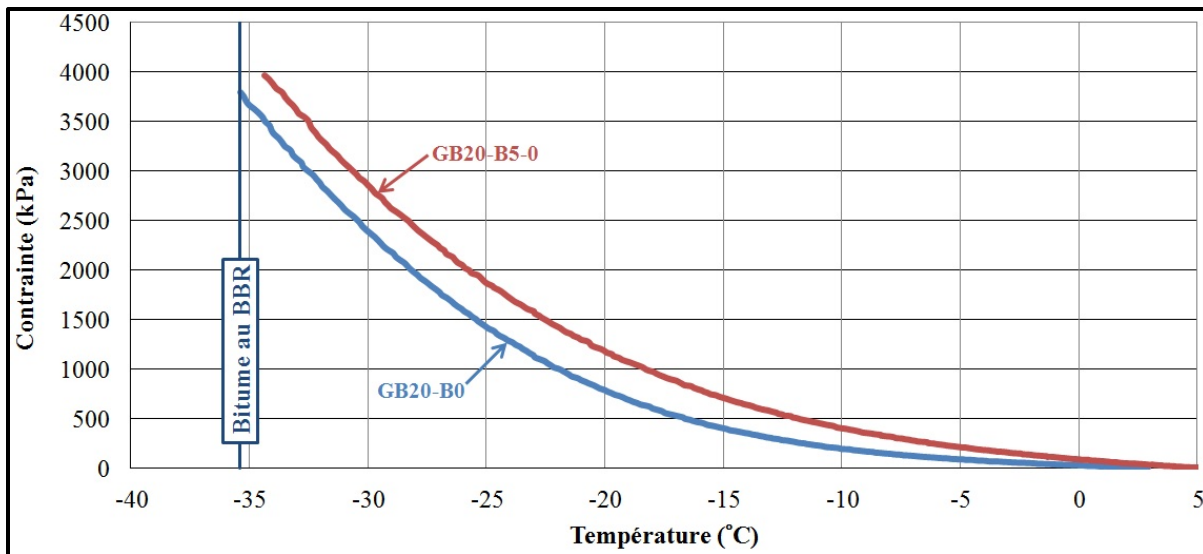


Figure 4.11 Comparaison entre l'enrobé de référence (GB20-B0) et celui incorporant 5 % de particules de bardeaux (GB20-B5-0) sur l'évolution de la contrainte d'après la température pour les valeurs obtenues au TSRST (bitume d'ajout de 4,77 %; taux de gel de 10°C/h)

La Figure 4.11 montre que l'enrobé de référence (GB20-B0) et l'enrobé GB20-B5-0 présentent des résultats très similaires. La moyenne des éprouvettes d'enrobé avec particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation ont cédée avant la moyenne des résultats de l'enrobé de référence, mais ils ont tout de même atteint une contrainte de rupture plus élevée. Il est donc possible de croire que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans un enrobé de base, offre des performances au retrait thermique empêché relativement identique.

4.2.3 Modules complexes

Pour les essais de module complexe, deux éprouvettes, pour chacun des enrobés, avaient été confectionnées tel que montré au plan de carottage (*Voir* Figure 3.14). Dans tous les cas, l'essai de module complexe était réalisé sur une première éprouvette. C'est seulement lorsque les résultats obtenus étaient jugés non satisfaisants et ne respectaient les critères de qualité que la seconde éprouvette était alors testée.

Lors de la réalisation de cet essai, des valeurs expérimentales sont recueillies. Avec celles-ci, les différents paramètres du modèle de 2S2P1D peuvent être déterminés. Ce modèle permet de modéliser le comportement viscoélastique en petites déformations d'un enrobé bitumineux sur la totalité des fréquences et des températures que l'enrobé a subi durant l'essai (Di Benedetto et Corté, 2004). Le modèle 2S2P1D permettra d'effectuer une bonne modélisation des différents enrobés analysés afin de bien présenter les résultats obtenus tel que démontré à la section 2.2.2.3.

4.2.3.1 Enrobé de surface : ESG-10

Dans le cas des enrobés de surface étudiés, les paramètres du modèle de 2S2P1D obtenus pour chacun d'eux sont présentés au Tableau 4.8. À noter que la teneur en vides déterminée lors de la fabrication des éprouvettes est également ajoutée à ce tableau.

Tableau 4.8 Paramètres du modèle de 2S2P1D obtenus
pour les enrobés de surface (ESG-10)

ENROBÉ		ESG10-B0	ESG10-B3-0	ESG10-B3-20	ESG10-B3-40	ESG10-B3-60
BITUME D'AJOUT (%)		5,65	5,65	5,53	5,41	5,29
Paramètres	Vi (%)	8,5	4,3	3,6	3,2	5,1
	E ₀ (MPa)	130	200	200	200	100
	E _∞ (MPa)	32 500	34 000	27 500	28 300	22 500
	k	0,16	0,17	0,17	0,151	0,19
	h	0,46	0,49	0,48	0,40	0,49
	δ	3,80	4,00	4,00	3,00	4,20
	β	1 500	2 000	1 000	1 250	2 000
	A ₀	0,318	-0,646	-0,008	-0,316	-1,127
	A ₁	-3,375	-0,357	-0,361	-0,374	-0,340
	A ₂	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002
	C ₁	24,44	29,32	26,10	26,41	23,90
	C ₂	179,74	210,72	179,46	181,50	179,74

À partir de ces paramètres, la Figure 4.12 présente, dans le plan Cole-Cole, le comportement viscoélastique modélisé des enrobés de surface (indiqué par les traits continus) ainsi que l'ensemble des valeurs mesurées (indiquées par les différents points). Compte tenu de l'importance de la teneur en vides sur les valeurs de modules complexes mesurées, dans la légende de la figure, il est indiqué pour chacune des courbes la teneur en vides des éprouvettes testées.

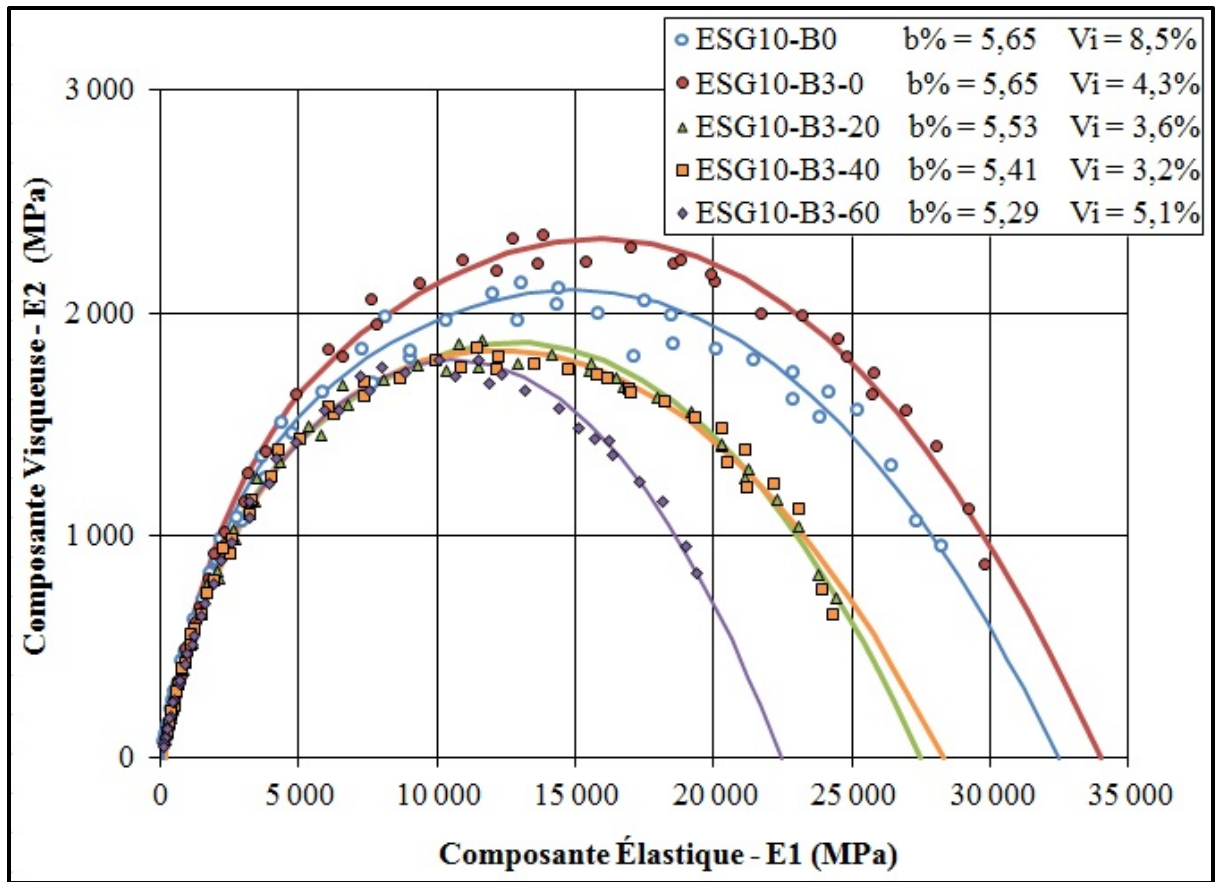


Figure 4.12 Présentation des résultats de module complexe dans le plan Cole-Cole pour les enrobés de surface (ESG-10) selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)

L'analyse détaillée des enrobés avec et sans bardeaux sera réalisée et traitée lors du prochain chapitre. Cependant, avant cette analyse complète, l'enrobé de référence (ESG10-B0) et l'enrobé incorporant 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, mais ne considérant aucune mobilisation du bitume de ces particules (ESG10-B3-0) ont été comparés (*Voir* Figure 4.13) afin de cerner l'effet, dans le plan Cole-Cole, de l'ajout des particules de bardeaux sur les modules complexes mesurés.

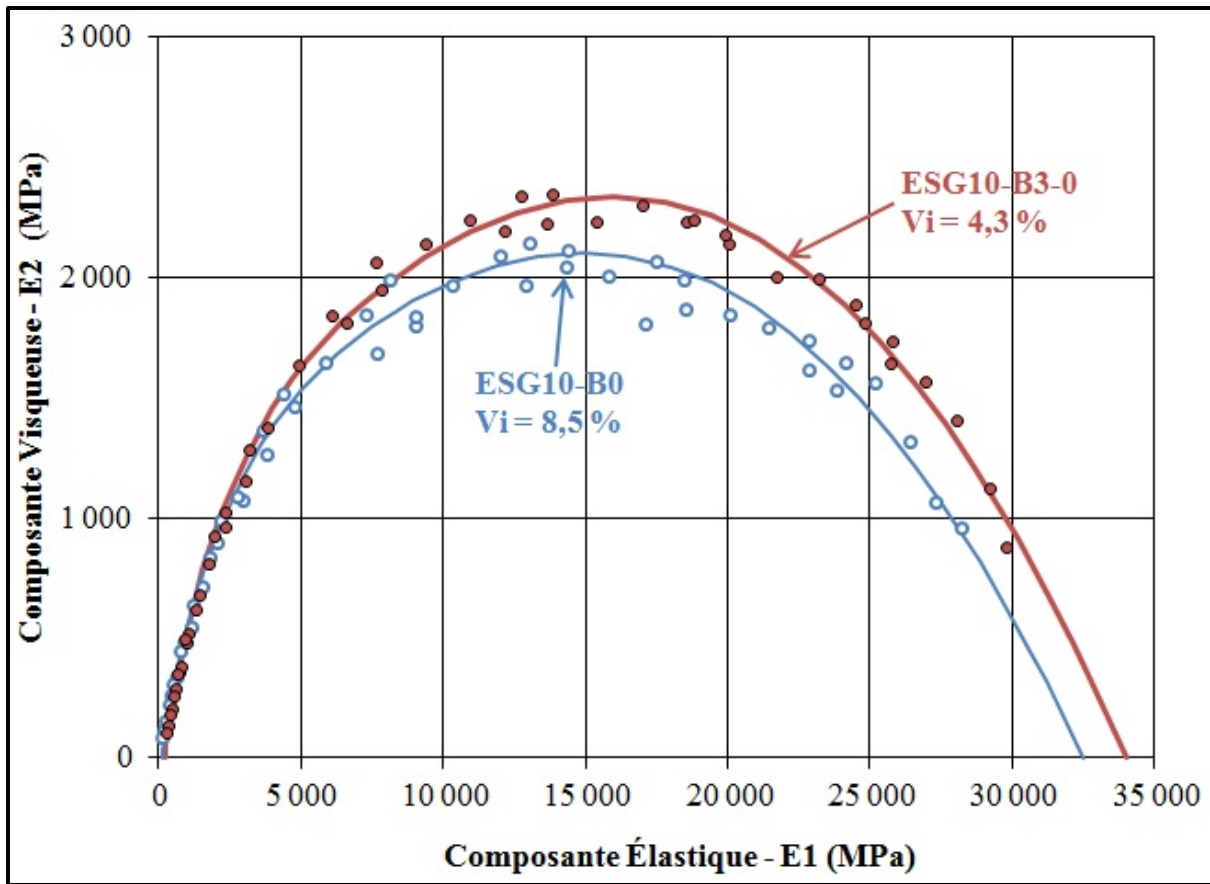


Figure 4.13 Comparaison des résultats de module complexe dans le plan Cole-Cole pour les enrobés ESG10-B0 et ESG10-B3-0 (bitume d'ajout de 5,65 %)

Pour les deux enrobés de surface avec 5,65 % de bitume d'ajout, l'un avec et l'autre sans particules de bardeaux, la Figure 4.13 montre un comportement viscoélastique en petites déformations différent l'un de l'autre car les courbes obtenues ne sont pas superposées. L'enrobé avec bardeaux présente grosso modo une raideur plus significative avec une composante visqueuse qui semble être plus marquée. Par contre, il est bien de noter que l'essai sur l'enrobé de référence a été réalisé sur une éprouvette plus poreuse. Cette différence pourrait avoir une incidence directe sur le résultat tel que démontré par Doucet et Auger (2010). Le tout sera traité en détail lors du chapitre suivant.

Cependant, sur la base des résultats qui sont disponibles à ce moment, il semble à priori, que l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux de type ESG-10 soit bénéfique vis-à-vis les modules complexes mesurés. En

effet, puisqu'à première vue la raideur de l'enrobé avec bardeaux semble plus importante, il est possible d'envisager que dans la structure de la chaussée, sous l'action des déformations imposées au matériau par l'effet du trafic, les contraintes seront diminuées. Par contre, il est clair que pour avoir une assurance de cette hypothèse, il sera impératif de considérer la résistance à la fatigue. Cet aspect n'est pas traité dans le cadre de cette recherche, mais d'après Baaj (2004), pour des enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postfabrication, une amélioration conséquente des performances à la fatigue a été montrée.

4.2.3.2 Enrobé de base : GB-20

Les paramètres du modèle de 2S2P1D obtenus pour les enrobés de base sont présentés au Tableau 4.9, tout comme la teneur en vides présente dans les éprouvettes.

Tableau 4.9 Paramètres du modèle de 2S2P1D obtenus pour les enrobés de base (GB-20)

ENROBÉ		GB20-B0	GB20-B5-0	GB20-B5-20	GB20-B5-40	GB20-B5-60
BITUME D'AJOUT (%)		4,77	4,77	4,57	4,37	4,17
Paramètres	Vi (%)	3,5	3,8	3,4	7,3	3,8
	E ₀ (MPa)	150	150	150	210	150
	E _∞ (MPa)	34 500	30 000	29 500	31 500	31 000
	k	0,20	0,18	0,17	0,14	0,18
	h	0,58	0,47	0,46	0,43	0,48
	δ	2,28	3,60	3,50	4,10	2,75
	β	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
	A ₀	-0,894	-0,734	0,105	2,83	0,679
	A ₁	-0,356	-0,354	-0,358	-0,356	-0,392
	A ₂	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
	C ₁	15,75	22,88	33,16	19,39	24,55
	C ₂	181,34	181,07	229,33	180,69	180,63

Selon les paramètres précédents, les résultats dans le plan Cole-Cole ont pu être déterminés à la Figure 4.14. Sur celle-ci, on retrouve le comportement viscoélastique modélisé de tous les enrobés de base (indiqué par un trait continu) ainsi que l'ensemble des valeurs mesurées (indiquées par les points). Tout comme dans le cas des enrobés de surface, la teneur en vides des éprouvettes testées est indiquée dans la légende de la figure.

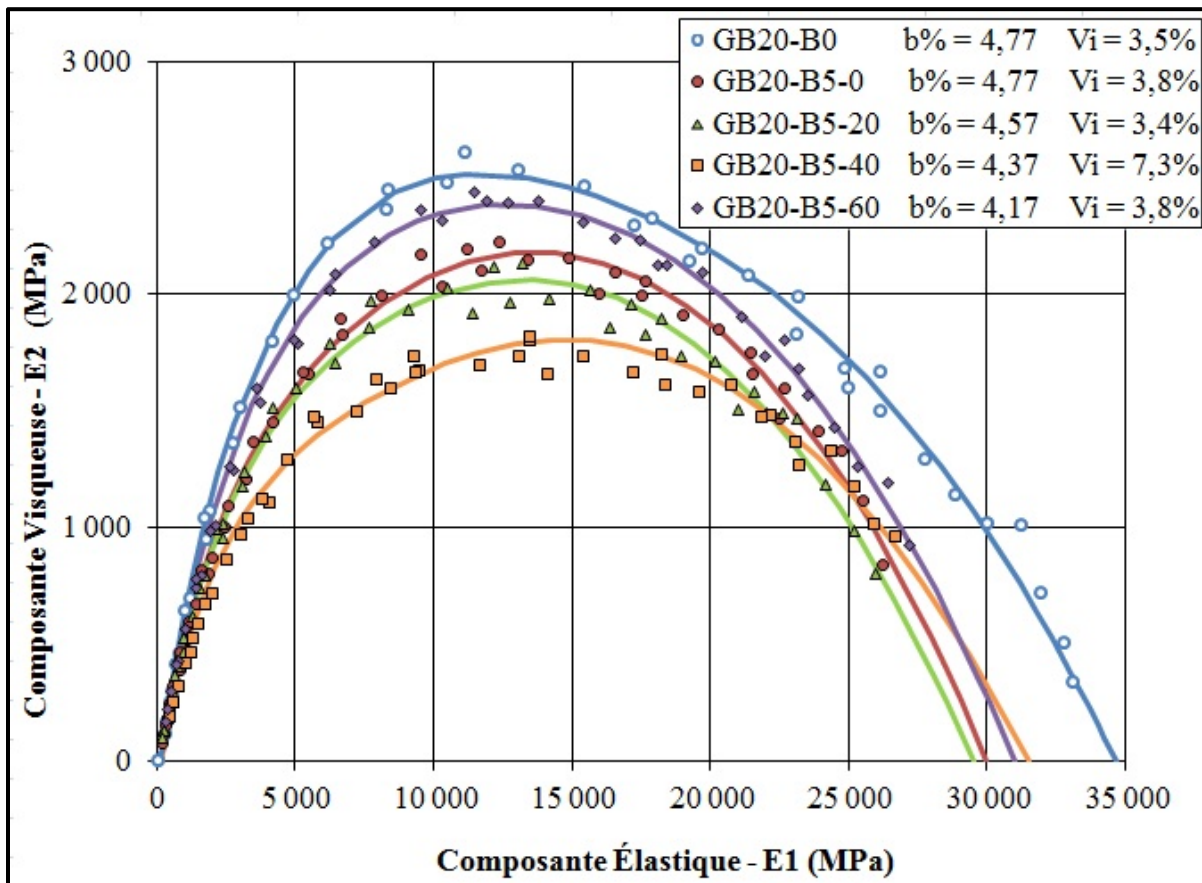


Figure 4.14 Présentation des résultats de module complexe dans le plan Cole-Cole pour les enrobés de base (GB-20) selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)

Tel que mentionné dans le cas des enrobés de surface, l'analyse détaillée des résultats sera réalisée et traitée dans le prochain chapitre. Cependant, avant cette analyse complète, les enrobés GB20-B0 et GB20-B5-0 ont été comparés (*Voir* Figure 4.15), soit l'enrobé de référence et l'enrobé incorporant 5 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, mais ne considérant aucune mobilisation du bitume de ces particules.

Cette comparaison a été réalisée afin de cerner l'effet de l'ajout des particules de bardeaux sur les modules complexes mesurés dans un enrobé de base.

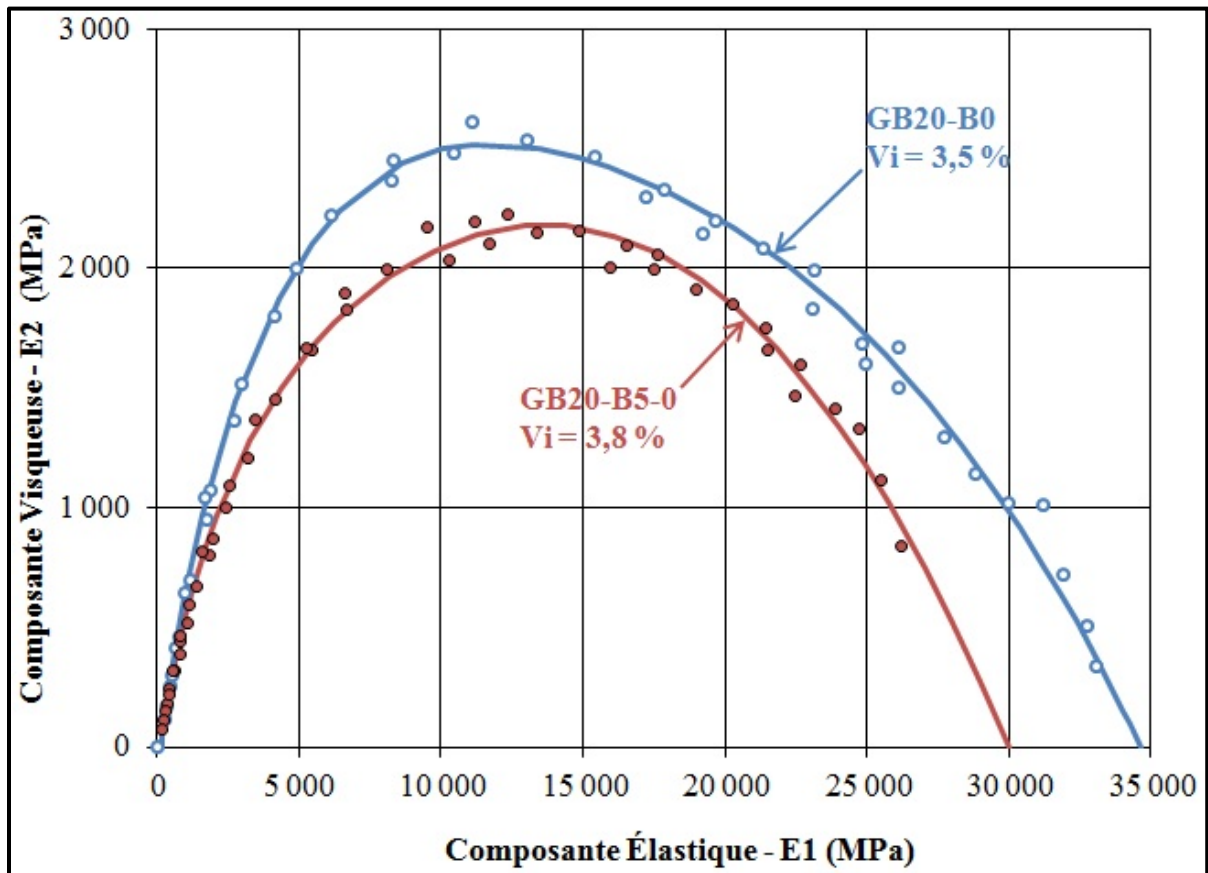


Figure 4.15 Comparaison des résultats de module complexe dans le plan Cole-Cole pour les enrobés GB20-B0 et GB20-B5-0 (bitume d'ajout de 4,77%)

La Figure 4.15 présente les deux enrobés de base incorporant 4,77 % de bitume d'ajout. En analysant ces deux résultats, il est possible de constater que l'enrobé avec bardeaux d'asphalte (GB20-B5-0) montre un comportement viscoélastique en petites déformations inférieur à l'enrobé de référence (GB20-B0), étant donné qu'il présente grosso modo une raideur moins significative que l'enrobé de référence ainsi qu'une composante visqueuse réduite. À noter que, contrairement à l'analyse de l'enrobé de surface, la teneur en air des deux éprouvettes analysées était très similaire.

À ce moment, sur la base des résultats disponibles, il semble que l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux de type GB-20 entraîne une diminution des modules complexes mesurés, ce qui est contraire aux enrobés bitumineux de type ESG-10 traités précédemment. D'après ces observations, on est en mesure d'envisager que dans la structure de la chaussée, sous l'action des déformations imposées au matériau par l'effet du trafic, les contraintes seront augmentées, entraînant des déficiences dans la chaussée en question. Tout comme dans le cas des enrobés de surface, il serait essentiel, pour appuyer cette hypothèse, de considérer la résistance à la fatigue.

4.3 Essais de durabilité

Suite aux essais de formulation et aux essais thermomécaniques, les essais en laboratoire se sont conclus avec des essais de durabilité. Dans le cadre de cette série d'essais, la tenue à l'eau a été déterminée pour les différents enrobés.

4.3.1 Tenue à l'eau

L'essai afin de déterminer la tenue à l'eau des différents enrobés étudiés a été réalisé à l'aide de la presse Marshall. Tel qu'expliqué à la section 3.3.2.3, pour chacun des enrobés, quatre éprouvettes ont été préparées : deux provenant de la briquette de pcg et deux provenant des éprouvettes de module complexe. Toutes les éprouvettes étaient testées selon la méthode d'essai LC 26-060 : Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes (*Voir Annexe XVIII*). Dans tous les cas, les quatre éprouvettes ont été séparées en deux lots distincts, soit deux ayant subi un vieillissement accéléré par trempage, contrairement aux deux autres. Afin de s'assurer d'une homogénéité maximale dans les résultats, dans chacun des lots on retrouvait une éprouvette provenant de la briquette compactée à la pcg (*Voir Figure 3.23*) et une éprouvette taillée à partir de l'éprouvette ayant servi à la mesure du module complexe (*Voir Figure 3.22*).

4.3.1.1 Enrobé de surface : ESG-10

Des résultats de la tenue à l'eau ont été obtenus pour les cinq enrobés de surface analysés. Lors de la réalisation d'un essai de tenue à l'eau on mesure la force maximale appliquée sur l'éprouvette (stabilité) et le déplacement (Dépl.), qui correspond à l'écrasement vertical. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 4.10.

À partir des mesures réalisées, la perte de stabilité et la tenue à l'eau ont été calculées pour chaque essai. Les résultats sont reportés au Tableau 4.10. Concernant la tenue à l'eau, l'équation a été démontrée au chapitre 2 (*Voir* Équation 2.3), alors que la perte de stabilité est déterminée selon l'Équation 4.1 :

$$\left(\frac{\text{Stabilité moyenne sans vieillissement} - \text{Stabilité moyenne avec vieillissement}}{\text{Stabilité moyenne sans vieillissement}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Tableau 4.10 Résultats de la tenue à l'eau pour les enrobés de surface (ESG-10)

Enrobé	b%	Origine ^A	État ^B	#	Hauteur ^C (mm)	Dépl. (mm)	Stabilité ^D (kN)	Perte de stabilité (%)	Tenue à l'eau (%)	Moyenne Tenue à l'eau (%)
ESG10-B0	5,65	pcg	Avec	2	51,27	7,9	23,239	21,3	78,7	78,8
			Sans	1	49,85	8,3	18,284			
		E*	Avec	E	54,65	9,9	26,283	21,0	78,9	
			Sans	D	59,97	12,1	20,749			
ESG10-B3-0	5,65	pcg	Avec	2	50,71	7,1	24,559	20,5	79,5	80,2
			Sans	1	51,64	6,6	19,525			
		E*	Avec	E	58,63	9,4	29,428	19,2	80,8	
			Sans	D	58,37	12,4	23,778			
ESG10-B3-20	5,53	pcg	Avec	2	49,97	9,5	30,428	21,9	78,1	84,5
			Sans	1	49,89	9,0	23,775			
		E*	Avec	E	61,14	10,6	29,959	9,1	90,9	
			Sans	D	58,80	9,4	27,228			
ESG10-B3-40	5,41	pcg	Avec	2	50,56	8,5	32,963	22,7	77,3	84,8
			Sans	1	51,91	10,6	25,475			
		E*	Avec	E	55,75	10,0	30,941	7,2	92,8	
			Sans	D	57,95	12,1	28,720			
ESG10-B3-60	5,29	pcg	Avec	2	51,18	6,7	34,223	13,6	86,4	88,3
			Sans	1	52,51	7,3	29,569			
		E*	Avec	E	52,46	11,4	34,808	9,9	90,1	
			Sans	D	55,14	9,8	31,375			

^A Signifie si l'éprouvette a été extrait d'une brique de pcg ou d'une éprouvette de E*

^B L'état signifie si l'essai a été réalisé avec ou sans vieillissement accéléré par trempage

^C Moyenne de trois hauteurs prises sur l'éprouvette à 120° l'une de l'autre

^D La valeur de la stabilité est corrigée en fonction de la hauteur de l'éprouvette

Les résultats présentés au tableau précédent ont été mis sous forme de graphique en distinguant les éprouvettes provenant des essais de pcg de ceux provenant des essais de

module complexe (E^*). Dans un premier temps, les résultats de la perte de stabilité sont présentés (Voir Figure 4.16) suivis des résultats de la tenue à l'eau (Voir Figure 4.17).

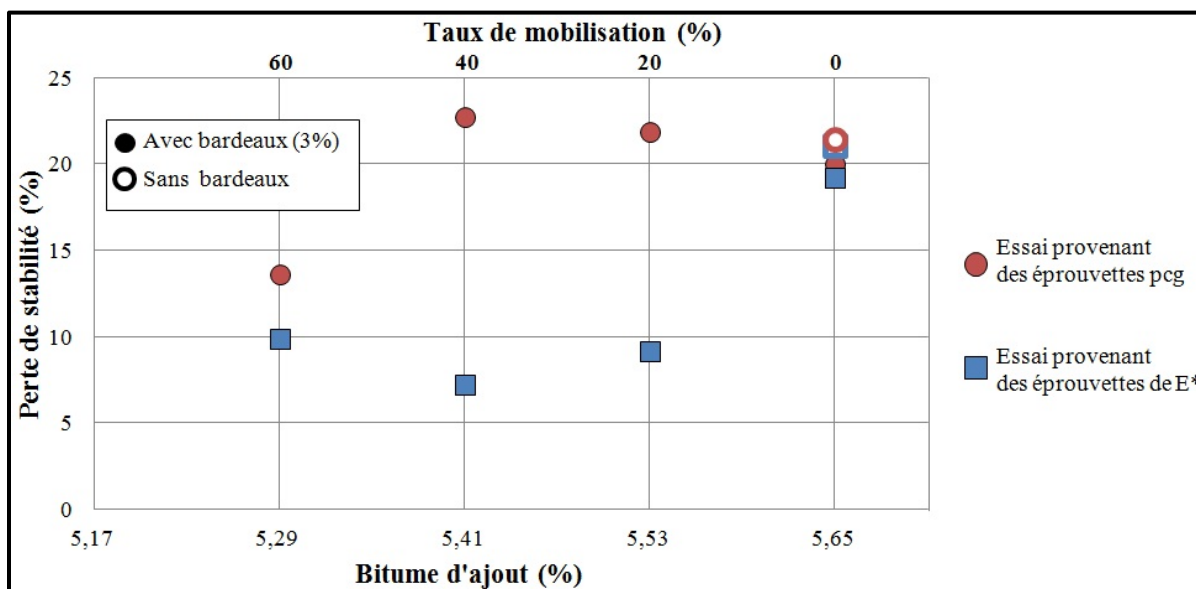


Figure 4.16 Résultats obtenus pour la perte de stabilité pour les enrobés de surface de type ESG-10 avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : différence entre les éprouvettes provenant des briquettes de la pcg et de celles testées au E^*

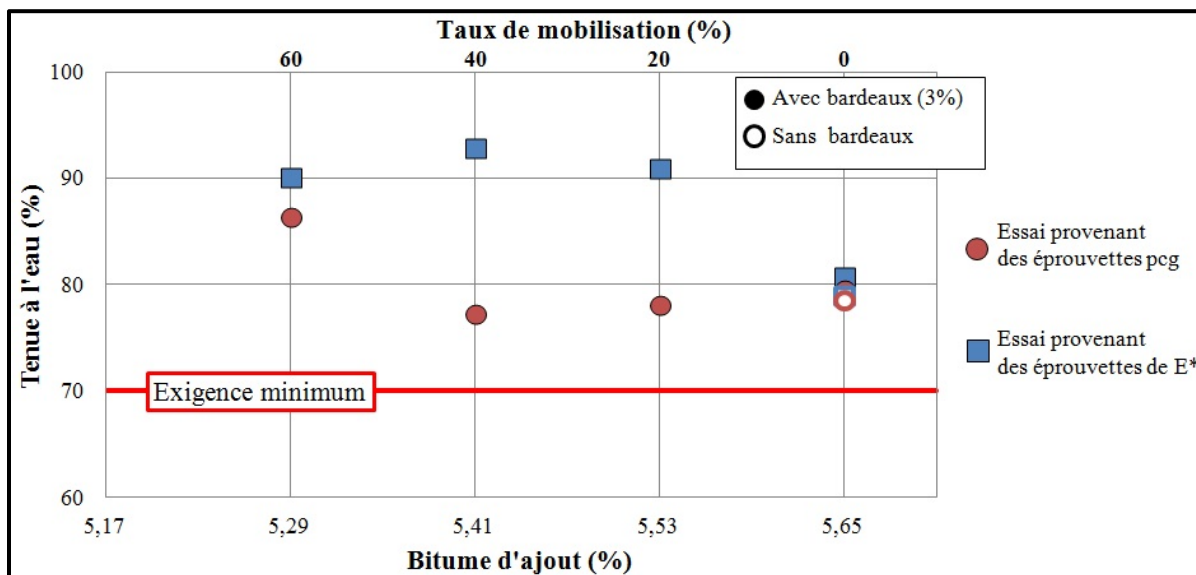


Figure 4.17 Résultats obtenus pour la tenue à l'eau pour les enrobés de surface de type ESG-10 avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : différence entre les éprouvettes provenant des briquettes de la pcg et de celles testées au E^*

En analysant les résultats présentés à la Figure 4.17, tous les enrobés de surface contenus dans ce programme expérimental ont offert des résultats supérieurs à l'exigence du MTQ fixée à 70 %. À noter que même si tous les enrobés respectent les exigences, les enrobés considérant une mobilisation du bitume des bardeaux de 20 et 40 % ont démontré de grands écarts entre les résultats provenant des éprouvettes de pcg et ceux provenant des E*. Cet écart peut être expliqué par la variabilité de la teneur en vides des éprouvettes qui est fortement supérieure aux autres enrobés de surface qui ont présenté des résultats comparables entre les éprouvettes pcg et E*.

En se concentrant sur les résultats des deux enrobés incorporant le même taux de bitume d'ajout (5,65 %), c'est-à-dire l'enrobé de référence et l'enrobé avec bardeaux d'asphalte ne considérant aucune mobilisation du bitume des bardeaux (ESG10-B0), il est possible de déterminer que l'ajout de bardeaux ne semble pas affecter les performances de l'enrobé aux essais de durabilité. Effectivement, les résultats obtenus pour ces deux enrobés sont pratiquement identiques.

4.3.1.2 Enrobé de base : GB-20

Le même processus a été réalisé pour les cinq enrobés de base étudiés. Les données suivantes : la hauteur de l'éprouvette, la force maximale appliquée (stabilité) et le déplacement obtenu (Dépl.) sont affichés dans le Tableau 4.11. La perte de stabilité et la tenue à l'eau calculées à l'aide de ces données sont également présentées.

Tableau 4.11 Résultats de la tenue à l'eau pour les enrobés de base (GB-20)

Enrobé	b%	Origine ^A	État ^B	#	Hauteur ^C (mm)	Dépl. (mm)	Stabilité ^D (kN)	Perte de stabilité (%)	Tenue à l'eau (%)	Moyenne Tenue à l'eau (%)
GB20-B0	5,65	pcg	Avec	2	51,62	6,7	27,796	12,1	87,9	87,5
			Sans	1	51,93	15,1	24,430			
		E*	Avec	E	57,48	11,0	26,045	12,9	87,1	
			Sans	D	59,57	12,5	22,683			
GB20-B5-0	5,65	pcg	Avec	2	49,98	7,3	29,705	18,5	81,5	87,2
			Sans	1	51,06	8,0	24,202			
		E*	Avec	E	59,78	5,8	24,477	5,8	94,2	
			Sans	D	53,69	10,0	23,054			
GB20-B5-20	5,53	pcg	Avec	2	49,56	7,9	30,723	6,0	94,0	94,5
			Sans	1	51,49	9,4	28,875			
		E*	Avec	E	60,24	13,8	31,031	5,0	95,0	
			Sans	D	57,59	12,8	29,463			
GB20-B5-40	5,41	pcg	Avec	2	51,31	11,4	32,936	5,1	94,9	94,1
			Sans	1	50,63	6,4	31,246			
		E*	Avec	E	59,53	13,0	33,024	6,7	93,3	
			Sans	D	59,63	12,6	30,810			
GB20-B5-60	5,29	pcg	Avec	2	55,66	9,8	34,059	15,8	84,2	89,7
			Sans	1	55,32	8,7	28,673			
		E*	Avec	E	56,30	10,9	37,756	5,3	94,7	
			Sans	D	50,41	11,6	35,746			

^A Signifie si l'éprouvette a été extrait d'une brique de pcg ou d'une éprouvette de E*

^B L'état signifie si l'essai a été réalisé avec ou sans vieillissement accéléré par trempage

^C Moyenne de trois hauteurs prises sur l'éprouvette à 120° l'une de l'autre

^D La valeur de la stabilité est corrigée en fonction de la hauteur de l'éprouvette

Suite à la présentation des résultats au tableau précédent, il a été possible de les représenter graphiquement. Les résultats de la perte de stabilité et de la tenue à l'eau sont présentés respectivement aux Figures 4.18 et 4.19. À noter que sur chacun de ces graphiques les éprouvettes provenant des essais de pcg et ceux provenant des essais de module complexe (E^*) ont été séparés pour faciliter l'analyse.

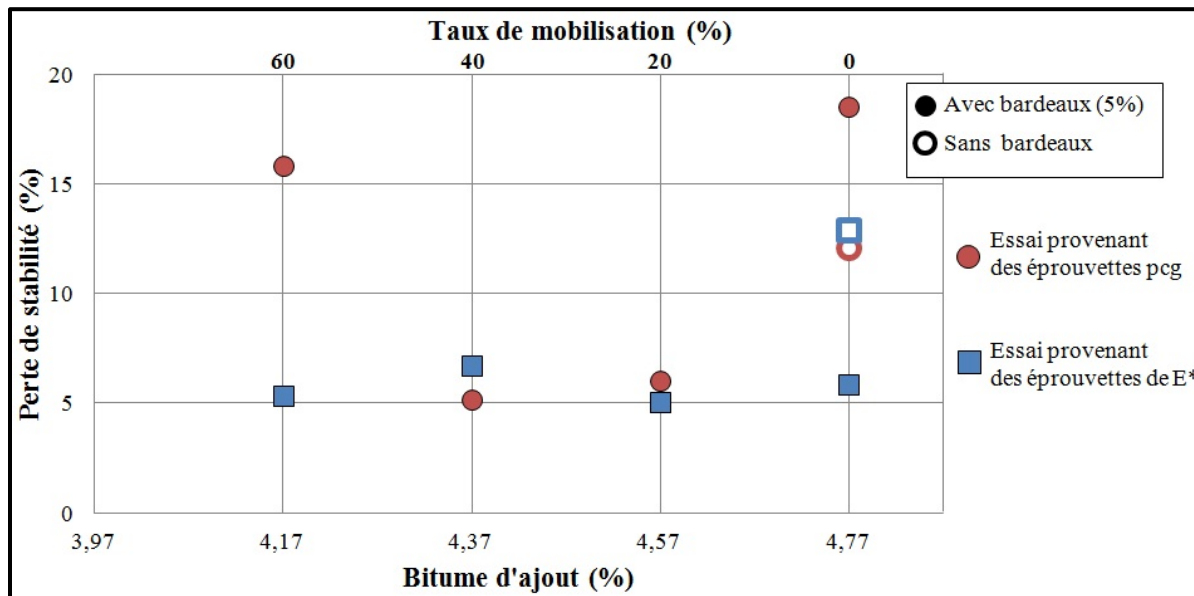


Figure 4.18 Résultats obtenus pour la perte de stabilité pour les enrobés de base de type GB-20 avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : différence entre les éprouvettes provenant des briquettes de la pcg et de celles testées au E^*

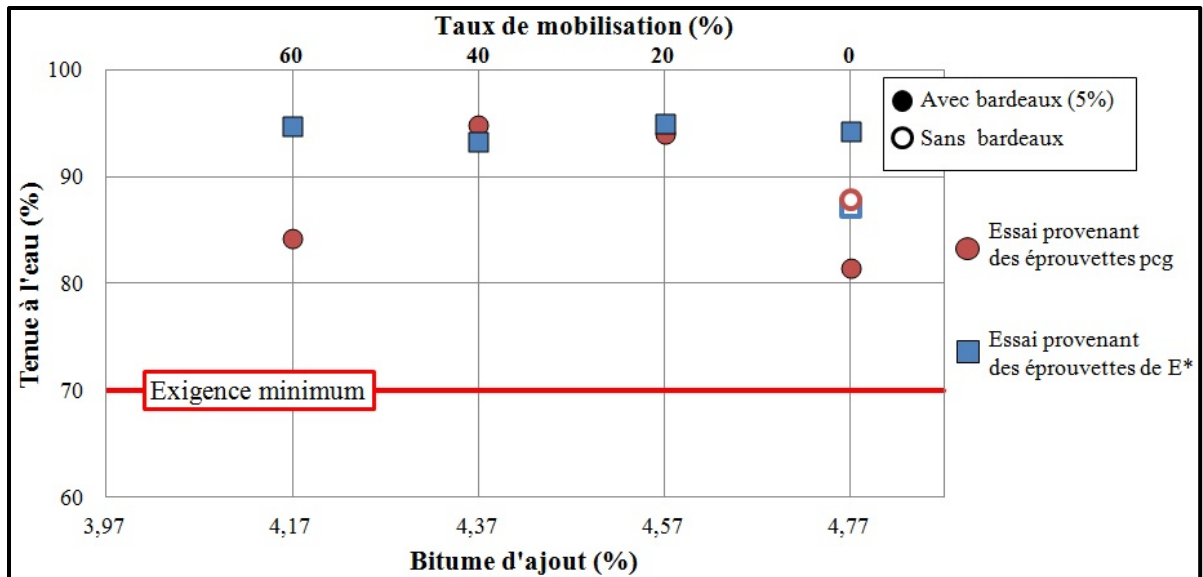


Figure 4.19 Résultats obtenus pour la tenue à l'eau pour les enrobés de base de type GB-20 avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation : différence entre les éprouvettes provenant des briquettes de la pcg et de celles testées au E*

D'après les résultats des enrobés de base présentés au graphique précédent, l'exigence du MTQ, fixée encore une fois à 70 %, a été respectée dans tous les cas. Si l'on compare les résultats provenant des éprouvettes pcg à ceux provenant des E*, quoi que moins prononcé que dans le cas des enrobés de surface, on remarque que certains enrobés ont présentés des écarts. Tel que mentionné précédemment, ces écarts peuvent être attribuables à la variabilité de la teneur en vides des éprouvettes qui est plus significative dans le cas des enrobés considérant une mobilisation du bitume des bardeaux de 0 et 60 %. De plus, en analysant spécifiquement les résultats des deux enrobés de base incorporant le même taux de bitume d'ajout (4,77 %), donc l'enrobé de référence et l'enrobé GB20-B5-0 qui incorpore des bardeaux d'asphalte tout en ne considérant aucune mobilisation du bitume de ceux-ci, il est possible de déterminer que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte ne semble pas affecter les performances de l'enrobé aux essais de durabilité. Effectivement, en considérant le résultat moyen obtenu pour chacun de ces deux enrobés, les résultats sont pratiquement identiques.

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RÉSULTATS

Le présent chapitre vise à analyser et à discuter des résultats des différents essais présentés au chapitre précédent. L'analyse permettra de cerner l'effet de l'ajout des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation sur les performances des enrobés. L'analyse sera présentée suivant trois volets : 1) les essais de formulation, 2) les essais thermomécaniques et, 3) les essais de durabilité.

Dans la présentation des résultats, au chapitre précédent, un premier niveau d'analyse a été cogité concernant la comparaison entre l'enrobé de référence et l'enrobé incorporant des particules de bardeaux d'asphalte confectionné sans égard au potentiel de mobilisation du bitume des bardeaux. Dans le présent chapitre, les discussions seront principalement orientées sur l'effet de l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux sur ses performances. C'est avec ces discussions qu'il sera possible de déterminer un taux de réduction du bitume d'ajout acceptable, si applicable, pour les enrobés de type ESG-10 et GB-20.

5.1 Essais de formulation

Les essais de formulation font principalement référence à la densité maximale et visent à valider l'aptitude au compactage de l'enrobé mesurée à la pcg. Dans le cadre de cette section, il sera donc discuté de l'effet de l'incorporation des particules de bardeaux dans l'enrobé quant aux résultats à la d_{mm} et à la pcg.

5.1.1 Densité maximale du mélange

Les résultats de densité maximale des enrobés avec bardeaux confectionnés en laboratoire ont été présentés à la section 4.1.1. Ces résultats sont maintenant présentés sous forme graphique à la Figure 5.1.

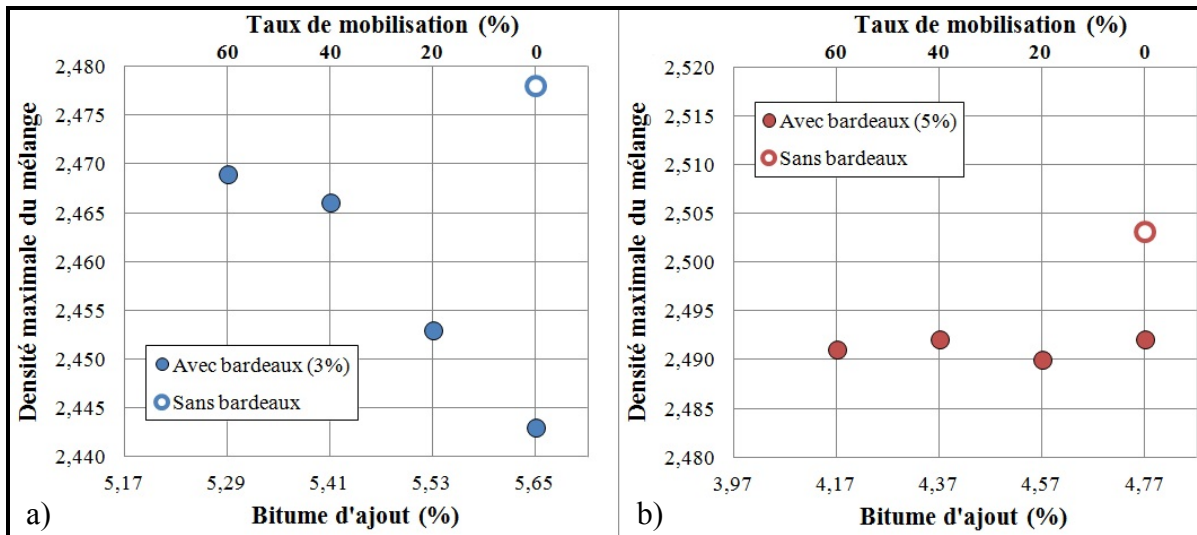


Figure 5.1 Relation entre la densité maximale du mélange (d_{mm}) et la teneur en bitume d'ajout pour les différents enrobés bitumineux confectionnés en laboratoire avec et sans particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation :

a) les enrobés de surface (ESG-10) et b) les enrobés de base (GB-20)

5.1.1.1 Enrobé de surface : ESG-10

En se référant aux résultats présentés à la Figure 5.1 a), pour une teneur en bitume d'ajout identique, soit en comparant les résultats de l'enrobé de référence (ESG10-B0) à ceux de l'enrobé ESG10-B3-0 (enrobé auquel il a été ajouté 3 % de bardeau d'asphalte tout en ne considérant aucune mobilisation du bitume des bardeaux), une diminution de la valeur de la d_{mm} est significative. Ceci s'explique en partie au fait que pour la composition des enrobés avec bardeaux, l'ajout de ces particules a été fait en substitution du granulat de classe 0-5. Sachant que le granulat 0-5 possède une densité beaucoup plus grande que celle des particules de bardeaux d'asphalte, cela explique en partie pourquoi la d_{mm} des enrobés avec bardeaux est inférieure à celle de l'enrobé de référence.

Par ailleurs, concernant les résultats obtenus pour les enrobés contenant des particules de bardeau et dont la teneur en bitume d'ajout a été réduite, en considérant différents taux de mobilisation, il est remarqué que la d_{mm} augmente lorsqu'on considère une plus grande mobilisation du bitume de bardeaux (taux plus significatifs) et qu'ainsi la d_{mm} se rapproche de celle de l'enrobé de référence. Cette constatation s'explique du fait que plus le taux de

mobilisation est considéré comme étant important, plus la quantité de bitume d'ajout est réduite, entraînant par conséquent une augmentation de la quantité de granulat de classe 0-5 dans l'enrobé (*Voir* Annexe IV, Figure-A IV-1). Comme mentionnée précédemment, la fraction 0-5 possède une densité plus élevée que le bitume d'ajout, modifiant ainsi la d_{mm} de l'enrobé. Par conséquent, la d_{mm} tend donc à augmenter plus le taux de mobilisation considéré du bitume des bardeaux est augmenté.

5.1.1.2 Enrobé de base : GB-20

En ce qui a trait aux enrobés de base confectionnés en laboratoire, les résultats de la Figure 5.1 b), montrent une tendance très différente de celle observée pour l'enrobé de type ESG-10. Tout comme dans le cas des enrobés de surface, l'enrobé de base de référence présente une densité maximale plus élevée que celle des enrobés de base incorporant des particules de bardeaux d'asphalte. La raison évoquée dans le cas des enrobés de surface est tout aussi valable dans ce cas-ci. Cependant, bien que dans le cas des enrobés ESG-10, une variation de la d_{mm} avait été remarquée suivant le taux de mobilisation considéré, il n'en est rien pour les enrobés de base. En effet, pour tous les enrobés incorporant des particules de bardeaux, considérant une mobilisation du bitume des bardeaux de 0 à 60 %, les valeurs de la d_{mm} de ces enrobés restent relativement stables (variation de $\pm 0,002$). La raison pour laquelle la d_{mm} n'augmente pas, comme dans le cas des enrobés de surface, peut être expliquée par le fait que dans la formulation de l'enrobé de type GB-20, le pourcentage de granulat de classe 0-5 est beaucoup moins significatif que dans le cas des enrobés de surface (*Voir* Annexe X, Figure-A V-1).

5.1.2 Presse à cisaillement giratoire (pcg)

L'essai à la presse à cisaillement giratoire permet de connaître le comportement et l'aptitude au compactage des enrobés. Pour chacun des enrobés analysés, deux répétitions d'essais ont été réalisées en laboratoire.

5.1.2.1 Enrobé de surface : ESG-10

Tel que montré précédemment (*Voir* Tableau 4.2), les résultats à la pcg réalisés sur tous les enrobés de surface ont été jugés conformes aux exigences du MTQ. La Figure 5.2 présente les résultats moyens obtenus à 10 girations (10 ng), à 80 girations (80 ng) et à 200 girations (200 ng) des essais à la pcg pour les cinq différents enrobés de surface confectionnés en laboratoire. Afin de faciliter l'analyse, les exigences du MTQ sont insérées sur le graphique sachant que LI représente une limite inférieure et LS une limite supérieure.

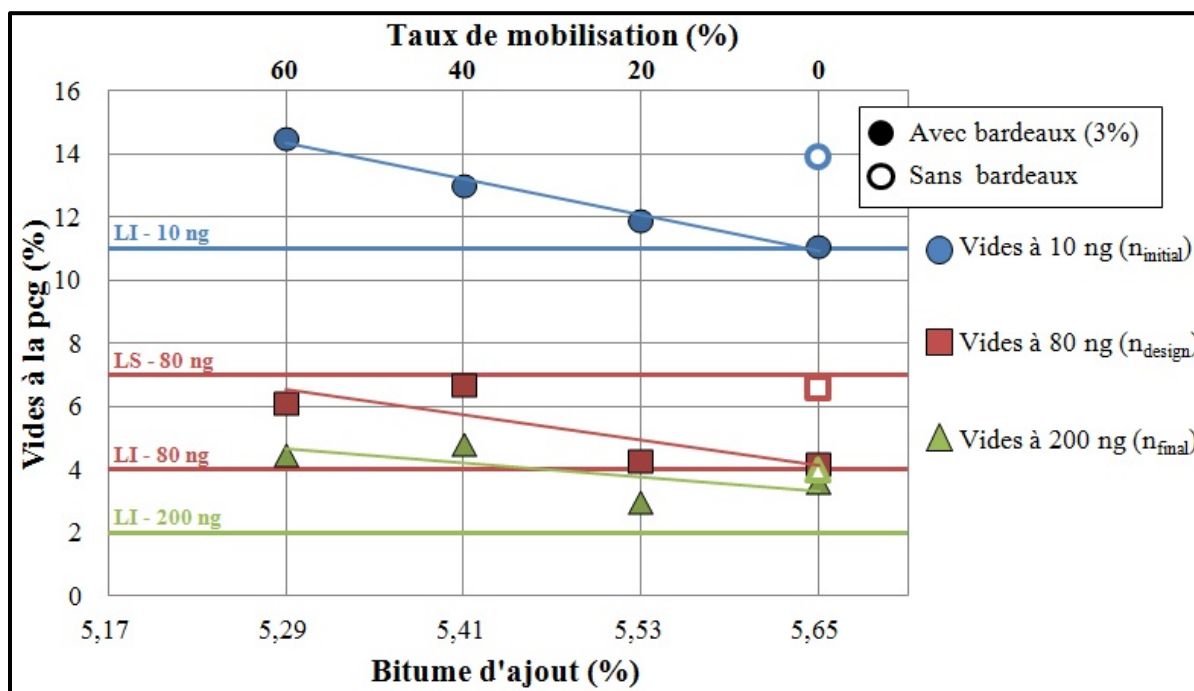


Figure 5.2 Résultats obtenus à la pcg pour les enrobés de surface (ESG-10) incorporant 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation

La Figure 5.2 montre que la substitution de la fraction granulaire 0-5 par 3 % de particules de bardeau d'asphalte de postconsommation, sans réduire la teneur en bitume, donne lieu à une amélioration de l'aptitude au compactage puisque la teneur en vides diminue. Lorsqu'on assume qu'une partie du bitume des particules de bardeaux d'asphalte est mobilisée, permettant ainsi de réduire la teneur en bitume d'ajout, on constate que les vides à 10, 80 et 200 girations augmentent.

En référence aux résultats présentés à la Figure 5.2, on constate que pour avoir une équivalence, à l'enrobé de référence (ESG10-B0), au terme de l'aptitude au compactage, un taux de mobilisation du bitume des bardeaux jusqu'à 60 % pourrait être considéré pour les enrobés de surface de type ESG-10 avec 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation.

5.1.2.2 Enrobé de base : GB-20

Concernant les résultats à la presse à cisaillement giratoire des différents enrobés de base, tous les enrobés étudiés ont offerts des résultats conformes aux exigences du MTQ. La Figure 5.3 présente les résultats moyens obtenus à 10 girations (10 ng), à 120 girations (n_{design}) et à 200 girations (200 ng). À noter que dans le cas des enrobés de base, le n_{design} est établi à 120 girations plutôt que 80 dans le cas des enrobés de surface (Voir section 2.2.1.2). Les exigences du MTQ sont une fois de plus insérées sur le graphique (LI représente une limite inférieure et LS une limite supérieure).

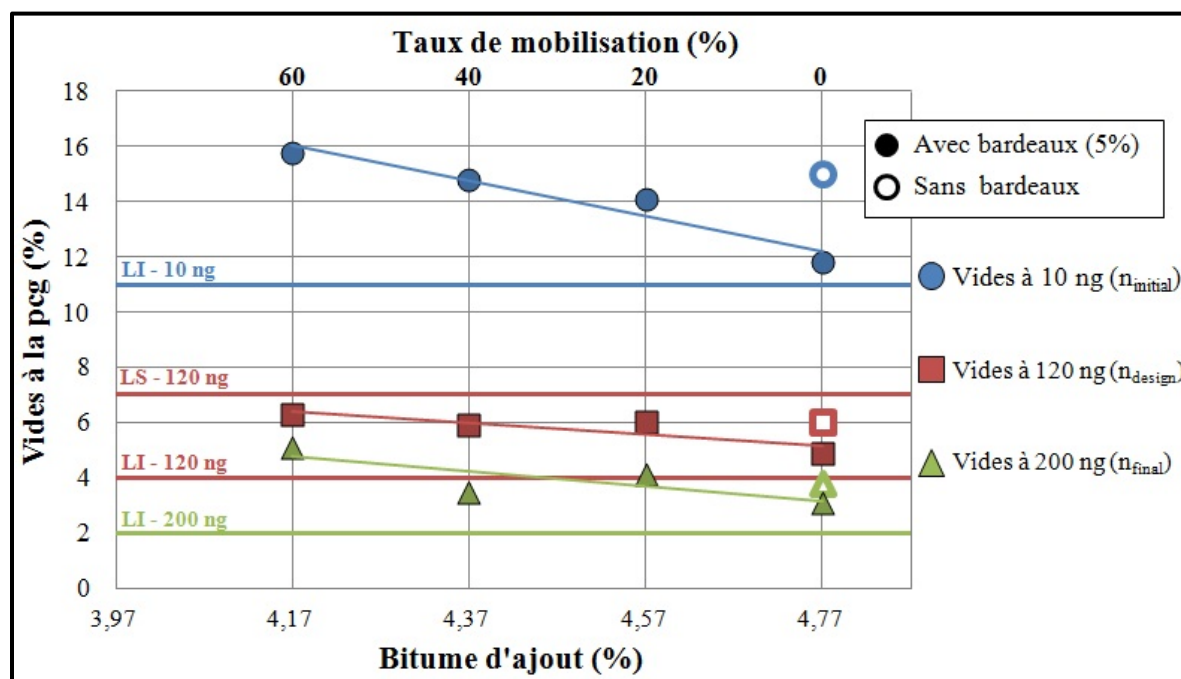


Figure 5.3 Résultats obtenus à la pég pour les enrobés de base (GB-20) incorporant 5 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation

Tout comme dans le cas des enrobés de surface, la Figure 5.3 montre que la substitution d'un pourcentage de la fraction granulaire 0-5 par des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation (5 % dans le cas des enrobé de base), sans réduire la teneur en bitume, augmente l'aptitude au compactage de l'enrobé. De plus, lorsqu'une mobilisation du bitume contenu dans ces particules est considérée, permettant de réduire ainsi la teneur en bitume d'ajout, les résultats présentés à la Figure 5.3 montrent que les vides à 10, 120 et 200 girations augmentent.

D'après les résultats de la Figure 5.3, une équivalence entre l'aptitude au compactage de l'enrobé de référence (GB20-B0) et celle d'un enrobé GB-20 avec 5 % de particules de bardeaux d'asphalte est attendue en considérant un taux de mobilisation du bitume des bardeaux de l'ordre de 40 %.

5.2 Essais thermomécaniques

Maintenant qu'il a été montré que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation augmente l'aptitude au compactage des enrobés bitumineux, il est important de s'assurer que cet ajout n'est pas préjudiciable vis-à-vis des propriétés thermomécaniques de l'enrobé. Dans un premier temps, il convient de vérifier le potentiel de déformation permanente des enrobés avec bardeaux. À cet égard, l'analyse des résultats de l'essai à l'orniéreur est tout à fait justifiée. Par la suite, une analyse des résultats obtenus des essais de retrait thermique empêché et de modules complexes sera essentielle afin de vérifier l'effet de l'incorporation de particules de bardeaux de postconsommation vis-à-vis des propriétés thermomécaniques autres que la simple mesure à l'orniéreur. Nous traiterons en détail de ces propriétés à cette section.

5.2.1 Orniérage

Comme nous l'avons évoqué à la section 4.2.1, l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans un enrobé de surface (ESG-10) et un enrobé de base

(GB-20), permet de satisfaire les exigences de la norme 4201 de la Méthode LC du MTQ vis-à-vis de la résistance attendue de l'enrobé face à l'orniérage (*Voir Figure 5.4*).

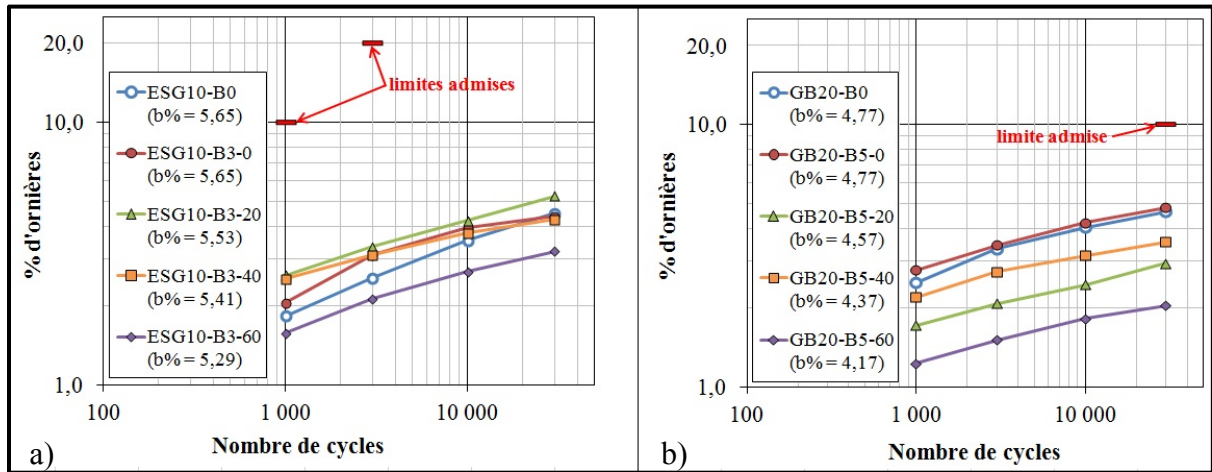


Figure 5.4 Évolution du pourcentage d'ornières durant l'essai à l'orniéreur pour :
a) les enrobés de surface de type ESG-10 et b) les enrobés de base de type GB-20 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)

Dans cette section, les résultats seront analysés dans la perspective de mettre en relief la faisabilité de réduire la teneur en bitume d'ajout dans la composition des enrobés bitumineux de manière à rentabiliser les opérations de production tout en visant à obtenir des performances similaires aux enrobés de référence.

5.2.1.1 Enrobé de surface : ESG-10

En considérant l'évolution de l'orniérage en cours d'essai pour les différents enrobés de surface incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, on constate que chacune d'elles présente des tendances similaires à celle de l'enrobé de référence. Ceci montre que l'ajout de particules de bardeaux postconsommation n'affecte en rien la performance de l'enrobé vis-à-vis de sa résistance à l'orniérage. De plus, une tendance générale se dessine à savoir que plus la quantité de bitume considérée mobilisable du bardeau est grande, faisant en sorte que la teneur en bitume d'ajout est ainsi diminuée, plus le niveau d'orniérage est faible. Il est connu (MTQ, 2005) que lorsque la teneur en bitume augmente, la résistance à l'orniérage de l'enrobé diminue. Globalement, en considérant le bitume du

bardeau, la teneur en bitume des enrobés avec bardeaux est plus significative que pour l'enrobé de référence. Dans la mesure où l'on assume que le bitume du bardeau soit mis à contribution, c'est-à-dire mobilisable, c'est donc dire que ce dernier est plus performant face aux déformations plastiques que le bitume d'ajout. Cette affirmation est justifiée du fait que le bitume qu'apportent les bardeaux est plus oxydé que le bitume d'ajout utilisé, donc plus dur et moins visqueux. Par ailleurs, on peut s'interroger quant à la mobilisation réelle du bitume des bardeaux. En effet, certains chercheurs (Navarro, 2011) ont montré que pour des enrobés bitumineux recyclés à chaud, certaines particules du matériau recyclé restent sous forme d'agglomérat. Quoi qu'il en soit, la rigidité du bitume provenant des bardeaux d'asphalte de postconsommation joue positivement sur les performances de l'enrobé vis-à-vis l'orniérage.

Afin de mieux cerner les résultats obtenus à l'essai à l'orniéreur pour les enrobés de surface, la Figure 5.5 présente les différents pourcentages d'ornières obtenus après 1 000, 3 000 et 30 000 cycles, et ce, pour l'ensemble des enrobés de type ESG-10 testés dans le cadre de ce programme expérimental.

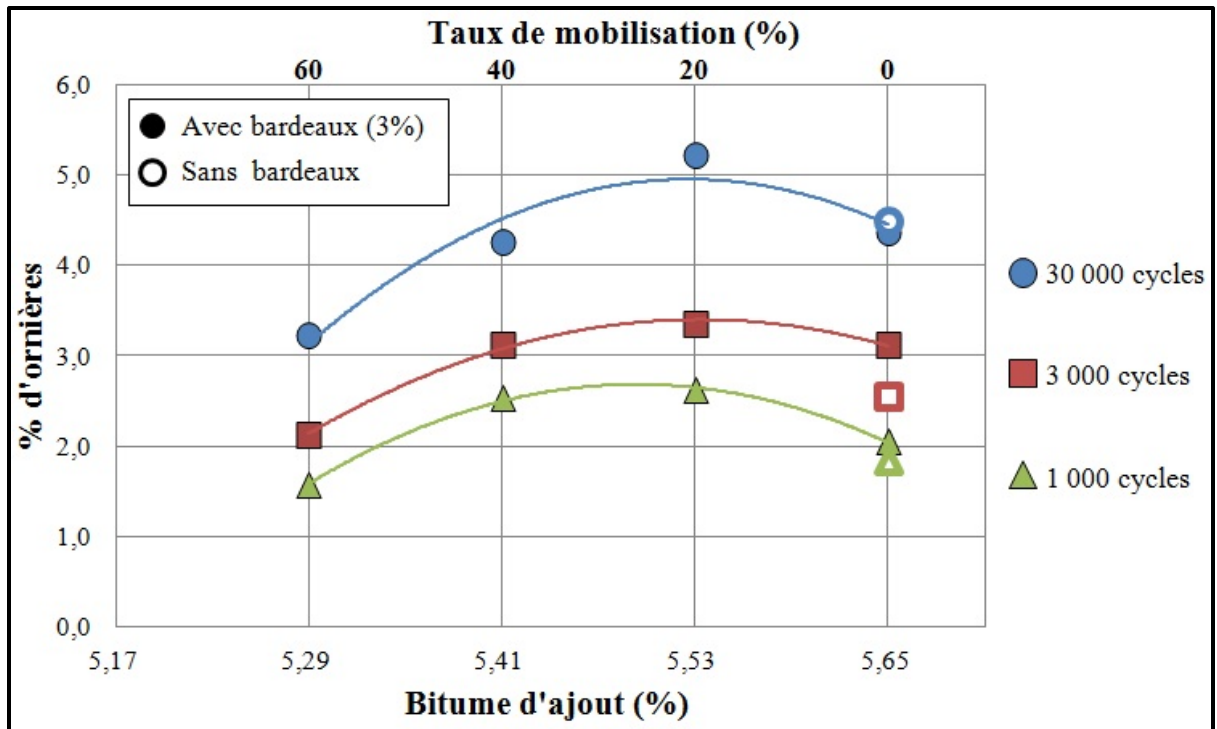


Figure 5.5 Résultats à l'ornièreur à 1 000, 3 000 et 30 000 cycles pour les différents enrobés de surface ESG-10

Sur les bases de la Figure 5.5, il est possible de constater qu'une mobilisation considérée du bitume des bardeaux de 0, 20, 40 et 60 % offre des résultats très similaires à l'enrobé de référence. Durant la totalité de l'essai, soit après 1 000, 3 000 et 30 000 cycles, la différence d'ornières obtenue entre l'enrobé de référence et les enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, est toujours à l'intérieur de 1,5 %. C'est pour cette raison que de considérer une mobilisation du bitume composant ces particules peut être envisageable. En référence aux résultats présentés à la Figure 5.5, on peut admettre qu'une mobilisation de 60 % donne une performance équivalente, sinon meilleure, à l'enrobé de référence vis-à-vis l'orniérage.

5.2.1.2 Enrobé de base : GB-20

Tout comme pour le cas des enrobés de surface, l'évolution de l'orniérage des différents enrobés de base (GB-20) incorporant 5 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation ont été comparées à celle de l'enrobé de référence (GB20-B0). La Figure

5.4b montre que l'évolution de l'orniérage présente des tendances relativement similaires pour tous les enrobés testés. Tout comme dans le cas des enrobés de surface, ceci montre que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans la composition d'un enrobé de base n'affecte en rien la performance de celui-ci quant à sa résistance à l'orniérage. La tendance générale qui avait été remarquée pour le cas des enrobés de surface semble, encore une fois, se concrétiser dans le cas des enrobés de base : plus la quantité de bitume considérée mobilisable du bardeau est grande, faisant ainsi en sorte que la teneur en bitume d'ajout et la quantité de bitume total dans l'enrobé est réduite, plus le niveau d'orniérage est faible. Tout comme pour les enrobés de surface, il est possible de conclure que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés de base joue positivement sur les performances de l'enrobé contre l'orniérage.

Dans l'intention de mieux cerner les résultats obtenus à l'essai à l'orniéreur pour les enrobés de base, la Figure 5.6 illustre les différents pourcentages d'ornières obtenus après 1 000, 3 000 et 30 000 cycles pour tous les enrobés de base de type GB-20.

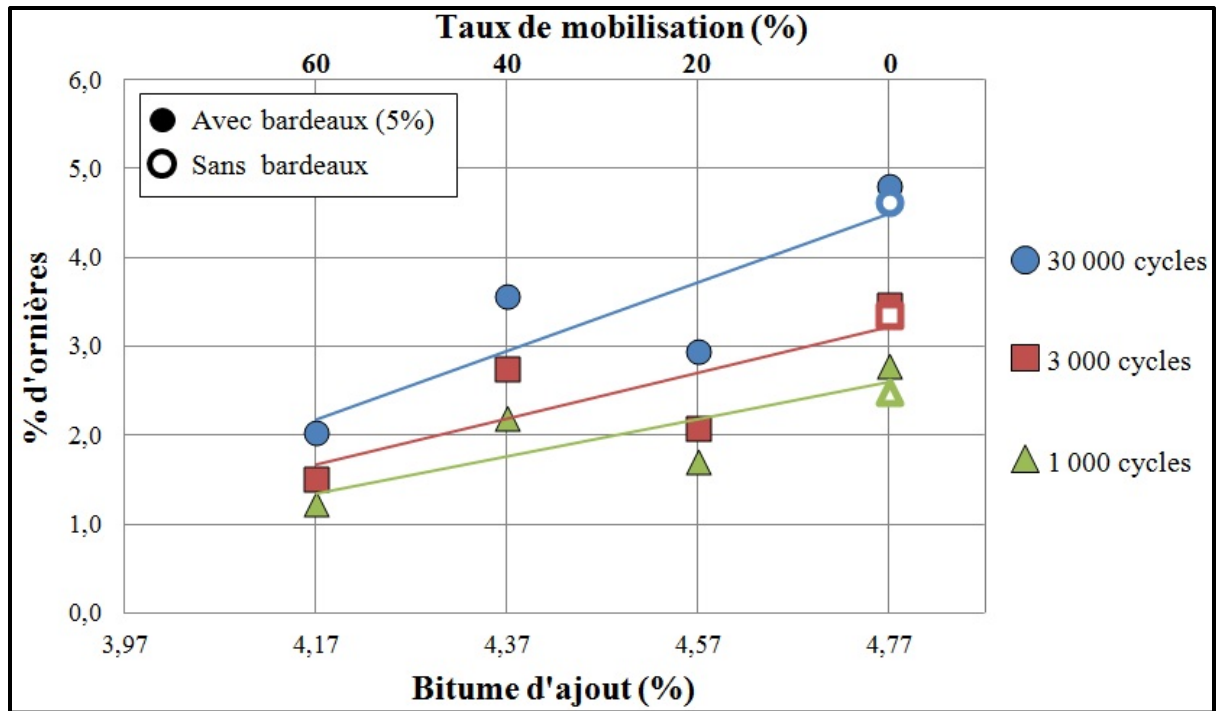


Figure 5.6 Résultats à l'ornièreur à 1 000, 3 000 et 30 000 cycles pour les différents enrobés de base GB-20

D'après la Figure 5.6, il est possible de constater qu'une mobilisation considérée du bitume des bardeaux de 0, 20, 40 et 60 % offre des résultats très similaires à l'enrobé de référence : les différents enrobés avec bardeaux ont offert de meilleurs résultats que l'enrobé de référence, à l'exception de l'enrobé GB20-B5-0 qui présente des résultats à peine supérieurs à ceux de l'enrobé de référence (écart maximum de 0,3 %).

À la lueur des résultats des essais à l'ornièreur, on peut envisager un taux de mobilisation de 60 % et obtenir ainsi une performance à l'orniérage semblable ou meilleure à celle de l'enrobé de référence.

5.2.2 Retrait thermique empêché

La résistance à la fissuration à basse température des enrobés bitumineux avec bardeaux d'asphalte de postconsommation a été étudiée à l'aide de l'essai du retrait thermique empêché (TSRST). L'essai a été réalisé sur trois éprouvettes, mais dans certains cas, comme

il a été souligné précédemment, l'une d'elles a été rejetée pour des raisons de résultats aberrants. Dans tous les cas, c'est la moyenne des résultats (deux ou trois) qui a été utilisée ici, dans le cadre de cette analyse. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 5.7.

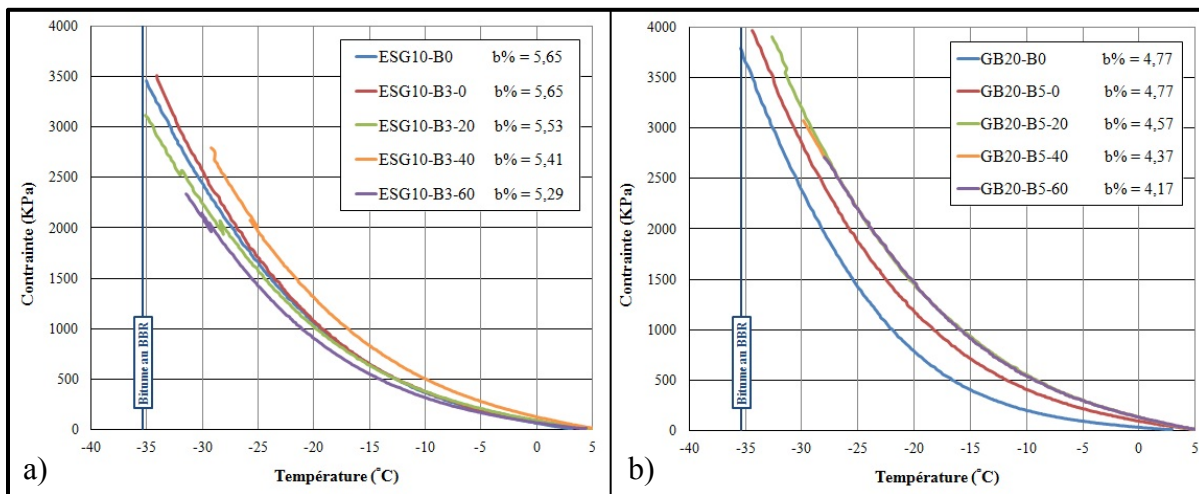


Figure 5.7 Évolution de la contrainte avec la diminution de la température pour les valeurs moyennes obtenues à l'essai de TSRST (taux de gel de 10 °C/h) :

a) les enrobés de surface de type ESG-10 et b) les enrobés de base de type GB-20 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)

Afin d'approfondir la compréhension de ces résultats, pour les deux types d'enrobé bitumineux étudiés, l'analyse sera subdivisée en deux étapes. D'abord, la température moyenne de rupture sera comparée entre chacun des types d'enrobé bitumineux. Ensuite, la contrainte de rupture mesurée obtenue sera aussi analysée.

Comme il a été souligné à la section 4.2.2, la teneur en vides au sein des différentes éprouvettes testées était variable. Or, aux basses températures, la teneur en vides est déterminante vis-à-vis la résistance à la rupture d'un matériau fragile. Pour comparer les différents résultats, il a été choisi de déterminer la contrainte de rupture effective appliquée à la fraction solide du matériau (σ_0), c'est-à-dire la contrainte calculée en considérant le matériau sans vide. Pour ce faire, la relation empirique entre la contrainte de rupture effective (σ_0) et la contrainte de rupture mesurée appliquée au matériau fragile a été utilisée (Young *et*

al. 1998). À partir de l'Équation 5.1, il est alors possible d'obtenir la contrainte de rupture effective offrant donc un résultat à la rupture intrinsèque au matériau.

$$\sigma_u = \sigma_0 (1 - P)^3 \quad (5.1)$$

Où : - σ_u : Contrainte de rupture mesurée (kPa)
 - σ_0 : Contrainte de rupture effective (kPa)
 - P : Porosité de l'éprouvette (%)

Cette façon de faire est justifiée du fait qu'à basse température, l'enrobé présente un comportement fragile tel qu'illustré à la Figure 5.8 (Olard et Di Benedetto, 2005).

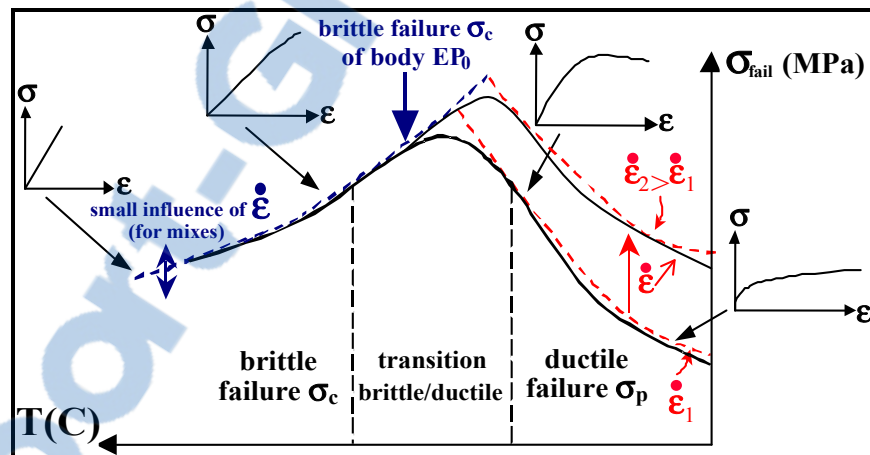


Figure 5.8 Évolution de la contrainte d'un enrobé bitumineux dépendamment de la température
 Tirée de Olard et Di Benedetto (2005, p. 17)

5.2.2.1 Enrobé de surface : ESG-10

Le Tableau 5.1 présente la température de rupture, la contrainte de rupture mesurée et la contrainte de rupture effective calculée pour les enrobés de surface testés.

Tableau 5.1 Résultats de contrainte de rupture optimale obtenue
pour toutes les éprouvettes de ESG-10 analysées

Enrobé	Bitume d'ajout (%)	#	T° _{rupture} (°C)	Vi (%)	Contrainte de rupture mesurée (σ_u) en kPa	Contrainte de rupture effective (σ_0) en kPa
ESG10-B0	5,65	A	-34,2	7,5	3400	4300
		B ⁽¹⁾	-35,9	7,7	3520	4480
		Moy.	-35,0	7,6	3460	4390
		s	1,2	0,1	85	128
		C.V.⁽²⁾ (%)	3,4	4,7	2,5	7,2
ESG10-B3-0	5,65	A ⁽¹⁾	-34,2	3,1	3690	4060
		B	-34,0	3,6	3320	3710
		Moy.	-34,1	3,3	3510	3880
		s	0,1	0,4	262	248
		C.V.⁽²⁾ (%)	0,7	12,8	7,5	6,4
ESG10-B3-20	5,53	A ⁽¹⁾	-35,0	5,5	3140	3720
		B	-34,2	5,5	2840	3370
		C ⁽¹⁾	-36,0	6,9	3340	4140
		Moy.	-35,1	6,0	3110	3740
		s	0,9	0,8	247	386
		C.V.⁽²⁾ (%)	2,6	13,3	7,9	10,3
ESG10-B3-40	5,41	A	-27,3	6,4	2270	2770
		B	-30,6	6,0	3070	3700
		C ⁽¹⁾	-29,1	6,4	2640	3220
		Moy.	-29,0	6,3	2660	3230
		s	1,6	0,2	400	465
		C.V.⁽²⁾ (%)	5,5	3,2	15,0	14,4
ESG10-B3-60	5,29	A	-29,8	6,3	2160	2630
		B ⁽¹⁾	-31,0	7,1	2350	2930
		C	-33,1	6,9	2640	3270
		Moy.	-31,3	6,8	2380	2940
		s	1,6	0,4	242	320
		C.V.⁽²⁾ (%)	5,1	5,9	10,2	10,9

⁽¹⁾ Éprouvette dont il a été nécessaire de la raccourcir et de refaire l'essai en raison de présence de vides majeurs à l'une des deux extrémités de l'éprouvette

⁽²⁾ C.V. : Coefficient de variation (C.V. = (s/moy)*100%)

Températures de rupture observées au TSRST : ESG-10 - La Figure 5.9 présente la relation entre la température de rupture et la teneur en bitume d'ajout pour les différents enrobés testés. Les valeurs indiquées sont la moyenne obtenue lors des différents essais TSRST. Pour chacune des valeurs moyennes représentées, les valeurs maximales et minimales correspondantes ont été indiquées.

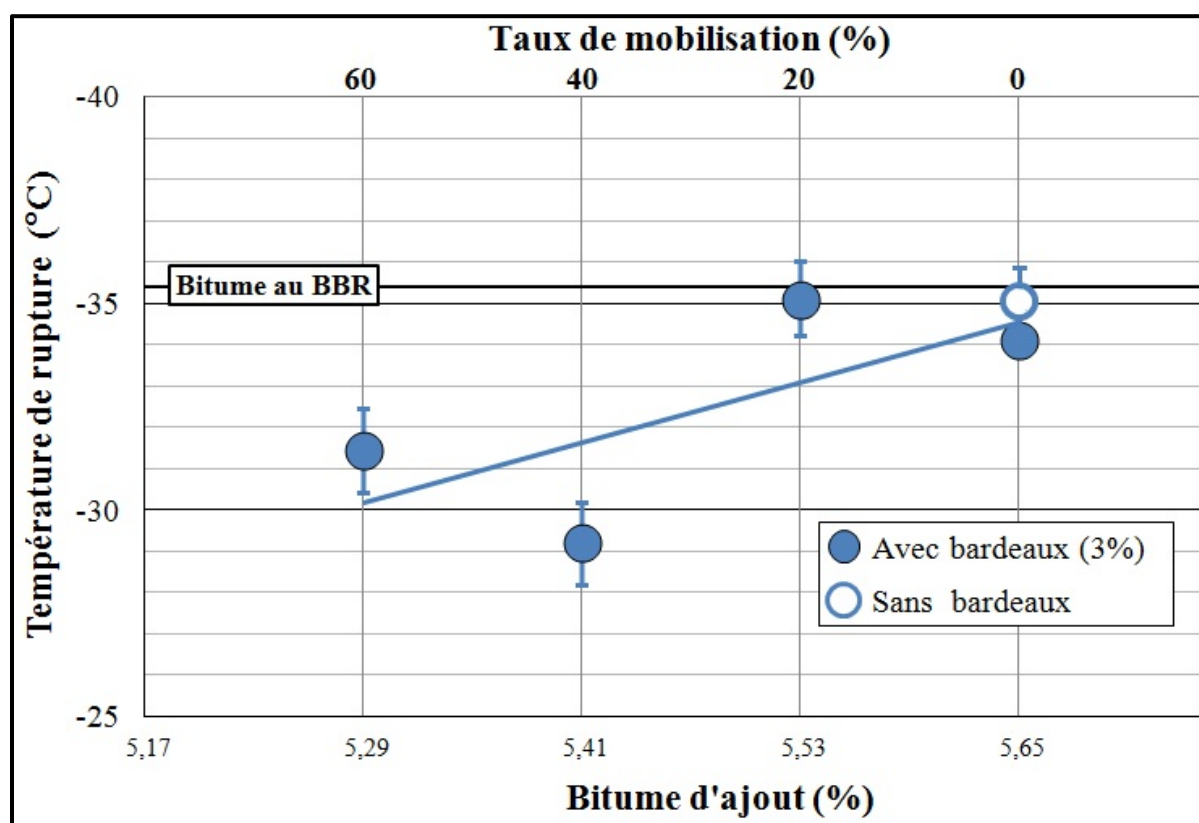


Figure 5.9 Relation entre la température de rupture moyenne obtenue à l'essai de TSRST et la teneur en bitume d'ajout pour les enrobés de surface de type ESG-10 (taux de gel de 10 °C/h)

La Figure 5.9 montre que globalement la température de rupture de l'enrobé augmente (se rapproche de zéro) et s'éloigne considérablement de l'enrobé de référence lorsque la mobilisation considérée du bitume des bardeaux est supérieure à 20 %.

Par ailleurs, la température basse du bitume obtenue au BBR, la valeur de T_b , est indiquée à la Figure 5.9 en guise de référence. Notons qu'il est reconnu que la valeur de T_b du bitume

est souvent associée à la température de rupture observée sur l'enrobé à l'essai au TSRST. À cet égard, les résultats de la Figure 5.9 montrent qu'aucun des enrobés testés, avec et sans bardeaux, a présenté une température minimale moyenne de rupture inférieure à la valeur de la température basse au BBR. Dans ce contexte, de manière à montrer l'effet de l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans un enrobé bitumineux de surface sur sa performance à basse température, les résultats obtenus pour les enrobés avec bardeaux ont ainsi été comparés directement à ceux obtenus de l'enrobé de référence (ESG10-B0). Sur cette base, il est possible de montrer que l'enrobé considérant une mobilisation de 20 % du bitume des bardeaux (ESG10-B3-20) présente des résultats pratiquement identiques à ceux de l'enrobé de référence. De plus, l'enrobé confectionné en ne considérant aucune mobilisation du bitume du bardeau (ESG10-B3-0) présente également des résultats fort similaires à l'enrobé de référence. C'est donc dire que du point de vue de la température de rupture, il est envisageable de considérer une mobilisation du bitume du bardeau de 20 %. Au-delà de cette valeur, la température de rupture est réduite.

Contraintes de rupture obtenues au TSRST : ESG-10 - Les résultats liés à la contrainte de rupture mesurée et à la contrainte effective calculée obtenues des essais de TSRST sont présentés à la Figure 5.10.

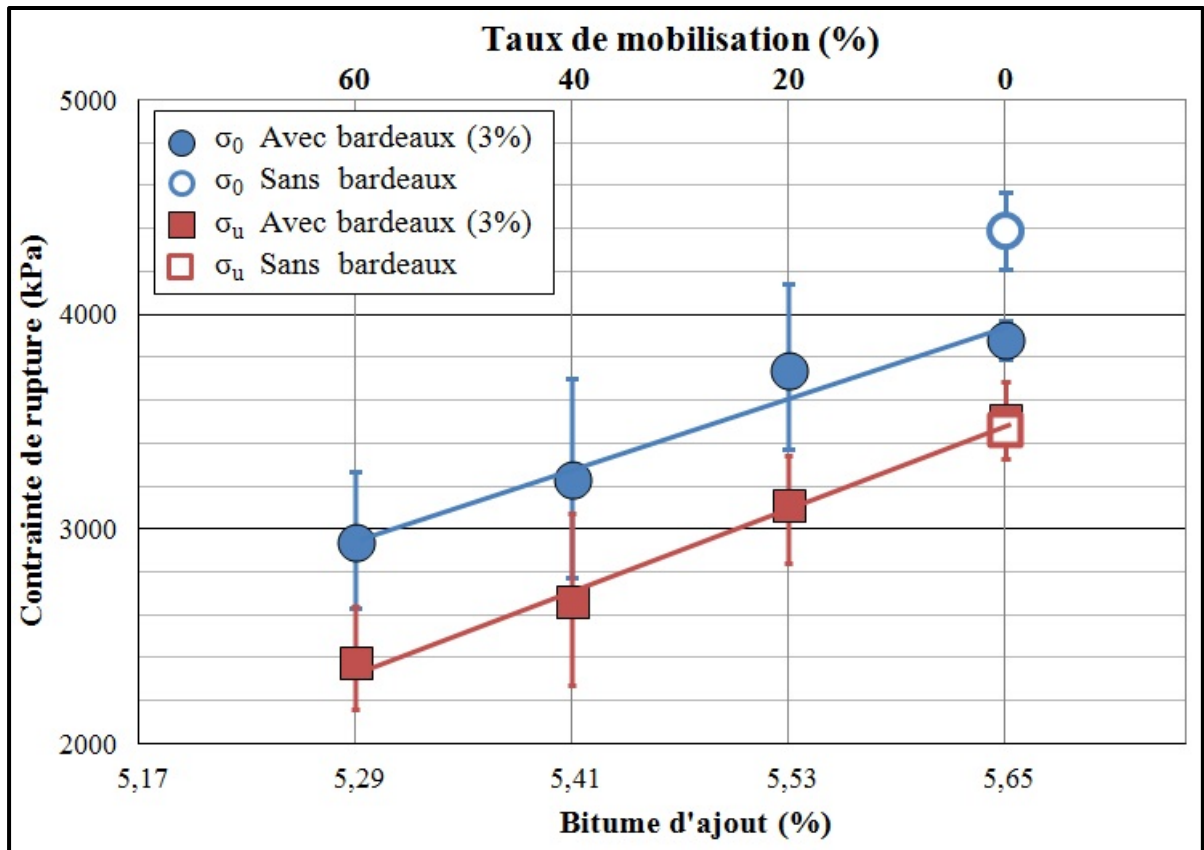


Figure 5.10 Contraintes moyennes de rupture mesurées (σ_u) et effectives (σ_0) obtenues des essais de TSRST sur les enrobés de surface ESG-10 (taux de gel de 10 °C/h)

Les résultats présentés à la Figure 5.10 montrent une tendance que plus la mobilisation considérée du bitume du bardeau est importante, plus la contrainte de rupture diminue. D'après ces résultats, l'enrobé considérant une mobilisation de 20 % présente des résultats s'approchant des résultats obtenus pour l'enrobé de référence. Au-delà du seuil de 20 %, les résultats des enrobés avec bardeaux s'éloignent de ceux obtenus pour l'enrobé ESG10-B0.

Pour un enrobé donné, les résultats présentés à la Figure 5.10 montrent que la contrainte de rupture effective est évidemment toujours plus grande que la contrainte de rupture mesurée. En s'attardant aux pentes de régression linéaire des relations contrainte/teneur en bitume d'ajout, on remarque que même si les contraintes de rupture effectives sont plus importantes, les pentes de régression sont pratiquement parallèles signifiant que le fait d'avoir des vides

variables d'une éprouvette à l'autre, d'un enrobé à l'autre, n'a pas joué un rôle prédominant dans les résultats de l'essai, voir dans l'analyse.

En définitive, l'analyse des résultats de la contrainte de rupture mesurée et de la température à la rupture obtenue des essais de TSRST converge vers une même tendance. Pour les enrobés de surface de type ESG-10 incorporant 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, il est donc tout à fait réaliste de considérer une mobilisation du bitume du bardeau de 20 %, et ce, pour atteindre une performance équivalente à basse température à celle de l'enrobé de référence (ESG10-B0).

5.2.2.2 Enrobé de base : GB-20

Le Tableau 5.2 présente les températures de rupture et les contraintes de rupture mesurées et effectives obtenues des essais de TSRST pour les enrobés de base (GB-20) avec et sans bardeaux d'asphalte de postconsommation.

Tableau 5.2 Résultats de contrainte de rupture optimale obtenue pour toutes les éprouvettes de GB-20 analysées

Enrobé	Bitume d'ajout (%)	#	T° _{rupture} (°C)	Vi (%)	Contrainte de rupture mesurée (σ_u) en kPa	Contrainte de rupture effective (σ_0) en kPa
GB20-B0	4,77	A ⁽¹⁾	-34,2	3,9	3660	4124
		C	-36,7	3,9	3930	4428
		Moy.	-35,4	3,9	3800	4282
		s	1,8	0,7	191	215
		C.V. ⁽²⁾	5,1	17,9	5,0	5,0
GB20-B5-0	4,77	A	-35,9	3,0	4430	4854
		B ⁽¹⁾	-32,5	3,3	3100	3428
		Moy.	-34,2	3,2	3770	4156
		s	2,4	0,2	940	1008
		C.V. ⁽²⁾	7,0	6,2	24,9	24,3
GB20-B5-20	4,57	A ⁽¹⁾	-31,8	3,1	2640	2902
		B ⁽¹⁾	-33,2	2,5	4080	4402
		Moy.	-32,5	2,8	3360	3659
		s	0,96	0,4	1018	1061
		C.V. ⁽²⁾	3,0	14,3	30,3	29,0
GB20-B5-40	4,37	A ⁽¹⁾	-30,2	6,6	3380	4148
		B ⁽¹⁾	-31,0	7,4	3100	3904
		Moy.	-30,6	7,0	3240	4028
		s	0,59	0,5	198	173
		C.V. ⁽²⁾	1,9	7,1	6,1	4,3
GB20-B5-60	4,17	A	-27,6	3,3	2470	2732
		B ⁽¹⁾	-28,5	2,8	2810	3060
		Moy.	-28,0	3,0	2640	2893
		s	0,6	0,4	240	232
		C.V. ⁽²⁾	2,1	13,3	9,1	8,0

⁽¹⁾ Éprouvette dont il a été nécessaire de la raccourcir et de refaire l'essai en raison de présence de vides majeurs à l'une des deux extrémités de l'éprouvette

⁽²⁾ C.V. : Coefficient de variation (C.V. = (s/moy)*100%)

Températures de rupture observées au TSRST : GB-20 - Les températures de rupture obtenues des essais de TSRST sont présentées à la Figure 5.11. À noter que les valeurs

indiquées représentent la moyenne calculée pour les différents essais de TSRST réalisés. Pour chacune des valeurs moyennes, les valeurs maximale et minimale obtenues lors des essais pour ce type d'enrobé bitumineux sont également indiquées.

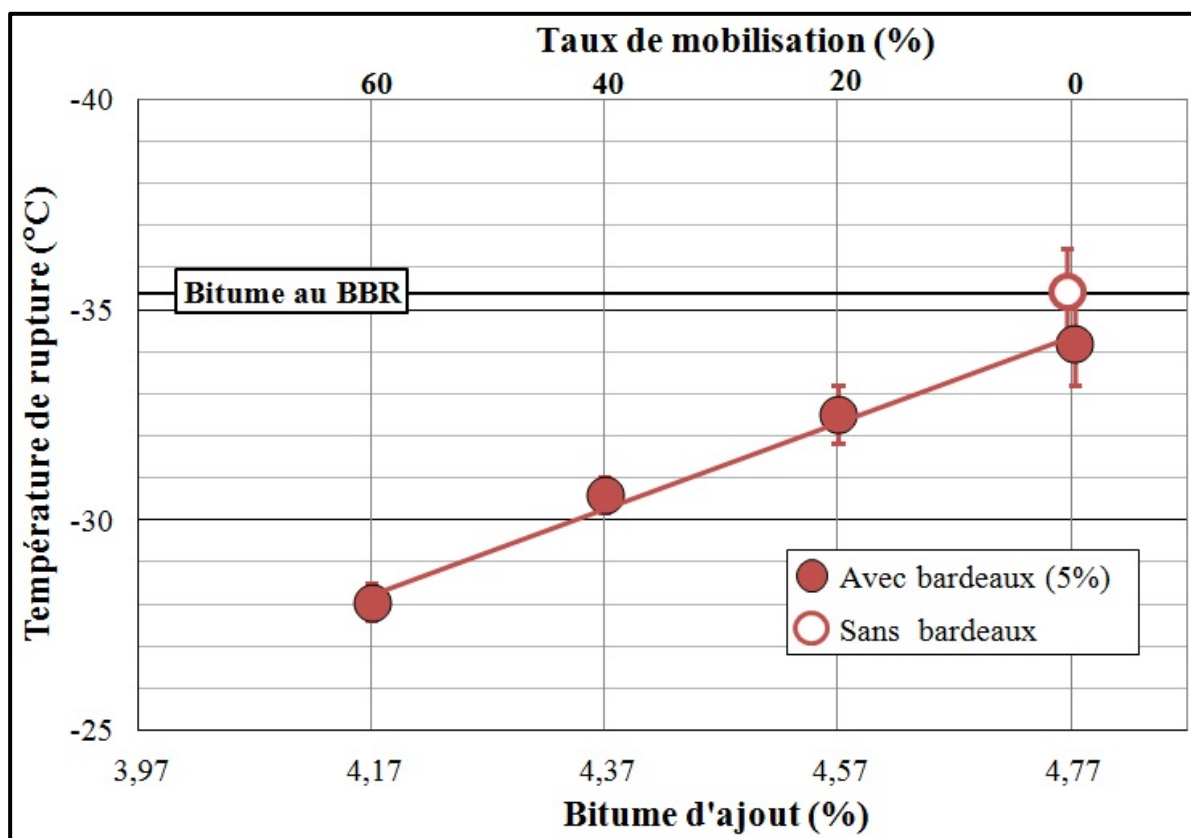


Figure 5.11 Température de rupture moyenne obtenue à l'essai de TSRST pour les enrobés de base de type GB-20 (taux de gel de 10 °C/h)

La Figure 5.11 montre une augmentation (se rapproche de zéro) relativement constante de la température de rupture de l'enrobé lorsque la teneur en bitume d'ajout est réduite dans les enrobés confectionnés avec bardeaux. Les résultats présentés montrent que seul l'enrobé de référence (GB20-B0) présente une température de rupture avoisinante la valeur de la température basse (T_b) du bitume obtenue de l'essai au BBR. Par ailleurs, l'enrobé incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation et confectionné en ne considérant aucune mobilisation du bitume (GB20-B5-0) présente une performance équivalente à celle de l'enrobé de référence. Cependant, tous les autres enrobés testés montrent des températures de rupture supérieures à la température basse du bitume au BBR.

D'après ces informations, il semble que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation du point de vue de l'essai de TSRST, dans le cas des enrobés de base, peut être jugé équivalente à celle de l'enrobé de référence que dans la mesure où l'on ne considère aucune mobilisation du bitume des particules de bardeaux de postconsommation.

Contraintes de rupture obtenues au TSRST : GB-20 - En ce qui a trait aux contraintes de rupture obtenues de l'essai de TSRST pour les enrobés GB-20, les résultats sont présentés à la Figure 5.12.

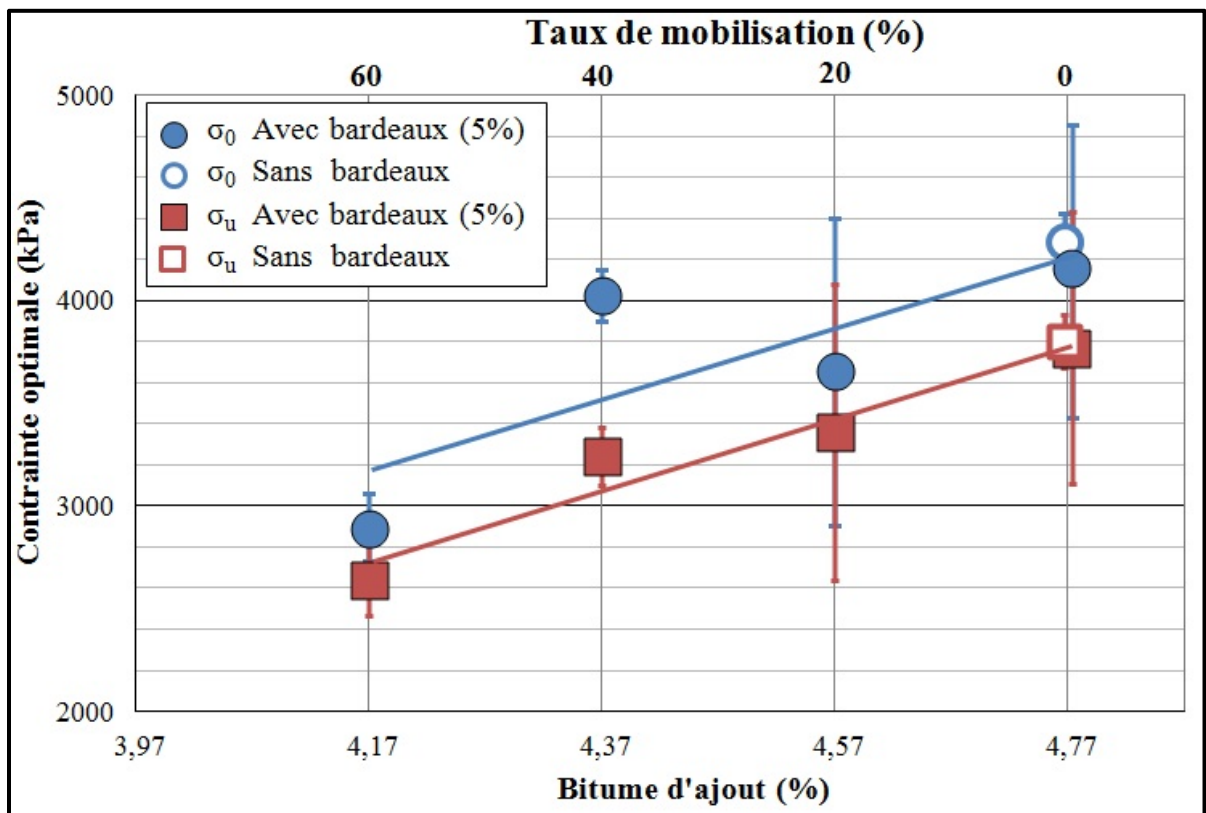


Figure 5.12 Contraintes moyennes de rupture mesurées (σ_u) et effectives (σ_0) obtenues des essais de TSRST sur les enrobés de base GB-20 (taux de gel de 10 °C/h)

Les résultats présentés à la Figure 5.12 montrent que les enrobés confectionnés en considérant une mobilisation de 0, 20 et 40 % du bitume du bardeau présentent une contrainte moyenne de rupture mesurée de tendance similaire à celle de l'enrobé de référence. Cependant, le niveau d'incertitude quant aux résultats obtenus des essais réalisés

pour l'enrobé GB20-B5-0 complexifie nettement l'analyse des résultats. Usuellement, pour les essais de TSRST le coefficient de variation (C.V.) tourne autour de 5 à 9 % alors qu'il se situe autour de 25 % pour les enrobés GB20-B5-0 et GB20-B5-20. Les valeurs de C.V. pour ces derniers sont anormales. Il est possible que les écarts entre les résultats d'une famille d'enrobé donnée pour les essais réalisés soient fortement liés à la longueur des éprouvettes prélevées dans les plaques, dont la dimension de celles-ci aurait pu jouer un rôle préjudiciable (*Voir* section 4.2.2.1). Par ailleurs, on pourrait penser que le fait d'incorporer une quantité plus importante de particules de bardeaux dans l'enrobé (soit 5 % pour les enrobés de type GB-20 et 3 % pour les enrobés de type ESG-10) puisse expliquer en partie une augmentation des écarts entre les résultats, due à un accroissement de l'hétérogénéité au sein des éprouvettes, lequel a une incidence d'autant plus significative pour des éprouvettes de tailles relativement limitées (\varnothing : 60 mm). Or, les résultats obtenus pour les enrobés GB20-B5-40 et GB20-B5-60 montrent qu'il est tout à fait réaliste d'obtenir des valeurs de C.V. plus conventionnelles pour des enrobés avec bardeaux (C.V. de 6 % et 9% respectivement).

Notons également, que, tout comme dans le cas des enrobés de surface, les pentes de régression linéaire des relations contraintes/teneur en bitume d'ajout dans l'enrobé sont à toute fin pratique parallèles signifiant que la quantité de vides dans les éprouvettes n'a pas affecté l'interprétation des résultats.

En définitive, les résultats de l'analyse concernant la contrainte de rupture mesurée sont différents de ceux obtenus de l'analyse faite d'après la température de rupture. De notre avis, il est préférable de faire un choix conservateur quant à la mobilisation permise pour la confection d'enrobé de base incorporant des particules de bardeaux du point de vue de l'essai de TSRST. Par conséquent, pour les enrobés de base avec bardeaux (5 %), aucune mobilisation du bitume du bardeau ne pourrait, à priori, être considérée sans que la résistance à la fissuration thermique soit affectée. Des essais complémentaires seraient justifiés pour valider cet énoncé.

5.2.3 Modules complexes

L'essai du module complexe servant à cerner le comportement viscoélastique linéaire en petites déformations des enrobés bitumineux (ESG-10 et GB-20) incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation a été effectué sur l'ensemble des enrobés. À la section 4.2.3, nous avons présenté aux Tableaux 4.8 et 4.9 les paramètres du modèle 2S2P1D pour chacun des enrobés testés. Rappelons que le modèle 2S2P1D permet de modéliser le comportement viscoélastique en petites déformations d'un enrobé.

Les résultats expérimentaux (points) et les résultats modélisés suivant 2S2P1D (lignes continues) pour tous les enrobés testés dans le cadre de cette campagne expérimentale sont présentés dans le plan Cole-Cole à la Figure 5.13.

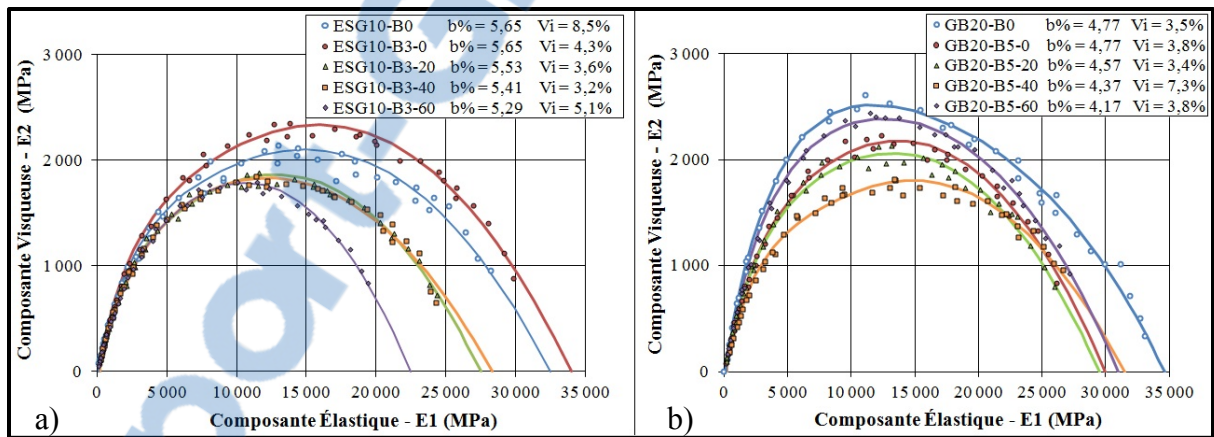


Figure 5.13 Présentation dans le plan Cole-Cole des résultats de module complexe pour :
a) les enrobés de surface de type ESG-10 et b) les enrobés de base de type GB-20 selon le pourcentage de bitume d'ajout dans le mélange (b%)

Étant donné qu'il est difficile d'interpréter, d'analyser et de comparer l'ensemble des données qui ressortent des essais de module complexe seulement d'après le plan Cole-Cole, il a été décidé de présenter ces résultats de diverses façons afin d'établir une analyse la plus complète possible. Premièrement, il est proposé d'analyser l'effet de l'ajout de bardeaux sur le module vitreux (E_{∞}). Le module vitreux correspond à la raideur maximale attendue de l'enrobé c'est-à-dire aux très basses températures et/ou aux très hautes fréquences de

sollicitation. Dans un deuxième temps, les courbes maîtresses modélisées à partir du modèle 2S2P1D seront montrées dans un domaine fréquentiel équivalent (a_T -fr) suivant une température de référence fixée à 10 °C. Finalement, nous conclurons avec une analyse visant à considérer l'écart entre les modules complexes des enrobés avec bardeaux à ceux des enrobés de référence respectifs, le tout étant également présenté dans un domaine fréquentiel équivalent (a_T -fr) toujours suivant la température de référence choisie, 10 °C. Le domaine fréquentiel équivalent permet une vision globale des variations des résultats obtenus aux diverses fréquences pour l'ensemble des enrobés à l'étude.

5.2.3.1 Analyse selon le module vitreux (E_∞)

Les résultats de module vitreux obtenus du calage du modèle 2S2P1D à l'ensemble des résultats d'essais sur les enrobés de surface et les enrobés de base, sont présentés au Tableau 5.3.

Tableau 5.3 Résultats des modules vitreux des enrobés de surface de type ESG-10 et des enrobés de base de type GB-20 analysés

Enrobé de surface	Module vitreux (E_∞)	Enrobé de base	Module vitreux (E_∞)
ESG10-B0	32 500	GB20-B0	34 500
ESG10-B3-0	34 000	GB20-B5-0	30 000
ESG10-B3-20	27 500	GB20-B5-20	29 500
ESG10-B3-40	28 300	GB20-B5-40	31 500
ESG10-B3-60	22 500	GB20-B5-60	31 000

Modules vitreux des enrobés de surface : ESG-10 - À partir des résultats présentés au Tableau 5.3, nous avons tracé la relation entre le module vitreux (E_∞) des différents enrobés de surface (ESG-10) et la teneur en bitume d'ajout dans l'enrobé (*Voir* Figure 5.14). La Figure 5.14 vise à cerner si l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation

et la mobilisation du bitume le constituant modifie le comportement fragile des enrobés bitumineux, soit aux très basses températures ou aux très hautes fréquences.

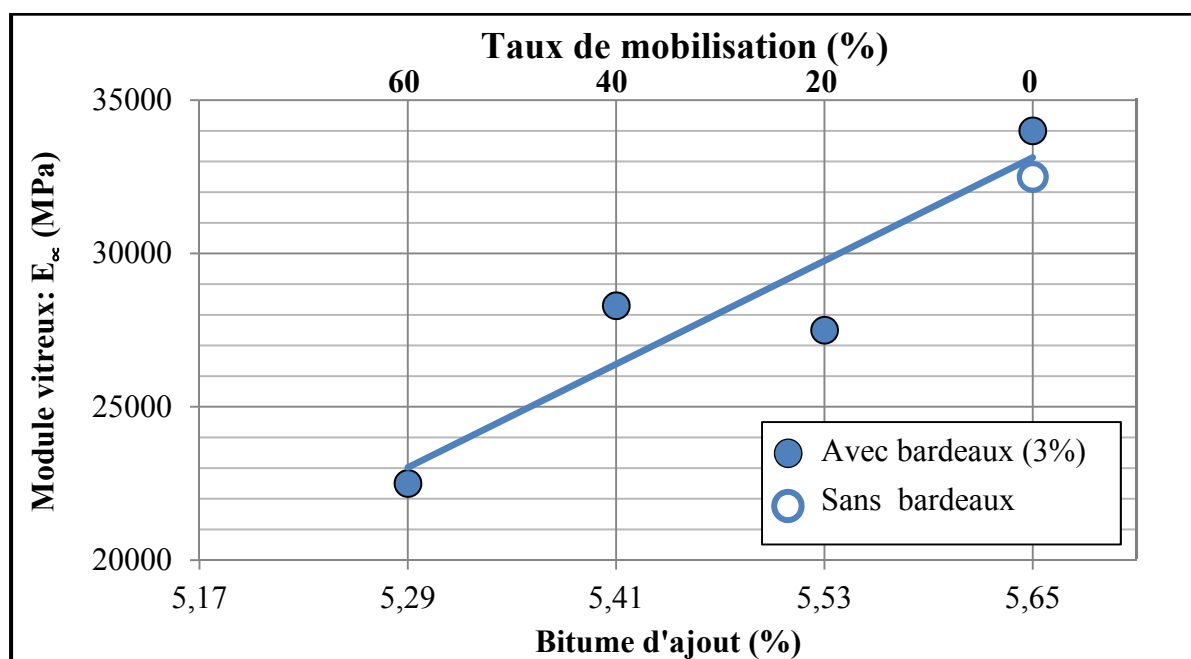


Figure 5.14 Présentation des résultats du module vitreux (E_{∞}) des différents enrobés de surface de type ESG-10

Les résultats de la Figure 5.14, montrent que l'ajout de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans l'enrobé tout en ne considérant aucune mobilisation du bitume du bardeau (ESG10-B3-0) présente un module vitreux légèrement supérieur à celui obtenu pour l'enrobé de référence (ESG10-B0). Par ailleurs, lorsqu'une mobilisation du bitume du bardeau est considérée, le module vitreux des enrobés diminue proportionnellement et ce, probablement due au fait que, d'une part, la quantité de bitume d'ajout en est ainsi réduite et, d'autre part, que la fraction granulaire totale est également diminuée. En effet, rappelons que l'ajout des particules de bardeaux a été fait en substitution à la fraction 0-5 du granulat. En définitive, le remplacement d'une fraction des particules minérales, relativement rigides, par une fraction de particules de bardeaux, nettement plus molles, modifie le squelette granulaire et change substantiellement la valeur du module vitreux de l'enrobé.



Module vitreux des enrobés de base : GB-20 - L'analyse menée pour les enrobés de surface vis-à-vis des modules vitreux peut également être transposée aux enrobés de base. D'après les résultats présentés au Tableau 5.3, le module vitreux (E_{∞}) établi pour les différents enrobés GB-20 testés, avec et sans bardeaux sont présentés graphiquement à la Figure 5.15.

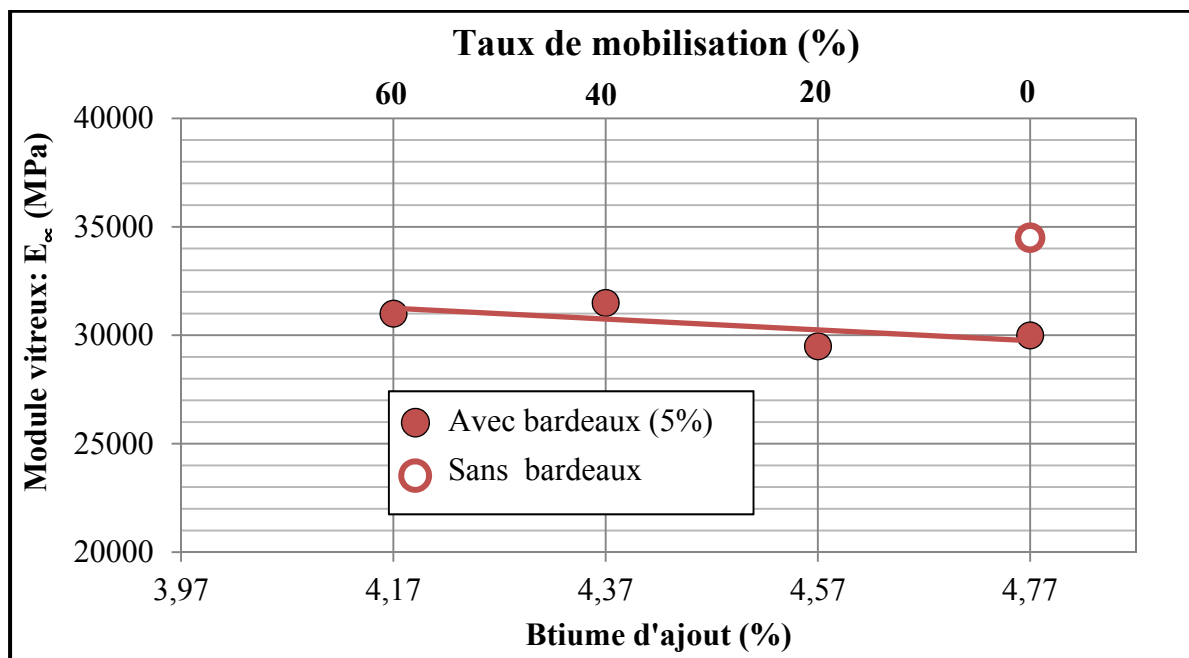


Figure 5.15 Présentation des résultats du module vitreux (E_{∞}) des différents enrobés de base de type GB-20

Les résultats présentés à la Figure 5.15 montrent que les enrobés incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation tout en considérant ou non une certaine mobilisation du bitume du bardeau présentent des modules vitreux inférieurs à celui déterminé pour l'enrobé de référence (GB20-B0). De plus, lorsque la mobilisation du bitume du bardeau considérée varie de 0 % à 60 %, on peut voir que le module vitreux des enrobés avec bardeaux reste pratiquement constant, contrairement aux enrobés de surface où l'on avait remarqué une certaine variation. Ceci s'explique en partie du fait que dans les enrobés de base, l'incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, faite en substitution à la fraction granulaire de calibre 0-5, est de l'ordre de 5 % comparativement aux enrobés de surface qui est de 3 %, c'est-à-dire nettement plus significative. Par contre, pour

déterminer quel pourcentage de mobilisation du bitume des bardeaux d'asphalte de postconsommation pourrait être applicable, il sera nécessaire d'étudier les résultats sur des pistes d'analyse différentes.

5.2.3.2 Analyse des courbes maîtresses

La mise en forme d'une courbe maîtresse requiert que l'on analyse les résultats pour une température donnée, fixée à 10 °C dans le cadre de cette analyse. Les courbes maîtresses calculées à partir de 2S2P1D ont été tracées dans le domaine $|E^*|$ vs f_e ($f_e = a_T \cdot f_r$) pour les deux familles d'enrobés étudiées et seront traitées simultanément.

Courbes maîtresses des enrobés de surface : ESG-10 et GB-20 – Les Figures 5.16 et 5.17 présentent, dans le domaine $|E^*|$ vs f_e ($f_e = a_T \cdot f_r$), les courbes maîtresses pour une température de référence fixée à 10 °C et calculées à partir de 2S2P1D pour les enrobés de surface (*Voir* Figure 5.16) et les enrobés de base (*Voir* Figure 5.17). Dans les deux cas, les courbes sont relativement semblables, mais présentent un certain décalage. Bien que ces courbes donnent une vision globale du comportement des enrobés, il demeure difficile de quantifier les écarts. C'est pourquoi nous proposons à la section suivante de présenter les résultats en calculant les écarts par rapport aux enrobés de référence respectifs.

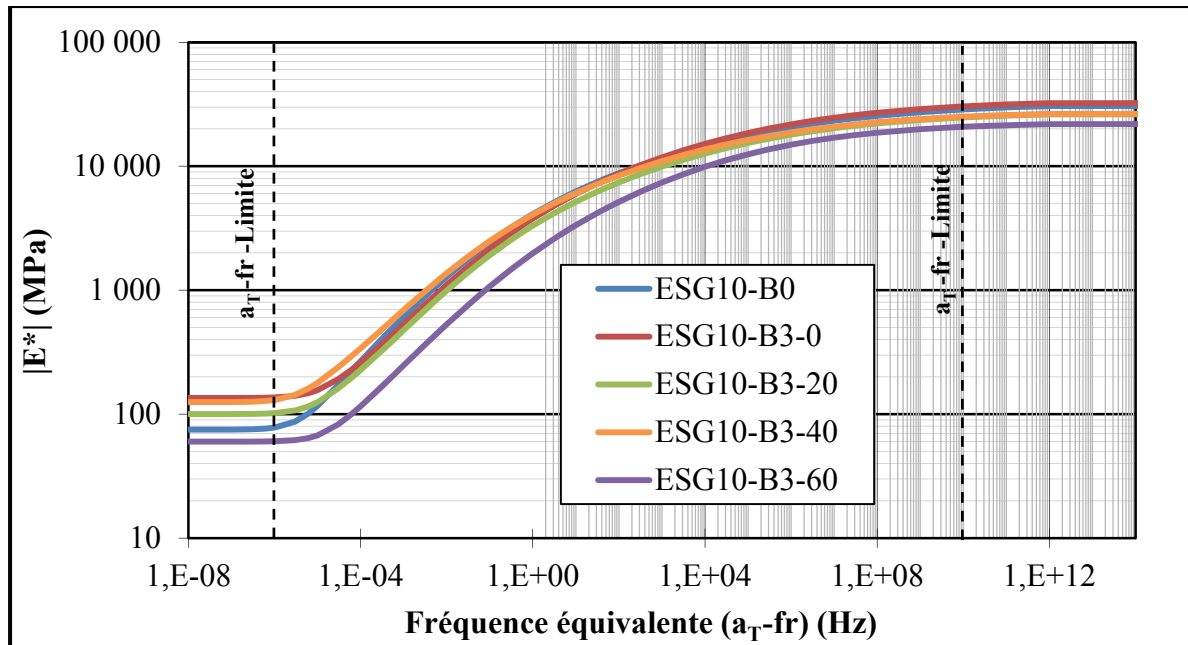


Figure 5.16 Courbes maîtresses à 10 °C calculées à partir de 2S2P1D pour les différents enrobés de surface de type ESG-10 testés dans le cadre de ce programme expérimental

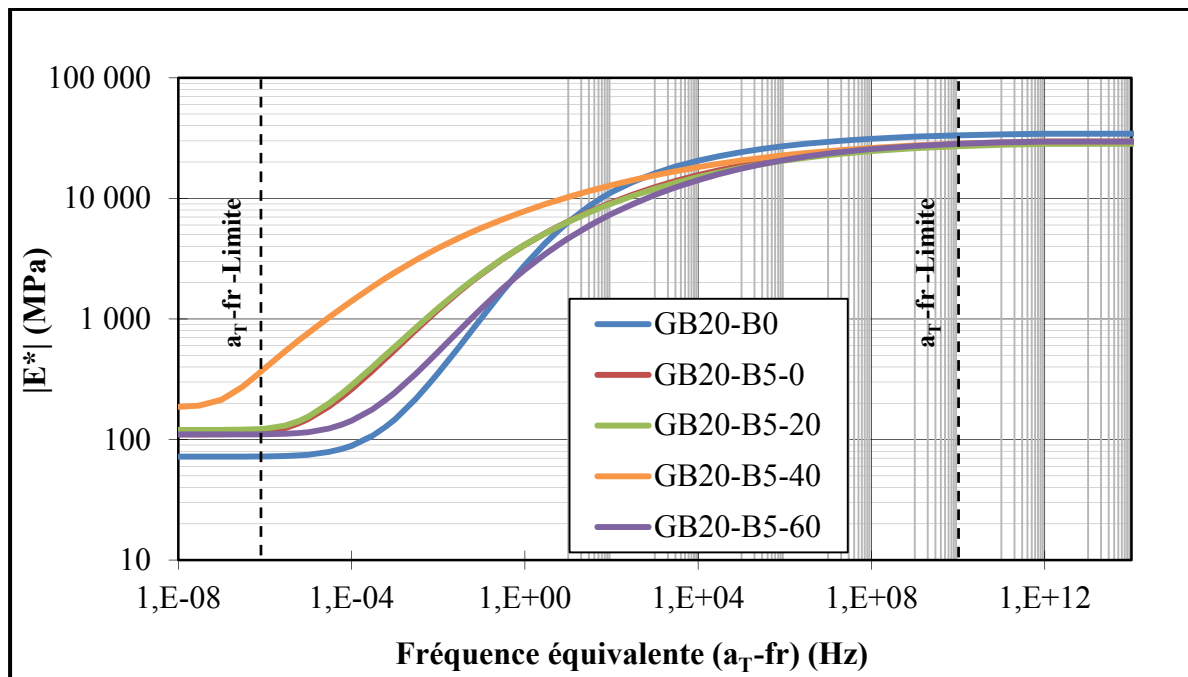


Figure 5.17 Courbes maîtresses à 10 °C calculées à partir de 2S2P1D pour les différents enrobés de base de type GB-20 testés dans le cadre de ce programme expérimental

5.2.3.3 Analyse selon la représentation de l'écart des modules complexes dans un domaine fréquentiel équivalent f_e ($f_e = a_T \cdot f_r$)

Comme il a été mentionné à la section 2.2.2.3, le module complexe est décrit par Di Benedetto et Corté (2004, p. 87) comme étant : « le nombre complexe défini comme le rapport entre l'amplitude complexe de la contrainte sinusoïdale de pulsation (ω) appliquée au matériau et l'amplitude complexe de la déformation sinusoïdale qui en résulte en régime établi. Compte tenu du caractère viscoélastique du matériau, la déformation accuse un retard sur la contrainte, se traduisant par un angle de déphasage (φ) entre les deux signaux : $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$. » Toujours selon Di Benedetto et Corté (2004), le module complexe peut être présenté ainsi :

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} \quad (5.2)$$

Alors que les paramètres σ^* et ε^* peuvent être posés comme :

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (5.4)$$

D'après les équations précédentes, le module complexe peut alors s'écrire :

$$E^* = \frac{\sigma_0 e^{i\varphi}}{\varepsilon_0} \quad (5.5)$$

Sachant que la norme du module complexe $|E^*|$ est le rapport entre l'amplitude de la contrainte (σ_0) et l'amplitude de la déformation (ε_0), on a :

$$E(\omega)^* = |E^*| e^{i\varphi} \quad (5.6)$$

Rappelons que le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé dépend de la température et que le module complexe (E^*) dépend à la fois de la pulsation (ω) et de la température : $E^*(\omega, T)$. Or, puisque le module complexe de l'enrobé décrit généralement une courbe unique dans le plan Cole-Cole lorsque ω et T varient, le module peut s'exprimer en fonction d'une seule variable : soit : $E^*(\omega, T) = E^*(\omega \cdot \tau(T)) = E^*(\omega \cdot a_T \cdot \tau_0)$. C'est le principe d'équivalence temps-température (PETT). Notons que $\tau(T)$ est une fonction de la température appelée temps de relaxation et que τ_0 est le temps de relaxation à la température de référence.

Le module complexe est donc une fonction qui varie suivant les conditions de sollicitation. Pour quantifier les écarts, on propose ainsi de définir un coefficient complexe, désigné coefficient complexe de mobilisation (CCM*), qui permet de quantifier l'effet de la teneur en bitume d'ajout sur le module complexe des enrobés avec bardeaux sur toute la gamme de températures (T) et de fréquences (fr). C'est le rapport entre le module complexe de l'enrobé avec bardeaux et celui de l'enrobé de référence pour tout couple (T , fr). Le calcul de CCM* exploite l'équivalence entre la fréquence et la température (Delaporte *et al.*, 2007). Le coefficient complexe de mobilisation (CCM*) est défini à une fréquence équivalente, f_e , lorsque le PETT (partiel ou total) est vérifié, par l'équation suivante :

$$CCM^* = \frac{E_{Bi}^*}{E_{REF}^*} \quad (5.7)$$

CCM* est un nombre complexe (norme et angle de phase), sans unité. La norme de $|CCM^*|$ est le rapport des normes des modules de l'enrobé en considérant un taux 'i' de mobilisation de bitume des bardeaux ($|E_{Bi}^*|$) à $f_{eBi} = f_e$ à celles des modules de l'enrobé de référence ($|E_{B0}^*|$) à $f_{eB0} = f_e$. Il traduit l'effet du taux de mobilisation du bitume du bardeau des enrobés avec bardeaux. La phase φ_{CCM} est la différence d'angle de phase entre ces deux modules.

En considérant l'équation 5.7, l'équation 5.8 peut s'écrire :

$$CCM^* = \frac{E_{Bi}^*}{E_{REF}^*} = \frac{|E_{Bi}^*| e^{i\varphi_{Bi}}}{|E_{REF}^*| e^{i\varphi_{REF}}} \quad (5.8)$$

La norme du coefficient complexe de mobilisation $|CCM^*|$ peut être déterminée comme étant :

$$|CCM^*| = \frac{|E_{Bi}^*|}{|E_{REF}^*|} \quad (5.9)$$

On peut alors déterminer le coefficient complexe de mobilisation, soit :

$$\begin{aligned} CCM^* &= |CCM^*| e^{i\varphi_{Bi}} e^{-i\varphi_{REF}} \\ CCM^* &= |CCM^*| e^{i(\varphi_{Bi} - \varphi_{REF})} \end{aligned} \quad (5.10)$$

L'angle de phase du coefficient complexe de mobilisation correspond alors à :

$$\varphi_{CCM^*} = (\varphi_{Bi} - \varphi_{REF}) \quad (5.11)$$

Les équations 5.9 et 5.11 permettent de décrire ainsi l'évolution des écarts entre les modules complexes obtenus pour les enrobés bardeaux par rapport aux modules complexes des enrobés de référence. À partir de ces équations il est possible de mettre en plan les résultats des différents enrobés de surface (ESG-10) et de base (GB-20) avec bardeaux.

Enrobé de surface : ESG-10 - La Figure 5.18 présente l'évolution de la norme des coefficients complexes de mobilisation ($|CCM^*|$) en fonction de la fréquence équivalente, f_e ($f_e = a_T \cdot f_r$) pour les enrobés de surface. Pour l'enrobé de surface de référence (ESG10-B0),

les normes du coefficient complexe de mobilisation sont unitaires pour l'ensemble des fréquences équivalentes.

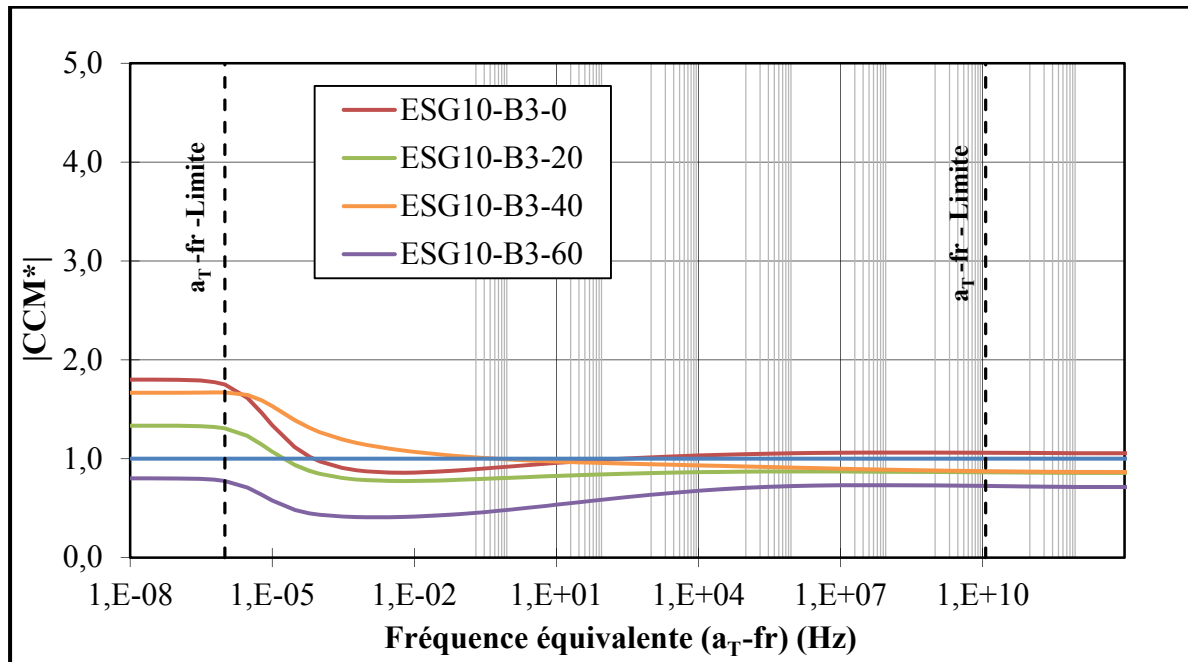


Figure 5.18 Évolution du coefficient d'écart des modules complexes dans le domaine de fréquence équivalente pour les enrobés de surface (ESG-10)

Globalement, la Figure 5.18 montre que très peu d'écart existe entre les normes des modules complexes des enrobés testés. Les résultats indiquent que les enrobés avec bardeaux et dont le taux de mobilisation a été fixé à 0, 20 et 40 % sont plus raides que l'enrobé de référence aux basses fréquences ($f_e < 0,001$ Hz), hautes températures, et que l'écart s'atténue pour les hautes fréquences, basses températures. Pour l'enrobé avec bardeaux confectionné en considérant un taux de mobilisation de 60 % on constate que la raideur de l'enrobé est toujours inférieure à celle de l'enrobé de référence.

Par ailleurs, la figure suivante (*Voir* Figure 5.19) montre l'évolution de l'angle de phase des coefficients complexes de mobilisation dans le domaine de fréquence équivalente pour les différents enrobés de surface avec bardeaux testés. À noter que l'angle de phase du coefficient complexe de mobilisation pour l'enrobé de référence (ESG10-B0) est évidemment constante sur toute la plage de fréquence et égale à zéro.

Pour permettre une bonne interprétation de la Figure 5.19 il est bon de préciser qu'une valeur négative de l'angle de phase de CCM* indique que l'enrobé avec bardeaux présente alors une composante visqueuse moins importante. Par ailleurs, dans le cas où l'angle de phase est positif, c'est dire que l'enrobé avec bardeaux présente une composante visqueuse plus importante.

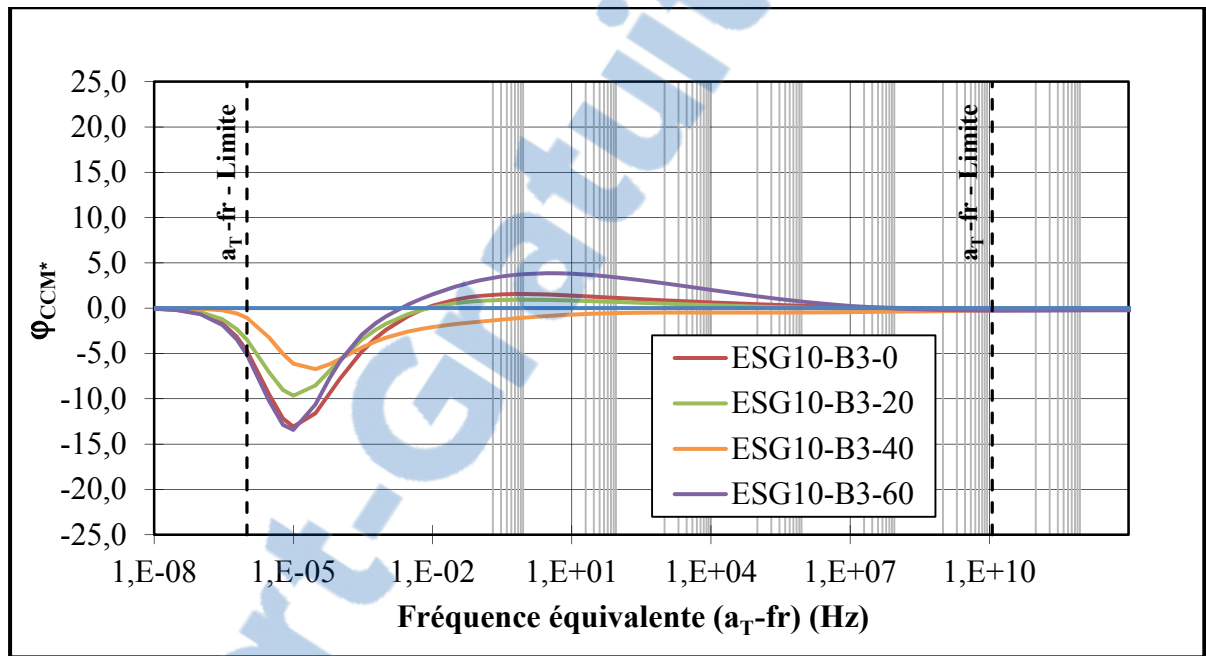


Figure 5.19 Évolution l'angle de phase du coefficient d'écart des modules complexes dans le domaine de fréquence équivalente pour les enrobés de surface (ESG-10)

Les résultats présentés à la Figure 5.19 indiquent que pour les basses fréquences ($f_e < 0,01$ Hz), hautes températures, les enrobés avec bardeaux vont présenter une composante visqueuse moins importante ($\phi_{CCM} < 0$) et afficher un potentiel de réversibilité sous sollicitation cyclique plus significatif que l'enrobé de référence. Ces enrobés offrent ainsi une meilleure résistance à l'orniérage. Par ailleurs, pour les hautes fréquences (basses températures), bien que les enrobés avec bardeaux présentent des composantes visqueuses plus grandes que celles de l'enrobé de référence ($\phi_{CCM} > 0$), les écarts demeurent relativement faibles.

En définitive, une mobilisation du bitume des bardeaux pourrait être envisagée de l'ordre de 40 %, et ce, en obtenant des résultats similaires à l'enrobé de surface de référence.

Enrobé de base : GB-20 - La Figure 5.20 présente l'évolution de la norme des coefficients complexes de mobilisation ($|CCM^*|$) en fonction de la fréquence équivalente, f_e ($f_e = a_T \cdot f_r$) pour les enrobés de base. Pour l'enrobé de base de référence (GB20-B0) les normes du coefficient complexe de mobilisation est unitaire pour l'ensemble des fréquences équivalentes.

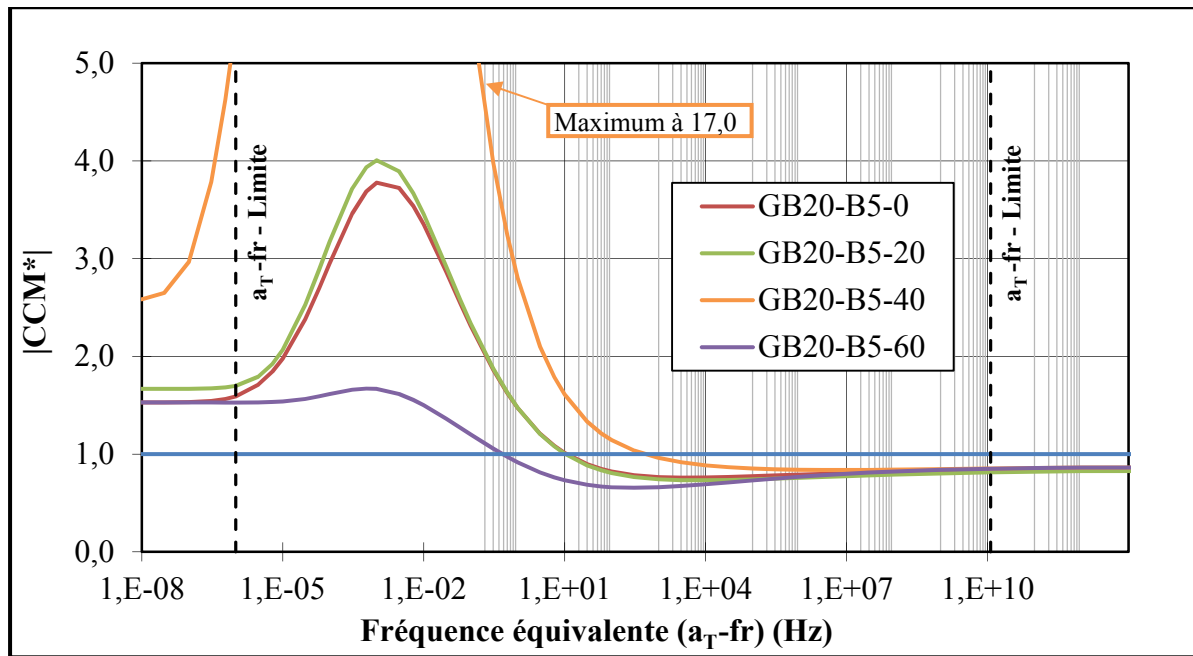


Figure 5.20 Évolution du coefficient d'écart des modules complexes dans le domaine de fréquence équivalente pour les enrobés de base (GB-20)

Les résultats présentés à la Figure 5.20 montrent des écarts nettement plus marqués que pour les enrobés de surface entre les normes des coefficients complexes de mobilisation. Globalement, tous les enrobés avec bardeaux sont plus raides que l'enrobé de référence aux basses fréquences ($f_e < 10$ Hz) alors qu'ils sont sensiblement plus mous pour les hautes fréquences. Les enrobés confectionnés en considérant une mobilisation du bitume des bardeaux de 0, 20 et 40 % présentent une augmentation des valeurs de normes du coefficient complexe de mobilisation progressivement selon le taux de mobilisation considéré.

Notamment, les écarts sont très significatifs pour l'enrobé confectionné en considérant une mobilisation de 40 % pour lequel les écarts maximaux des normes du coefficient complexe de mobilisation atteignent des facteurs supérieurs à 17. Curieusement, les normes du coefficient complexe de mobilisation pour l'enrobé confectionné en considérant une mobilisation de 60 % sont particulièrement différentes de celles calculées pour les autres enrobés avec bardeaux. Pour ce dernier, les résultats obtenus sont semblables à ceux obtenus pour les enrobés de surface. C'est donc dire que seul l'enrobé considérant une mobilisation de 60 % a offert des résultats qui s'apparentent à ceux de l'enrobé de référence. Il est donc très difficile de tirer une conclusion de cette figure et ainsi des résultats selon la représentation de l'écart des modules complexes dans un domaine fréquentiel équivalente pour les enrobés de base de type GB-20.

La Figure 5.21, quant à elle, présente l'évolution de l'angle de phase du coefficient complexe de mobilisation dans le domaine de fréquence équivalente pour les différents enrobés de base incorporant des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation. Les résultats sont de nature différente de ceux observés pour les enrobés de surface. Notamment, pour les basses fréquences ($f_e < 1E-5$ Hz), hautes températures, l'incorporation de particules de bardeaux donne lieu à une augmentation de la composante visqueuse pour les enrobés avec bardeaux. Cependant pour des fréquences intermédiaires ($\sim 1E-3$ Hz $< f_e < \sim 1E+2$ Hz) les enrobés bardeaux présentent une composante réversible plus marquée que l'enrobé de référence. Finalement, pour les hautes fréquences ($f_e > \sim 1E+2$ Hz), basses températures, les enrobés avec bardeaux présentent des composantes visqueuses légèrement plus grandes que celles de l'enrobé de référence ($\varphi_{CCM} > 0$).

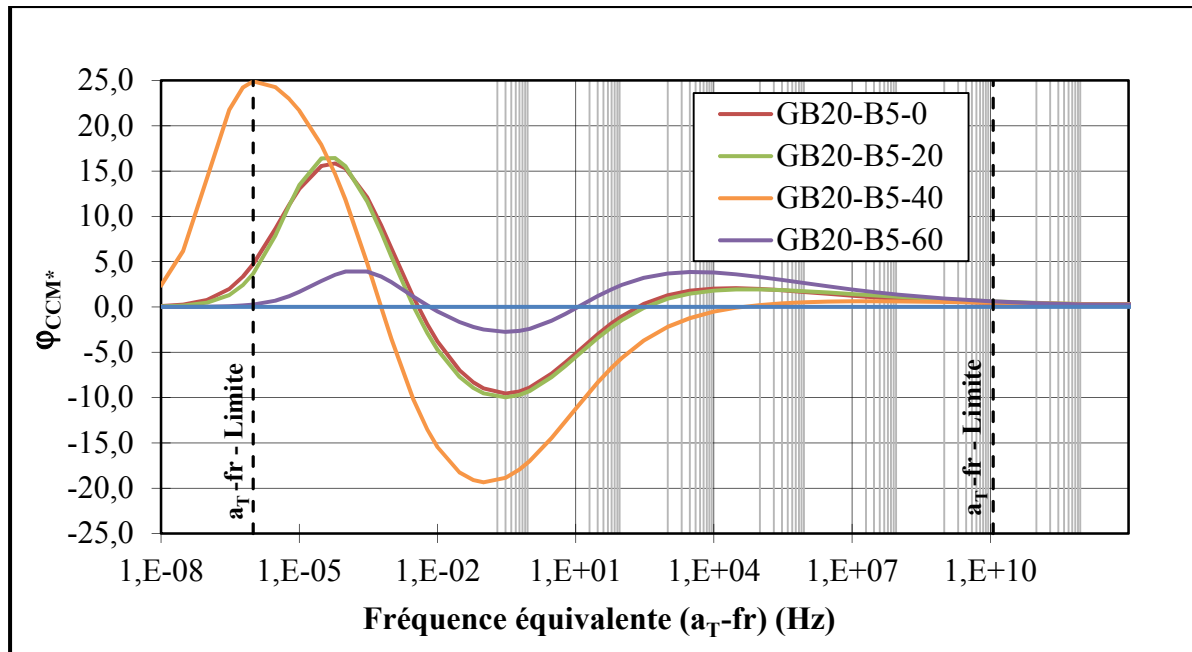


Figure 5.21 Évolution l'angle de phase du coefficient d'écart des modules complexes dans le domaine de fréquence équivalente pour les enrobés de base (GB-20)

En définitive, il est difficile de tirer une conclusion nette des résultats des essais de modules complexes sur les enrobés de base, étant donné que des écarts et des variations non négligeables sont notés. Les écarts pourraient être liés à une certaine hétérogénéité entre les éprouvettes testées. Une plus grande teneur en vides et en bardeaux dans certaines éprouvettes peuvent induire des écarts quant aux modules complexes mesurés. La raison de ces écarts est peut-être associée au fait que l'enrobé à l'étude, l'enrobé GB-20, est constitué d'un squelette granulaire plus grossier comparativement à l'enrobé de surface (ESG-10), un enrobé fin.

Afin d'éclaircir ce phénomène, il serait important d'effectuer de nouveaux essais sur l'enrobé de base (GB-20) dans le but d'obtenir des répétitions des mesures qui permettront de cerner la variabilité à l'intérieur de l'essai et ainsi d'obtenir une conclusion précise quant à l'analyse des résultats de cet essai.

5.3 Essais de durabilité

5.3.1 Tenue à l'eau

En 1997, une spécification technique a été ajoutée par le MTQ pour les enrobés utilisés sur son territoire, une caractéristique de performance : la tenue à l'eau. Lors de l'essai réalisé en laboratoire, d'après la méthode d'essai LC 26-001 (*Voir Annexe XIII*), l'enrobé doit présenter une performance supérieure à 70 %. C'est donc l'exigence qui a été fixée pour les enrobés confectionnés dans le cadre de ce travail. Les résultats obtenus, pour les deux types d'enrobé bitumineux sont présentés à la Figure 5.22.

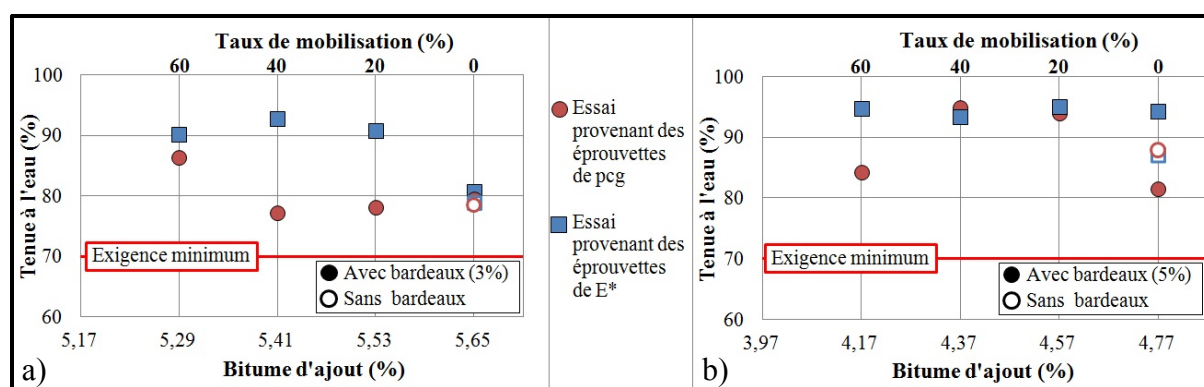


Figure 5.22 Résultats obtenus pour la tenue à l'eau avec la différence entre les éprouvettes provenant des **briques de la pég** et des **éprouvettes testées au E*** pour :
a) les enrobés de surface de type ESG-10 et b) les enrobés de base de type GB-20

5.3.1.1 Enrobé de surface : ESG-10

L'essai de la tenue à l'eau a été effectué sur d'anciennes briquettes testées lors d'essais réalisés ultérieurement. Comme il a été démontré précédemment, les résultats provenant des briquettes pég ont offert des performances inférieures aux résultats provenant des briquettes de module complexe. Par contre, dans le cadre de l'analyse, la moyenne des deux essais a été considérée. À l'aide de ces résultats, il est possible de vérifier l'évolution du résultat obtenu à la tenue à l'eau par rapport au pourcentage de bitume d'ajout dans l'enrobé bitumineux (*Voir Figure 5.23*).

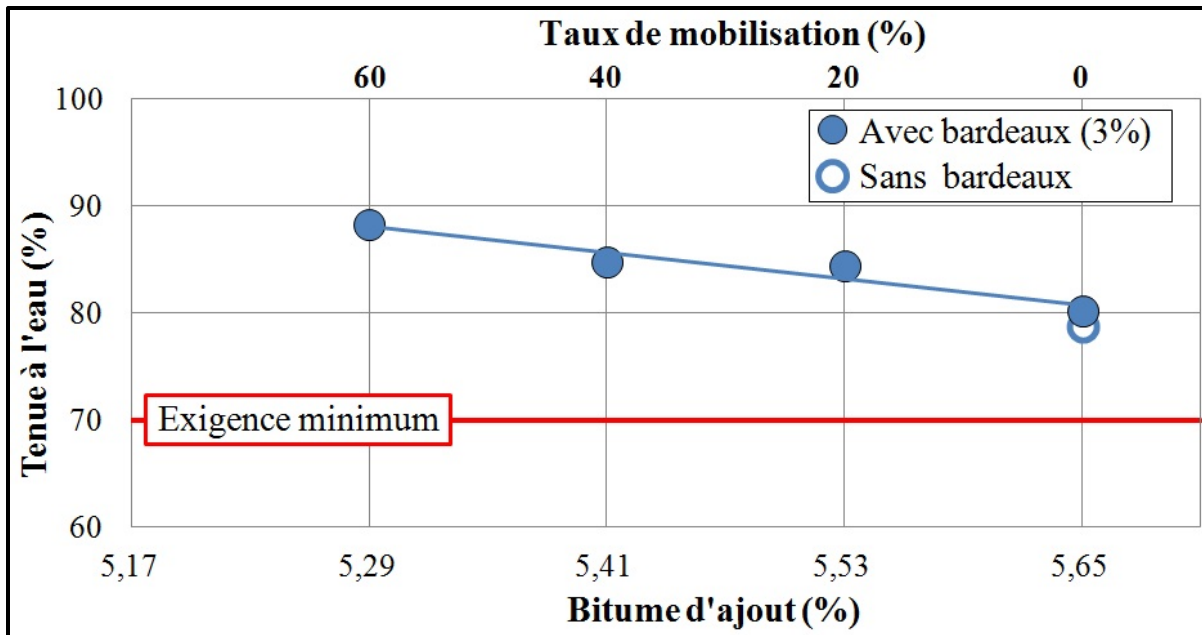


Figure 5.23 Tenue à l'eau obtenue pour les différents enrobés de surface (ESG-10)

D'après ce graphique, la performance à la tenue à l'eau semble s'améliorer lorsque la teneur en bitume d'ajout est diminuée, donc lorsque le taux de mobilisation du bitume des bardeaux est augmenté. Sur les bases de ces informations, il est possible de déterminer que dans le cas de la performance à la tenue à l'eau, concernant les enrobés de surface de type ESG-10, une mobilisation allant jusqu'à 60 % du bitume des bardeaux pourrait être considérée tout en offrant des résultats performants et conformes aux exigences du ministère des Transports du Québec.

5.3.1.2 Enrobé de base : GB-20

Dans le cas des enrobés de base, de type GB-20, l'essai a également été effectué sur des briquettes provenant des essais de pcg et de module complexe. Tel que démontré au chapitre de la présentation des résultats, aucune tendance entre les essais et leur provenance n'a été décelée pour ce type d'enrobé. Dans le cas de l'analyse, c'est encore une fois la moyenne des deux essais qui a été privilégiée. L'évolution moyenne de la tenue à l'eau des différents enrobés de base est présentée à la Figure 5.24.

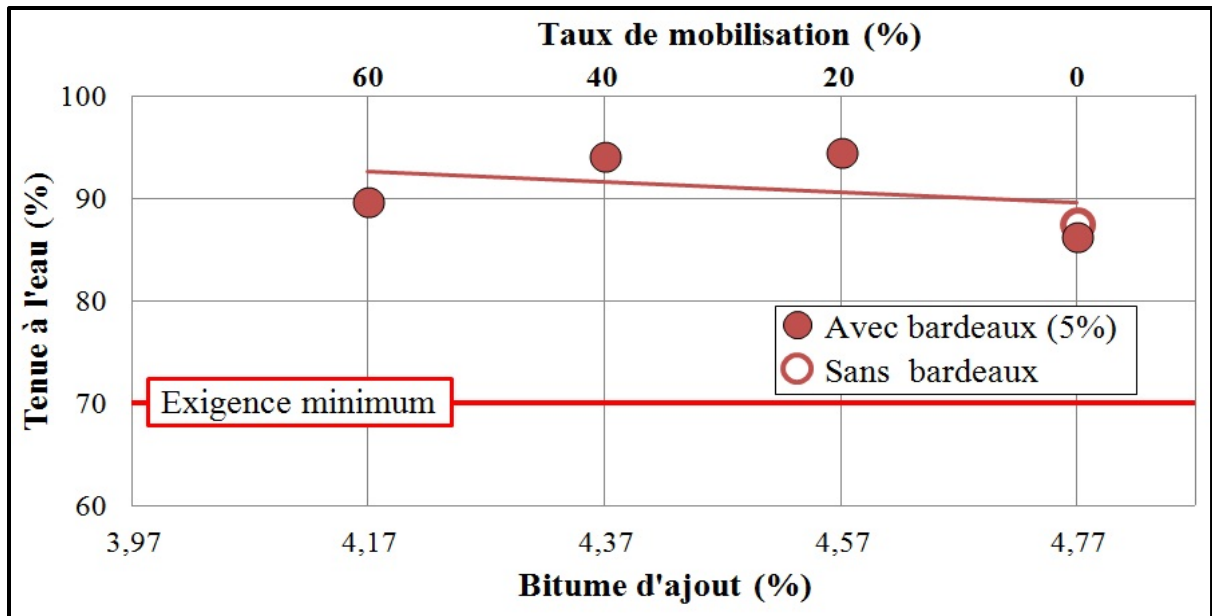


Figure 5.24 Tenue à l'eau obtenue pour les différents enrobés de base (GB-20)

Contrairement aux enrobés de surface, les essais réalisés sur les enrobés de type GB-20 ne montre pas une évolution constante de la tenue à l'eau lorsque le taux de mobilisation est augmenté. Cependant, les enrobés avec bardeaux d'asphalte ont pratiquement tous obtenus un meilleur résultat que l'enrobé de référence à l'exception de l'enrobé GB20-B5-0 qui a obtenu un résultat légèrement plus faible. Cependant, par rapport à la limite minimale imposée par le MTQ, fixée à 70 % pour les enrobés de type GB-20, tous les enrobés étudiés ont offert des résultats supérieurs à cette limite. Il est donc possible de conclure, tout comme dans le cas de l'enrobé ESG-10, que concernant la performance de la tenue à l'eau, une mobilisation jusqu'à 60 % du bitume provenant des particules de bardeaux peut être envisagée.

CONCLUSION

Le projet de recherche, ayant pour but de trouver une solution pour donner une deuxième vie à la grande quantité de bardeaux usés envoyés dans des sites d'enfouissement de matériaux secs, a été mené au Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux de l'École de technologie supérieure. L'étude a porté sur l'introduction de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans deux types d'enrobé bitumineux couramment utilisés par le ministère des Transports du Québec. Les enrobés à l'étude étaient un enrobé de surface de type ESG-10 et un enrobé de base de type GB-20. Différents essais ont été réalisés en laboratoire afin de déterminer une formulation optimale, pour ces deux types d'enrobé, qui offrirait des performances similaires ou supérieures à des enrobés sans matériaux recyclés utilisés présentement par le MTQ. Pour chacun des types d'enrobé bitumineux, quatre différentes compositions ont été formulées faisant varier la mobilisation du bitume des bardeaux de 0 à 60 %. De plus, des enrobés de référence de type ESG-10 et GB-20, approuvés et utilisés par le MTQ, ont été confectionnés afin de fixer les objectifs à atteindre pour chacun des essais. Une valeur de mobilisation maximale a été déterminée pour les essais suivants :

- aptitude au compactage à l'aide de la presse à cisaillement giratoire;
- résistance à l'orniérage;
- résistance au retrait thermique empêché (TSRST);
- détermination du module complexe (E^*);
- performance à la tenue à l'eau.

Les résultats de la mobilisation maximale permise lors de l'analyse des résultats des essais mentionnés ci-haut, sont présentés au tableau suivant (*Voir* Tableau C.1), tant pour les enrobés de surface, que pour les enrobés de base.

Tableau C.1 Mobilisation maximale à considérer pour les enrobés de surface (ESG-10) et les enrobés de base (GB-20) dépendamment des résultats des différents essais

ESSAIS	TYPE D'ENROBÉ	
	ESG-10	GB-20
Presse à cisaillement giratoire	60 %	40 %
Résistance à l'orniérage	60 %	60 %
Retrait thermique empêché	20 %	0 %
Module complexe	40 %	Aucune
Tenue à l'eau	60 %	60 %

À la lueur de ces résultats, il est possible de remarquer que la mobilisation maximale admise du bitume des bardeaux varie d'un essai à l'autre. Afin de s'assurer que l'enrobé confectionné, suivant notre formulation optimale, offre des performances similaires à l'enrobé de référence, il sera nécessaire de choisir le taux de mobilisation le plus critique.

Dans le cas des enrobés de surface, de type ESG-10, une mobilisation du bitume des bardeaux de 20 % pourrait être considérée afin d'offrir des résultats qui répondent aux exigences fixées lors du programme de recherche. C'est donc dire que lors de la confection d'un enrobé bitumineux de type ESG-10 incorporant 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, supposant que ces particules sont composées à 20 % de bitume, la teneur en bitume d'ajout dans l'enrobé bitumineux pourrait être réduite de 0,12 %. Étant donné que le résultat critique de l'analyse des résultats concerne le retrait thermique empêché, c'est-à-dire la résistance de l'enrobé à basse température, il serait intéressant de vérifier si la classe de bitume choisie lors de la fabrication était améliorée, aidant ainsi à offrir de meilleurs résultats à basse température, est-ce que le taux de mobilisation admis pourrait être augmenté à 40 %? Par exemple, est-ce que dans un enrobé de type ESG-10 avec 3 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation et un bitume d'ajout de grade PG 64-34, il serait possible de considérer une mobilisation du bitume des bardeaux de 40 % (offrant une diminution du bitume d'apport de 0,24 %) tout en offrant des résultats similaires

à un enrobé de référence (sans bardeaux) avec un bitume de grade PG 64-28. Il serait donc intéressant, dans une prochaine étude, de répondre à cette interrogation.

Dans le cas des enrobés de base, de type GB-20, pour l'instant, aucune conclusion quant à une formulation optimale ne peut être déduite. Effectivement, en raison des essais de module complexe qui devraient être refaits afin d'obtenir des résultats répondant aux exigences de qualité des concepteurs, la formulation optimale suggérée ne peut être déterminée. Cependant, si l'on faisait abstraction de cet essai (module complexe), la formulation optimale suggérée suite à cette étude serait qu'il est possible d'incorporer, aux enrobés de type GB-20, 5 % de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation, mais qu'aucune réduction de la teneur en bitume d'ajout serait possible. Effectivement, étant donné que les résultats au TSRST ont démontré que pour offrir des résultats similaires à l'enrobé de référence, un taux de mobilisation de 0 % du bitume des bardeaux devait être préconisé, entraînant donc aucune réduction de la teneur en bitume d'ajout. Par contre, les enrobés bitumineux de type GB-20 sont utilisés en couche de base, donc ils sont moins exposés au froid. Un taux de mobilisation du bitume des bardeaux pourrait donc être potentiellement applicable. Afin de répondre à cette interrogation, il serait pertinent de corréler cette étude en laboratoire avec la réalisation d'une planche d'essai en chantier, tant pour l'enrobé de surface que pour l'enrobé de base, afin de vérifier le comportement de ces matériaux sous sollicitation réelle. Cependant, avant toute chose, dans le cas des enrobés bitumineux de type GB-20, il est important de se rappeler que la première étape, avant la réalisation de la planche de référence, consisterait à tester à nouveau les enrobés de base à l'essai de module complexe afin de compléter l'analyse de cette étude et ainsi d'être en mesure de déterminer la formulation optimale pour ce type d'enrobé.

ANNEXE I

FORMULATION DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE DE TYPE ESG-10

ANNEXE II

FORMULATION DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE DE TYPE GB-20

ANNEXE III

FORMULATION DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE DE TYPE ESG-10 AVEC PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTFABRICATION

ANNEXE IV

FORMULATION DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE DE TYPE ESG-10 AVEC PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION

ANNEXE V

**ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME DE GRADE PG 64-34 UTILISÉ
POUR LA CONFECTION DES DIFFÉRENTS ENROBÉS BITUMINEUX**

ANNEXE VI

COMPOSITION MASSIQUE POUR LES ENROBÉS DE SURFACE DE TYPE ESG-10 AVEC PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION

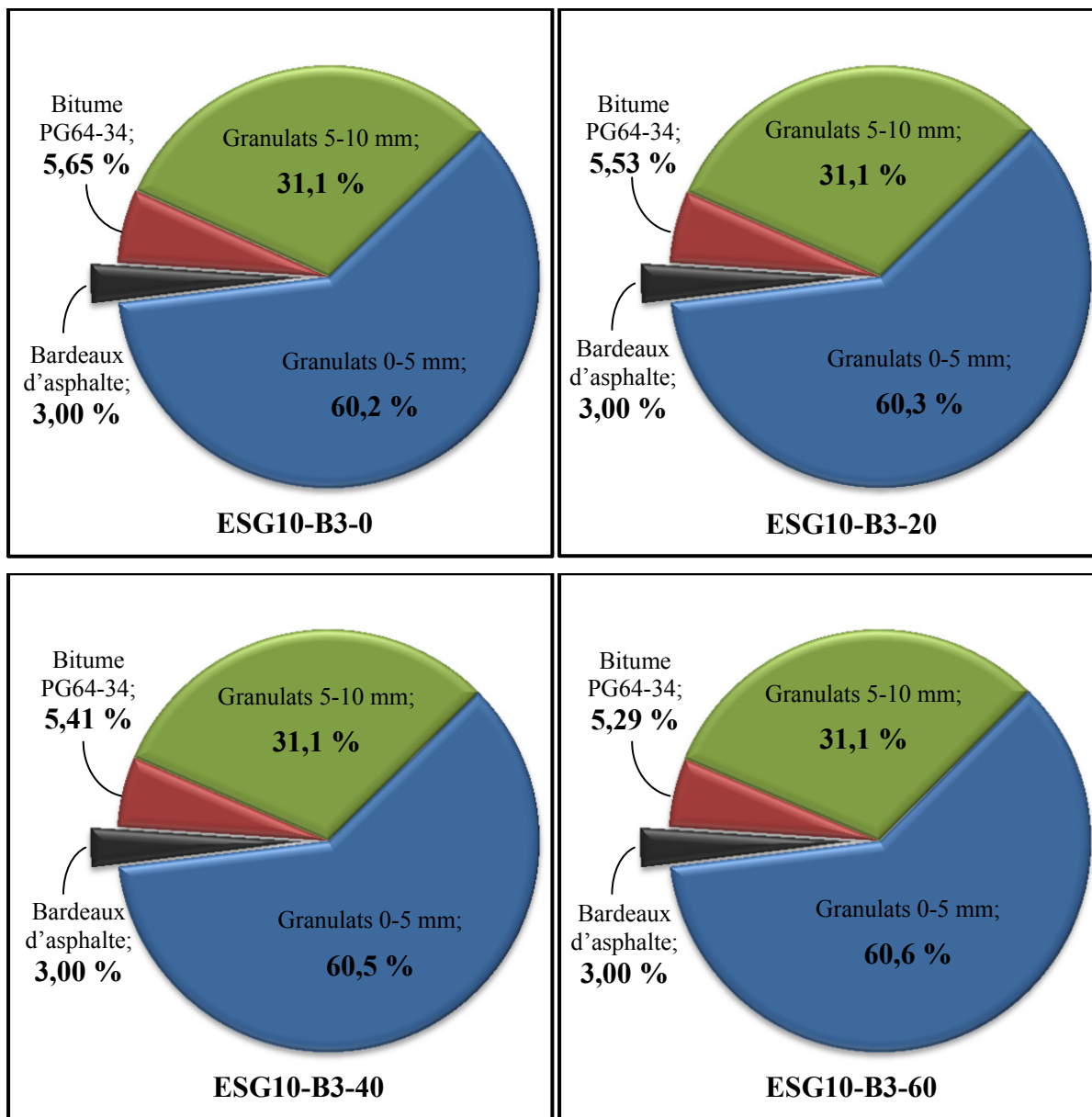


Figure-A VI-1 Composition massique pour les enrobés de surface de type
ESG-10 avec des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation



ANNEXE VII

COMPOSITION MASSIQUE POUR LES ENROBÉS DE BASE DE TYPE GB-20 AVEC PARTICULES DE BARDEAUX D'ASPHALTE DE POSTCONSOMMATION

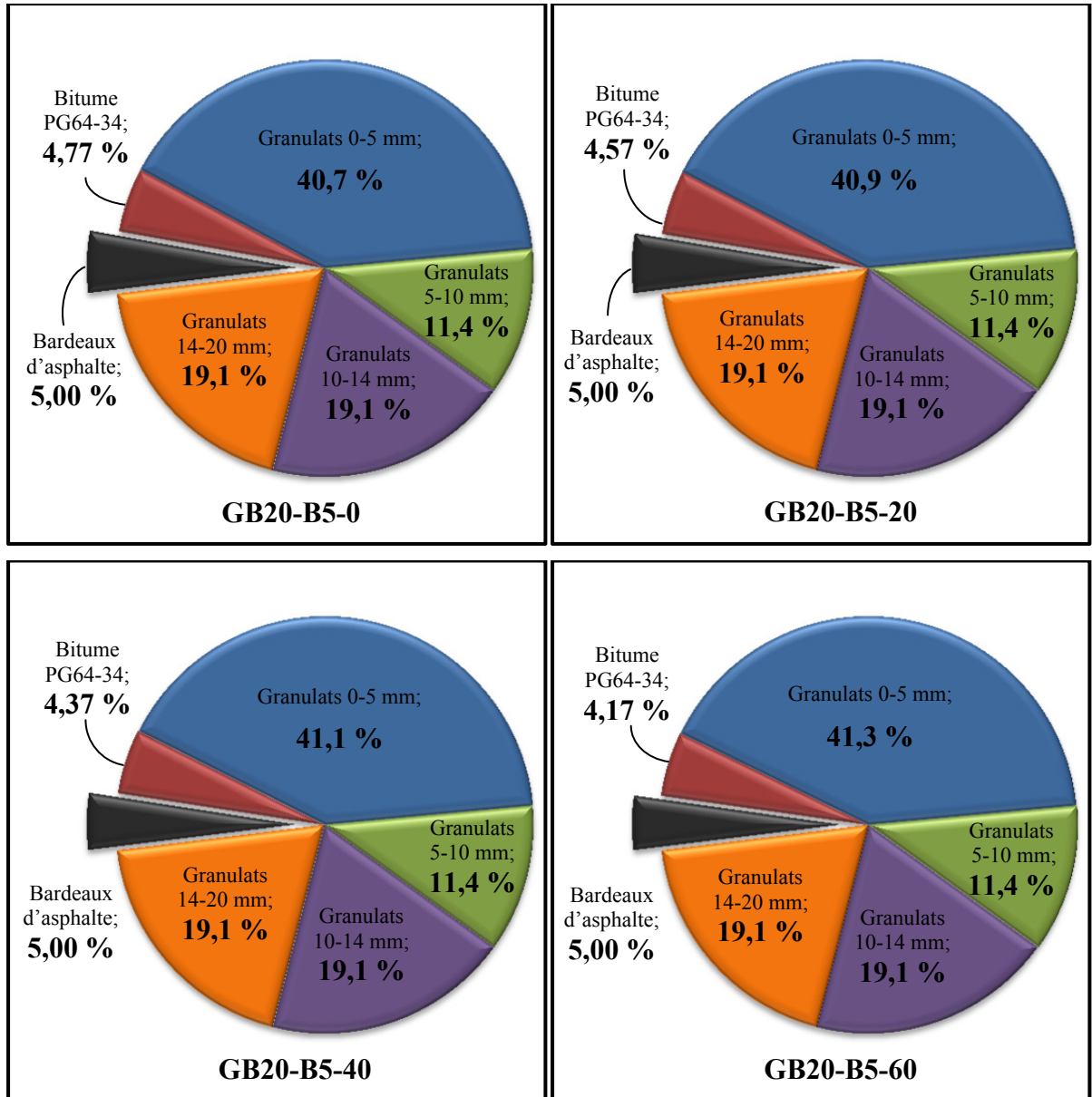


Figure-A VII-1 Composition massique pour les enrobés de base de type GB-20 avec des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation

ANNEXE VIII

NORME ASTM D225-86

ANNEXE IX

NORME ASTM D3462-87

ANNEXE X

NORME AASHTO TP10-93

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE XI

NORME 4101 – BITUMES

ANNEXE XII

NORME 4202 – ENROBÉS À CHAUD FORMULÉS SELON LA MÉTHODE DE FORMULATION DU LABORATOIRE DES CHAUSSÉES

ANNEXE XIII

MÉTHODE D'ESSAI LC 26-001 – TENUE À L'EAU (PAR TREMPAGE)

ANNEXE XIV

MÉTHODE D'ESSAI LC 26-003 – DÉTERMINATION DE L'APTITUDE AU COMPACTAGE DES ENROBÉS À CHAUD À LA PRESSE À CISAILLEMENT GIRATOIRE

ANNEXE XV

**MÉTHODE D'ESSAI LC 26-020 – PRÉPARATION D'ÉPROUVETTES POUR LA
MÉTHODE MARSHALL**

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE XVI

MÉTHODE D'ESSAI LC 26-040 – DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ BRUTE ET DE LA MASSE VOLUMIQUE DES ENROBÉS À CHAUD COMPACTÉS

ANNEXE XVII

MÉTHODE D'ESSAI LC 26-045 – DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ MAXIMALE

ANNEXE XVIII

MÉTHODE D'ESSAI LC 26-060 – MÉTHODE MARSHALL DE DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE À LA DÉFORMATION D'ÉPROUVETTES

ANNEXE XIX

MÉTHODE D'ESSAI LC 26-400 – FABRICATION D'ÉPROUVETTES AU COMPACTEUR LCPC

ANNEXE XX

**MÉTHODE D'ESSAI LC 26-410 – RÉSISTANCE À LA DÉFORMATION DES
ENROBÉS À L'ESSAI D'ORNIÉRAGE**

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE XXI

PROCÉDURE POUR CALIBRER LE MODÈLE 2S2P1D LORS DE L'ANALYSE D'UN ESSAI DE MODULE COMPLEXE (TIRÉE DE MEUNIER, 2012)

1. Déterminer E_{∞}

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

2. Déterminer E_0

Ce paramètre est obtenu à basse fréquence et représente la valeur limite du module lorsque ω tend vers zéro. Pour les enrobés bitumineux, $E_0 > 0$ et son comportement devient purement élastique. Par contre, pour les bitumes, ce paramètre est nul. L'amortisseur linéaire η joue alors le rôle prépondérant à haute température et lorsque la fréquence tend vers zéro. Le comportement s'oriente donc vers un matériau visqueux pur ou newtonien.

3. Déterminer les constantes h , k et δ

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

4. Déterminer le paramètre β

Ce paramètre a été introduit dans le modèle pour caractériser le comportement visqueux pur des bitumes à haute température. Si $E_0 = 0$, ce qui est vrai pour les bitumes, la pente du module représenté sur la courbe maîtresse tend vers la valeur 1 si

la fréquence tend vers 0. Plus la valeur de β est élevée, plus la viscosité η du module est élevée, et par conséquent, plus le module complexe est élevé.

5. Déterminer la constante de temps τ_E

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

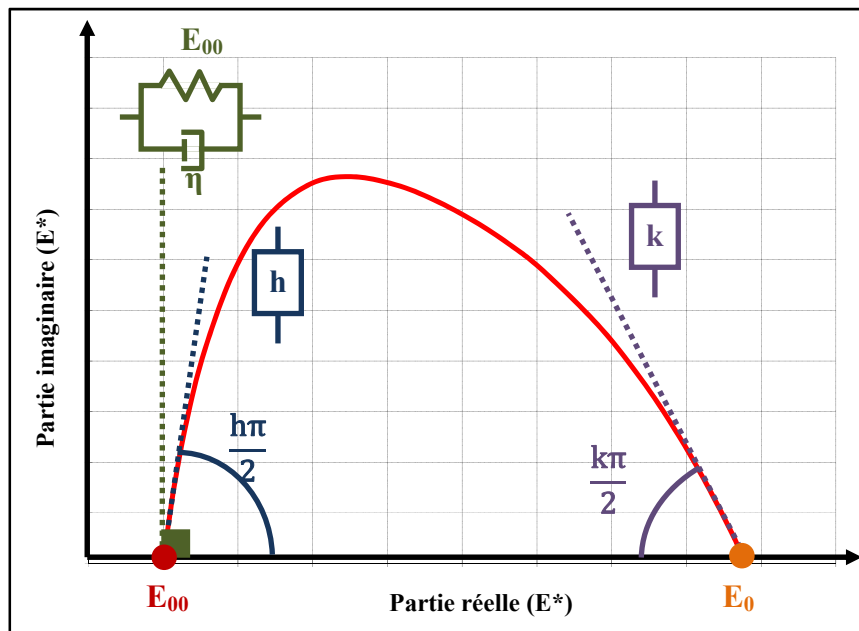


Figure-A XXI-1 Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur le module complexe représenté dans le plan Cole-Cole
Tirée de Meunier (2012, p. 94)

ANNEXE XXII

NOTE TECHNIQUE

**ENROBÉ AVEC GBR ET/OU DES BPF : DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ
BRUTE DES GRANULATS, MODE OPÉRATOIRE À UTILISER LORS DES
MALAXAGES EN LABORATOIRE ET CHEVAUCHEMENT DES CLASSES
GRANULAIRES**

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aïtcin, Pierre-Claude, Jolicoeur, Guy et Mercier, Michel. 1992. *Technologie des granulats*, 2^e édition. Sainte-Foy : Les éditions Le Griffons d'argile, 386 p.
- Ali, N. Chan, Joseph S.S. Potyondy, Alex J. Bushman et R. Bergan A. T. 1995. *Mechanistic evaluation of asphalt concrete mixtures containing reclaimed roofing materials*. «Technical University of Nova Scotia», n°1515, National Research Council, Washington, 74 p.
- Baaj, Hassan. Dorchies, Pierre. Perraton, Daniel et Tessier, Bernard. 2004. «Module Complexe et Comportement à Basse Température des Enrobés Bitumineux Modifiés aux Bardeaux d'Asphalte». In *49th Canadian Technical Asphalt Association Annual Conference*. (Montréal, 21 au 24 novembre 2004), p. 215-240.
- Bilodeau, Kevin. 2008. «Prédiction de la déformation permanente selon la méthodologie ESSO : Détermination des paramètres pour des enrobés bitumineux québécois». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 152 p.
- Bitume Québec. 2011. «Informations sur l'utilisation des prix publics des bitumes». En ligne. 13 p.
<http://www.bitumequebec.ca/assets/application/files/70fb6420a7436d0_file.pdf>.
Consulté le 4 avril 2012.
- Boutin, Louise. 2010. «Historique et mise à jour sur les enrobés du MTQ». En ligne. 34 p.
<http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/e25852457c02936_file.pdf>. Consulté le 8 avril 2011.
- Carter, Alan. Barco, Cesar. Ortega, Fernando. Barberi, Anthony et Herman, Antoine. 2008. *Étude sur la fissuration thermique des enrobés bitumineux par l'essai de retrait thermique empêché*. «Laboratoire Universitaire sur les Chaussées, Routes et Enrobés Bitumineux», LUCREB08-10-01. Montréal (Qc.) : École de technologie supérieure, 38 p.
- Climat Québec. 2012. « Bilan climatologiques fermés ». In *Ouranos*. En ligne.
<http://www.climatquebec.qc.ca/home.php?id=monthly_seasonal_summary&mpn=climate_mon&slt_year=10&slt_periode=0&slt_month=7&sub=Afficher>. Consulté le 4 avril 2012.
- DeLaporte, Brice. 2007, «Étude de la rhéologie des mastics bitumineux à l'aide d'un rhéomètre à cisaillement annulaire», Thèse de doctorat, France, École Nationale des Travaux Publics de l'État, 250 p.

- Di Benedetto, Hervé et de la Roche, C. 1998. «State of the art and inter-laboratory tests on mechanical behaviour and mix design». *State of the art on stiffness modulus and fatigue bituminous mixtures*. E&FN Spon. p. 137-180.
- Di Benedetto, Hervé et Corté, Jean-François. 2004. *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Paris : Lavoisier, 283 p.
- Direction du laboratoire des chaussées. 2000. «Enrobé semi-grenu ESG-10». En ligne. 2 p. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/reseau_routier/zone_fournisseurs/materiaux_infrastructure/esg10.pdf>. Consulté le 14 février 2011.
- Doucet, Félix et Auger, Bruno. 2010. *Détermination du module complexe des enrobés au ministère des Transports du Québec*. Direction du laboratoire des chaussées. Québec (Qc.) Transports Québec, 152 p.
- Germain, Benoît et Charland Monique. 2000. *Étude de faisabilité sur la récupération et le recyclage de bardeaux d'asphalte*. Direction environnement, CRIQ 640-PE25300(R1). Centre de Recherche Industrielle du Québec, 31 p.
- Grzybowski, Kenneth F. 2003. *Recycled asphalt roofing materials : A Multi-Functional, Low Cost Hot Mix Asphalt Pavement Additive*. Use of Waste Materials in Hot mix Asphalt. ASTM Special Technical Publication, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 20 p.
- Institut de la statistique du Québec. 2011. «Population, Québec et Canada, 1851-2011». In *Gouvernement du Québec*. En ligne. <http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/struc_poplt/102.htm>. Consulté le 4 avril 2012.
- Institut de la statistique du Québec. 2012. «Comparaison entre la superficie du Québec et celle d'autres pays, 2008». In *Gouvernement du Québec*. En ligne. <http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/referenc/quebec_stat/ter_ter/ter_ter_3.htm>. Consulté le 4 avril 2012.
- Lamothe, Sébastien. 2004. «Enrobé grenu : Influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-ornièreage». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 169 p.
- Lamothe, Sébastien. 2011. Communication personnelle à propos de la façon de procéder pour la prise de mesures des différentes éprouvettes d'enrobé bitumineux.
- Leclerc, Gaétan et Paradis, Michel. 2002. *Étude sur les enrobés EB-20 avec 5 % de bardeau d'asphalte déchiqueté de dimension 0-6,3 mm utilisés en 2001*. Direction du laboratoire des chaussées. Sainte-Foy (Qc.) Transports Québec, 32 p.

Lelièvre, André. 1994. *Les enrobés bitumineux*, 1^{ère} édition revue et mise à jour. Sainte-Foy : Les éditions Le Griffon d'argile, 410 p.

Le matériel lpc. «Orniéreur : Mesure de la sensibilité à l'orniérage». En ligne. 2 p.
< <http://media.lpc.fr/ext/pdf/prod/mlpc/orniereur.pdf>>. Consulté le 21 février 2011.

Les affaires.com. 2012. «Paver les routes avec des vieux bardeaux d'asphalte». In *Les Affaires*. En ligne. < <http://www.lesaffaires.com/archives/generale/paver-les-routes-avec-des-vieux-bardeaux-d-asphalte/503184>>. Consulté le 4 avril 2012.

Meunier, Mathieu. 2005. «Contribution à la mise au point des critères de formulation pour les enrobés SMA adaptés à la formulation du Laboratoire des Chaussées du Ministère des Transports du Québec». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 173 p.

Meunier, Mathieu. 2012. «Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux». Thèse de doctorat en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 286 p.

MTQ : Ministère des Transports du Québec. 2011. Communication personnelle avec Michel Paradis, ing. M. Sc., directeur du secteur Enrobés au MTQ, au sujet du réseau routier québécois.

MTQ : Ministère des Transports du Québec. 2005. Enrobés : *Formulation selon la méthode LC*. Gouvernement du Québec, 111 p.

Navarro, Julien. 2011. «Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques». Thèse de doctorat, Bordeaux (France), École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 308 p.

Noël, Frédéric. Perraton, Daniel et Carter, Alan. 2006. *Incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux*. École de technologie supérieure, 63 p.

Olard, François et Di Benedetto, Hervé. 2005. *The “DBN” Model : A Thermo-Visco-Elasto-Plastic Approach for Pavement Behavior Modeling*. «Journal of the Association of American Paving technologist (AAPT)» 32 p.

Paradis, Michel. 2008. «Les enrobés du MTQ : relation entre leurs caractéristiques, leur mise en œuvre et leur performance sur la route». En ligne. 32 p.
http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/8602d4c094ed0f2_file.pdf>. Consulté le 14 février 2011.

- Paradis, Michel. 2009. «Utilisation du bardeau d'asphalte post-fabrication dans les enrobés à matrice de pierre (Autoroute 20) et autres essais avec enrobés avec bardeau post-consommation». In *54th Canadian Technical Asphalt Association Annual Conference*. (Moncton), 19 p.
- Paradis, Michel. 2009. «Utilisation du bardeau dans les enrobés : cas de l'Autoroute 20 (BPF) et de la route 116 (BPC)». In *Formation Bitume Québec*. (Montréal, 24 au 26 novembre 2009), 27 p. Laboratoire des Chaussées, Service des matériaux d'infrastructures.
- Peltonen, P. V. 1991. Characterization and testing of Fibre-modified Bitumen Composites. *Journal of Materials Science*, Volume 26, Numéro 20, p. 5618-5622.
- Toits de rêve. 2008. «Comment choisir son modèle et sa couleur de bardeau?». In *Les toits de rêves*. En ligne. <www.toits-de-reve.com>. Consulté le 9 mai 2009.
- Robitaille, Vincent et Tremblay, Denis. 1997. *Mécanique des sols : théorie et pratique*, 1^{ère} édition. Mont-Royal : Modulo Éditeur, 652 p.
- Young, Jean-Francis. Mindess, Sindey. Gray, Robert J. et Bentur, Arnon. 1998. *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*. ISBN: 0-13-659749-1. Prentice-Hall Inc., 384 p.

Rapport-Gratuit.com