Caractérisation d'un enrobé bitumineux haute performance incorporant du verre recyclé et son impact sur les performances de cet enrobé

par

Comlan Théophile KAKPO

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

MONTRÉAL, LE 21 SEPTEMBRE 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Comlan Theophile Kakpo, 2017

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

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

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

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

LE 6 SEPTEMBRE 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Le succès de ce travail de maîtrise, je le dois à toutes ces personnes qui m'ont soutenu de près et de loin.

Je tiens à témoigner de ma profonde gratitude à l'endroit de mes directeurs de recherche Daniel Perraton (directeur) et Michel Vaillancourt (codirecteur). Pour la confiance à travers ce projet, l'appui et les aides financières. Aussi pour les conseils, les encouragements et la disponibilité en tout temps, je vous dis un grand merci.

Merci aux collègues du Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) pour leur soutien et conseils. Merci aux techniciens du LCMB, Francis Bilodeau et Sylvain Bibeau pour l'aide, leur disponibilité, les conseils et le support technique. Merci à Sébastien Lamothe professionnel de la recherche du LCMB pour son soutien, sa disponibilité et sa collaboration pour les essais de fatigue.

Je remercie sincèrement mes frères qui malgré la distance m'ont constamment conseillé, soutenus, aidés financièrement et motivés ainsi que ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible. À tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à la réussite de ce travail, je vous dis merci.

CARACTÉRISATION D'UN ENROBÉ BITUMINEUX HAUTE PERFORMANCE INCORPORANT DU VERRE RECYCLÉ ET SON IMPACT SUR LES PERFORMANCES DE CET ENROBÉ

Comlan Théophile KAKPO

RÉSUMÉ

Annuellement, il est généré environ 200 000 tonnes de verres au Québec. Selon l'ÉTS et ses partenaires du projet Verre (SAQ, ÉEQ, Mitacs, Recyc-Québec et la ville de Montréal), 77% de ces verres sont récupérés par la collecte sélective et constituent ainsi une grande réserve de matériaux recyclables. L'enrobé bitumineux haute performance (EBHP) formulé à l'ÉTS selon le principe d'une optimisation du contact gros sur gros (squelette granulaire) a été choisi afin d'évaluer la faisabilité d'incorporation de verre recyclé dans les enrobés bitumineux. Le mélange bitumineux EBHP – Verre a été produit en usine et mise en œuvre dans une planche d'essai. Deux camions sur les trois produits ont été échantillonnés lors de la réalisation de cette planche d'essai. Les objectifs qui découlent de cette étude de faisabilité sont de vérifier l'homogénéité de cette production, de déterminer les performances in situ de cet enrobé, de vérifier si les performances in situ sont celles escomptées suivant la formule cible et finalement d'évaluer l'impact du verre recyclé sur les performances de l'EBHP 14. Des essais de caractérisation et vérification de conformité ont été réalisés sur les échantillons. L'homogénéité de la production a été déterminée sur la base des essais de teneur en bitume (%b), de densité maximale (d_{mm}), de l'aptitude au compactage à la PCG et de la granulométrie des échantillons. Les essais thermomécaniques ont permis de déterminer les performances mécaniques des deux lots d'échantillon. Les performances in situ de l'EBHP – Verre ont été vérifiées à l'aide de carottes prélevées sur chantier et des résultats d'essais au FWD. Ces résultats du mélange in situ ont été comparés aux résultats des échantillons prélevés à la réalisation de la chaussée. Finalement, l'influence du verre recyclé sur les performances de l'EBHP14 a été déterminée après avoir produit en laboratoire l'enrobé de référence.

Mots clés : Enrobé bitumineux, haute performance, verre recyclé, homogénéité, performances mécaniques

CARACTÉRISATION D'UN ENROBÉ BITUMINEUX HAUTE PERFORMANCE INCORPORANT DU VERRE RECYCLÉ ET SON IMPACT SUR LES PERFORMANCE DE CET ENROBÉ

Comlan Théophile KAKPO

ABSTRACT

Annually, approximately 200 000 tons of glasses are generated in Quebec. According to ÉTS and its project partners (SAQ, ÉEQ, Mitacs, Recyc-Québec and the City of Montréal), 77% of these glasses are recovered by selective collection and thus constitute a large reserve of recyclable materials. The High Performance Bituminous Asphalt (EBHP) designed at ÉTS on the principle of optimization of the granular packing was chosen in order to evaluate the feasibility of incorporating recycled glass into bituminous mixes. The bituminous mixture EBHP - Glass was produced in the plant and implemented in a test section. Two trucks on the three produced were sampled during the production of this test section. The objectives of this study are to verify the homogeneity of this production, to determine the in situ performance of this mix, to verify whether the in situ performances are those expected according to the target design and finally to evaluate the impact of recycled glass On the performance of the EBHP. Characterization and compliance tests were carried out on the samples. The homogeneity of production was determined on the basis of bitumen (% b), maximum density (d_{mm}), PCG compaction and mix gradation. The mechanical performances of the two sample batches were determined by thermomechanical tests. The in-situ performance of EBHP - Glass was verified using field cores and results from the FWD test. These results of the in situ mixing were compared with the results of the samples taken during the pavement construction. Finally, the influence of recycled glass on the performance of EBHP14 was determined after having produced a reference mix in the laboratory.

Keywords: Bituminous asphalt, high performance, recycled glass, homogeneity, mechanical performance

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE 3
1.1 Structure d'une chaussée bitumineuse et sollicitations induites dans la chaussée bitumineuse 3
1.1.1 Structure d'une chaussée bitumineuse 3
1.1.2 Sollicitations induites dans la chaussée 4
1.1.2.1 Effets de trafic 4
1.1.2.2 Effet de la température 5
1.2 Les enrobés bitumineux 6
1.2.1 Les principaux constituants d'un enrobé 7
1.2.1.1 Les granulats 7
1.2.1.2 Combinaison granulaire 8
1.2.1.3 Porosité et indice des vides 9
1.2.1.4 Évolution de l'indice des vides pour un mélange binaire 10
1.2.1.5 Influence des fillers sur les performances du mélange 12
1.2.1.6 Le liant bitumineux 13
1.2.2 Les types d'enrobé bitumineux 14
1.2.3 Formulation des enrobés bitumineux 15
1.2.4 Méthode du laboratoire des chaussées (LC) 16
1.2.5 Comportements des enrobés 16
1.2.6 Les enrobés SMA 17
1.2.6.1 Historique des SMA 18
1.2.6.2 Principes des enrobés SMA 19
1.2.7 SMA – Cpack 19
1.2.8 La grave – bitume 22
1.2.9 Les Enrobés Bitumineux Hautes Performances (EBHP) 22
1.2.9.1 Sélection du dosage en granulat gros et intermédiaire 23
1.2.9.2 Sélection des dosages optimaux en granulat 24
1.2.9.3 Détermination du volume de bitume en fonction des vides 24
1.2.9.4 Performances des EBHP 26
1.3 Utilisation du verre recyclé dans les enrobés 29
1.4 Production et mise en œuvre des enrobés bitumineux à chaud 31
1.4.1 Fabrication des enrobés bitumineux en centrale d'enrobage 31
1.4.1.1 Fabrication des enrobés en centrale continue 31
1.4.1.2 Fabrication des enrobés en centrale discontinue 33
1.4.1.3 Chargement des camions 33
1.4.2 Mise en œuvre des enrobés bitumineux à chaud 34
1.4.2.1 Déchargement des camions 34
1.4.2.2 Compactage des enrobés bitumineux à chaud 35
1.5 Caractéristiques volumétriques des enrobés bitumineux 37

1.5.1 Détermination de la densité maximale des enrobés bitumineux 37
1.5.2 Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire des enrobés bitumineux 37
1.5.3 Détermination de la teneur en bitume au four à ignition 38
1.5.4 Détermination de la teneur en bitume par la méthode d'extraction 39
1.6 Caractéristiques thermomécaniques 40
1.6.1 Résistance à l'orniérage 40
1.6.1.1 Ornières dans le revêtement bitumineux 41
1.6.1.2 Paramètres influençant la résistance à l'orniérage des enrobés bitumineux 42
1.6.1.3 Ornières dans la fondation 43
1.6.1.4 Types d'essai 44
1.6.2 Détermination du module complexe des enrobés bitumineux 44
1.6.2.1 Types d'essais pour la mesure du module complexe 46
1.6.2.2 Modélisation du module complexe d'un enrobé bitumineux 49
1.6.2.3 Présentation du modèle analogique 2S2P1D 51
1.6.2.4 Principe d'équivalence temps – température 52
1.6.2.5 Représentation graphique des résultats de module complexe 53
1.6.2.6 Paramètres influençant la valeur du module complexe 56
1.6.3 Résistance à la fatigue 57
1.6.3.1 Types d'essai de fatigue 57
1.6.3.2 Évolution de la rigidité |E*| au cours d'un essai de fatigue 58
1.6.3.3 Méthodes d'analyse des résultats d'un essai de fatigue 59
1.6.3.4 Représentation graphique des résultats d'un essai de fatigue 61
1.6.3.5 Paramètres influençant la fatigue des enrobés 62
1.6.3.6 Paramètres de la loi de fatigue 62

CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL 65
2.1 Mise en contexte 65
2.2 Problématiques 66
2.3 Objectifs de recherche 66
2.4 Méthodologie 67
2.4.1 Caractérisation du EBHP 14 – Verre de la planche d'essai de l'entrepôt de la SAQ 68
2.4.1.1 Échantillonnage 68
2.4.1.2 Choix du nombre de boite de constitution pour la fabrication des méga boites 69
2.4.1.3 Procédure de fabrication des méga boites 70
2.4.1.4 Essais retenus pour la caractérisation de l'EBHP 14 – Verre 71
2.4.1.5 Étapes de caractérisation de l'EBHP 14 – Verre 72

CHAPITRE 3 MATÉRIAUX UTILISÉS, PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES ET MÉTHODES D'ESSAIS 75
3.1 Description des matériaux utilisés pour la production du EBHP 14 – Verre 75
3.1.1 Les granulats 76

3.1.2 Le verre ... 77
3.1.3 Le liant ... 79
3.1.3.1 Composition du bitume de type PG 76 -28 THRD ... 79
3.1.3.2 Manipulation et entreposage ... 79
3.1.3.3 Propriétés mécaniques, physiques et chimiques du bitume PG 76 -28 THRD ... 80
3.2 Description et procédures des essais ... 81
3.2.1 Détermination de la densité maximale de l'enrobé (d_{mm}) ... 81
3.2.2 Détermination de la teneur en bitume de l'enrobé ... 81
3.2.2.1 Détermination des facteurs de correction ... 82
3.2.3 Fabrication des éprouvettes ... 84
3.2.3.1 Compactage des éprouvettes à la PCG ... 84
3.2.3.2 Éprouvettes pour les essais de module complexe, fatigue et tenue à l'eau ... 85
3.2.3.3 Collage des casques sur les éprouvettes ... 86
3.2.3.4 Compactage des plaques au compacteur LCPC ... 87
3.2.3.5 Détermination de la teneur en vides des plaques ... 87
3.2.4 Essai de résistance à l'orniérage ... 88
3.2.5 Essai de module complexe et module de rigidité ... 90
3.2.5.1 Essai sur les éprouvettes de PCG fabriquées en laboratoire ... 90
3.2.5.2 Équipement utilisé pour la réalisation de l'essai de module complexe ... 92
3.2.5.3 Modélisation des résultats de l'essai ... 92
3.2.5.4 Essai de module de rigidité par traction indirecte ... 92
3.2.6 Essai de résistance à la fatigue ... 95
3.2.6.1 Critères de rupture ... 96
3.2.6.2 Indices de qualité des signaux ... 96
3.2.7 Tenue à l'eau ... 97

CHAPITRE 4 PRÉSENTATION, DISCUSSION ET ANALYSE DES RÉSULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE ... 101
4.1 Les essais en laboratoire ... 101
4.2 Densité maximale du mélange bitumineux ... 101
4.3 Teneur en bitume des mélanges ... 104
4.3.1 Résultats et discussion de la teneur en bitume selon la méthode au four à ignition (LCMB) ... 105
4.3.2 Résultats et discussion de la teneur en bitume par la méthode d'extraction (Laboratoire DJL) ... 106
4.3.3 Discussion des résultats des essais de teneur en bitume ... 108
4.4 Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG) ... 109
4.5 Analyse granulométrique ... 112
4.5.1 Granulométrie des mélanges ... 112
4.5.2 Vérification des cibles aux tamis de contrôle ... 114
4.5.2.1 Proportion retenue sur le tamis de 10mm ... 115
4.5.2.2 Proportion passant le tamis 10mm et retenue au tamis 5mm ... 116

4.5.2.3 Proportion passant le tamis 5mm et retenue au tamis 0,16mm 117
4.5.2.4 Proportion passant au tamis 0,16mm 118
4.5.3 Correction des cibles aux tamis de contrôle 120
4.6 Analyse de la qualité de la production 126
4.7 Résistance à l'orniérage 129
4.7.1 Résultats et discussion 129
4.7.2 Analyse des résultats d'orniérage 132
4.8 Détermination des modules complexes (MC) et modules de rigidité de l'EBHP 14 – Verre 133
4.8.1 Présentation des éprouvettes testées 133
4.8.2 Courbes dans le plan Cole – Cole 135
4.8.3 Courbes dans l'espace de Black..... 136
4.8.4 Variation des facteurs de translation a_T et Tau..... 137
4.8.5 Paramètres du modèle 2S2P1D..... 137
4.8.6 Différences entre les résultats expérimentaux et les valeurs simulées du modèle 2S2P1D 138
4.8.7 Valeurs des modules des essais de laboratoire (E*), des essais en traction indirecte sur les carottes d'enrobé et de l'essai in situ au FWD 140
4.9 Analyse des modules de rigidité in situ de l'EBHP 14 – Verre et validation des résultats des essais en laboratoire 142
4.10 Résistance à la fatigue.....144
4.10.1 Résultats des essais de fatigue 145
4.10.2 Indices de qualité des signaux..... 145
4.10.3 Évolution de la température en cours d'essai 146
4.10.4 Évolution de la déformation..... 147
4.10.5 Évolution du centre de déformation..... 149
4.10.6 Évolution de la contrainte 150
4.10.7 Évolution de l'angle de phase 151
4.10.8 Évolution de la norme du module complexe 153
4.10.9 Évolution de l'énergie..... 154
4.10.10 Analyse des résultats des essais de fatigue 154
4.10.10.1 Durée de vie des éprouvettes de fatigue et critères de rupture 155
4.10.10.2 Critère de transition entre les phases II et III 156
4.10.10.3 Droite de fatigue selon la loi de Wöhler 158
4.11 Essai de durabilité (Tenue à l'eau).....161

CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION DE L'EBHP 14 – VERRE 163
5.1 Analyse des résultats.....163
5.2 Influence du verre recyclé sur les performances de l'EBHP 14 168

CONCLUSION.....173

RECOMMANDATIONS 175

ANNEXE I FICHES TECHNIQUES DE PRODUIT DES MÉLANGES C2 ET C3.....177

ANNEXE II RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE DES MÉLANGES C2 ET C3.....181

ANNEXE III RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE DE RIGIDITÉ OPTION 1.....183

ANNEXE IV RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE DE RIGIDITÉ OPTION 2.....193

ANNEXE V RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE 199

ANNEXE VI RÉSULTATS DES ESSAIS D'EXTRACTION AU LABORATOIRE DJL.223

ANNEXE VII RÉSULTATS DES ESSAIS D'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE.....227

ANNEXE VIII RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE ET DE FATIGUE DE L'EBHP 14 – LAB 229

ANNEXE IX FICHE TECHNIQUE DES GRANULATS DE CALIBRE 10 – 14 235

ANNEXE X ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME PG 76 -28 THRD 237

BIBLIOGRAPHIE.....239

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Teneur en bitume des enrobés conventionnels 20

Tableau 1.2 Valeurs du N_{design} 21

Tableau 1.3 Performances à l'orniérage.....21

Tableau 1.4 Proportion de l'EBHP 20.....25

Tableau 1.5 Exemple de norme de module complexe d'EBHP 14 27

Tableau 1.6 Résultats de fatigue de l'EBHP-14 (Chaux-H) 29

Tableau 1.7 Utilisation du verre recyclé dans la construction routière 30

Tableau 1.8 Temps limites de compactage d'un enrobé.....36

Tableau 1.9 Exigences à la PCG du MTQ.....38

Tableau 1.10 Nombre de cycles de détermination de $|E_0^*|$ 60

Tableau 2.1 Identification des échantillons 68

Tableau 2.2 Essais de caractérisation de l'EBHP 14 – Verre.....72

Tableau 3.1 Caractéristiques du granulat calcaire du EBHP14 – Verre 76

Tableau 3.2 Caractéristiques du verre utilisé à la production du mélange 77

Tableau 3.3 Granulométrie par sédimentométrie du micronisé.....78

Tableau 3.4 Caractéristiques du bitume PG 76 – 28 THRD (Bitumar Inc).....80

Tableau 3.5 Facteur de correction pour la teneur en bitume 83

Tableau 3.6 Facteurs de correction pour la granulométrie 83

Tableau 3.7 Exemple de résultats de PCG de l'EBHP14-verre.....85

Tableau 3.8 Caractéristiques des briquettes compactées à la PCG.....85

Tableau 3.9 Exigences relatives à la résistance à l'orniérage 90

Tableau 3.10 Paramètre d'essai de module complexe 91

Tableau 3.11 Paramètres d'essai de module de rigidité pour les éprouvettes prélevées in situ.....93

Tableau 3.12 Résultats du degré de saturation des éprouvettes de l'échantillon C2 99

Tableau 3.13 Résultats du degré de saturation des éprouvettes de l'échantillon C3 99

Tableau 4.1 Résultats des essais de d_{mm} 102

Tableau 4.2 d_{mm} retenue pour chaque d'échantillon 103

Tableau 4.3 Résultats des teneurs en bitume (b_{cible} = 4,10%, Fcb = -0,39) 105

Tableau 4.4 Résultats de la PCG 109

Tableau 4.5 Nombre de girations des échantillons C2 et C3 111

Tableau 4.6 Synthèse des écarts observés entre la cible et les échantillons pour les retenus au tamis 10mm.....116

Tableau 4.7 Calcul de nouvelle cible cas1 121

Tableau 4.8 Correction des cibles cas 2.....123

Tableau 4.9 Calcul des cibles 124

Tableau 4.10 Sommaire des écarts entre les échantillons E1 et E2 127

Tableau 4.11 Résultats des essais d'orniérage des échantillons C2 et C3 (60˚C et 1Hz) 131

Tableau 4.12 Caractéristiques des éprouvettes de module complexe (MC) et module de rigidité 134

Tableau 4.13 Paramètres de calage du modèle 2S2P1D.....138

Tableau 4.14 Norme du module complexe de l'EBHP14-Verre.....141

Tableau 4.15 Modules in situ de l'EBHP14-Verre 142

Tableau 4.16 Synthèse des essais de fatigue des échantillons C2 et C3.....158

Tableau 4.17 Paramètres des droites de fatigue des mélanges C2 et C3 159

Tableau 4.18 Résultats de l'essai de tenue à l'eau de l'échantillon C2 (%b = 4,1) 161

Tableau 4.19 Résultats de l'essai de tenue à l'eau de l'échantillon C3 (% b = 3,8) 162

Tableau 5.1 Sommaires des résultats des essais des enrobés EBHP 14 164

Tableau 5.2 Synthèse des résultats de l'EBHP 14.....169

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Différentes couches d'une chaussée bitumineuse au Québec 3

Figure 1.2 Sollicitations induites par le trafic 5

Figure 1.3 Sollicitations induites par la température.....6

Figure 1.4 Diagramme des phases.....6

Figure 1.5 Présentation des interactions dans un mélange binaire.....11

Figure 1.6 Évolution de l'indice des vides dans un mélange binaire selon Furnas en fonction du rapport des dimensions moyennes des particules.....12

Figure 1.7 Comportements des enrobés bitumineux 17

Figure 1.8 Illustration des classes de SMA-Cpack.....20

Figure 1.9 Illustration des classes d'EBHP.....23

Figure 1.10 Évolution du Vbe des SMA en fonction du GNM.....25

Figure 1.11 Représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole de l'EBHP 20 26

Figure 1.12 Évolution du pourcentage d'orniérage suivant le nombre de cycle des EBHP-20 27

Figure 1.13 Courbes de fatigue des EBHP-20 28

Figure 1.14 Schéma de principe d'une centrale continue à tambour sécheur (Faure et Noël, 1981) 32

Figure 1.15 Schéma de principe d'une centrale continue TSM (Faure et Noël, 1981) .32

Figure 1.16 Schéma de principe d'une centrale discontinue (Faure et Noël, 1981).....33

Figure 1.17 Méthode de déchargement d'un camion dans le finisseur Tirée de Bitume Québec (2008).....34

Figure 1.18 Zone de restriction du MTQ 42

Figure 1.19 Définition du module complexe.....45

Figure 1.20 Récapitulatif des essais homogènes de module complexe des enrobés.....47

Figure 1.21 Récapitulatif des essais non homogènes de module complexe des enrobés48

Figure 1.22 Modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt.....49

Figure 1.23 Représentation des modèles de Huet et Huet-Sayegh.....50

Figure 1.24 Représentation du modèle 2S2P1D 51

Figure 1.25 Courbes isothermes de module complexe d'un enrobé bitumineux.....54

Figure 1.26 Représentation du module complexe dans le plan Cole – Cole.....55

Figure 1.27 Représentation du module complexe dans l'espace Black.....55

Figure 1.28 Évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles 58

Figure 1.29 Courbe de Wöhler.....62

Figure 2.1 Procédure de fabrication des méga boites.....71

Figure 2.2 Étapes de caractérisation de l'EBHP 14 – Verre 73

Figure 3.1 Courbes granulométriques des classes granulaires de l'EBHP14-Verre.....78

Figure 3.2 Échantillons pour l'essai de d_{mm}.....81

Figure 3.3 Briquette de 150mm compactée à la PCG et éprouvette de 75mm de diamètre extraite par carottage 84

Figure 3.4 Compacteur de plaque LCPC du LCMB 87

Figure 3.5 Photo illustrant la pesée hydrostatique d'une plaque.....88

Figure 3.6 Orniéreur LCPC du LCMB.....89

Figure 3.7 Localisation des points de mesurages des ornières.....89

Figure 3.8 Illustration d'une éprouvette montée dans la presse pour un essai de module complexe 91

Figure 3.9 Éprouvettes extraites des carottes in situ pour les essais de module de rigidité 94

Figure 3.10 Illustration d'une éprouvette montée dans la presse pour un essai de module de rigidité 95

Figure 3.11 Essai de tenue à l'eau a) saturation des éprouvettes pour le cycle gel-dégel b) essai ITS sur une éprouvette 98

Figure 4.1 Résultats des essais de d_{mm} 103

Figure 4.2 Critères d'acceptabilité pour la d_{mm} 104

Figure 4.3 Résultats teneur en bitume des méga boites par la méthode du four à ignition (LCMB) 106

Figure 4.4 Résultats teneur en bitume des méga boites par la méthode d'extraction (DJL) 107

Figure 4.5 Résultats des PCG des méga boites C2 et C3 110

Figure 4.6 Résultats de la PCG 110

Figure 4.7 Courbes granulométriques des résidus du four à ignition.....112

Figure 4.8 Courbes granulométriques des méga boites C2 et C3 déterminées au laboratoire DJL à partir des résidus d'extraction.....113

Figure 4.9 Retenus au tamis 10mm pour les échantillons C2 et C3.....115

Figure 4.10 Passant tamis 10mm/Retenu tamis 5mm des échantillons C2 et C3 117

Figure 4.11 Passant tamis 5mm/Retenu tamis 0,16mm des échantillons C2 et C3 118

Figure 4.12 Passant tamis 0,16mm des échantillons C2 et C3.....119

Figure 4.13 Production d'EBHP14-Verre en centrale 128

Figure 4.14 Pourcentage d'orniérage en fonction des fines 130

Figure 4.15 Évolution des déformations en fonction du nombre de cycles de sollicitation.....131

Figure 4.16 Évolution des ornières en fonction du log du nombre de cycles 132

Figure 4.17 Représentation du module complexe de l'EBHP14-Verre dans le plan Cole-Cole 135

Figure 4.18 Représentation du module de l'EBHP14-Verre dans l'espace de Black 136

Figure 4.19 Variation des facteurs a_T (a) et Tau (b) des éprouvettes échantillons C2 et C3 137

Figure 4.20 a) Écarts entre les valeurs expérimentales de |E*| et les valeurs de |E*| 2S2P1D b) Écart entre les angles de phase expérimentaux et angles de phase du modèle 2S2P1D 139

Figure 4.21 Écarts entre les a_T expérimentaux et les a_T de simulation du modèle WLF 140

Figure 4.22 Indice de qualité des signaux des éprouvettes 145

Figure 4.23 Évolution de la température au sein de l'éprouvette 146

Figure 4.24 Évolution des déformations de l'éprouvette.....147

Figure 4.25 Évolution des écarts de déformation des extensomètres en cours d'essai.....148

Figure 4.26 Évolution du centre de déformation de l'éprouvette 149

Figure 4.27 Évolution de la contrainte en cours d'essai de l'éprouvette C2-MB3 150

Figure 4.28 Évolution de la contrainte centrée de l'éprouvette 151

Figure 4.29 Évolution de l'angle de phase de l'éprouvette 152

Figure 4.30 Évolution de la norme du module complexe de l'éprouvette.....153

Figure 4.31 Évolution de l'énergie dissipée de l'éprouvette 154

Figure 4.32 Détermination du nombre de cycle correspondant aux critères.....156

Figure 4.33 Détermination du nombre de cycles correspondant à 25%.....157

Figure 4.34 Détermination du nombre de cycles correspondant à la valeur maximale de l'angle de phase 157

Figure 4.35 Droites de fatigue selon les critères $Nf_{50\%}$ et $Nf_{II/III}$ 160

Figure 5.1 Résultats des essais PCG, orniérage et module E* 165

Figure 5.2 Résultats des essais PCG, orniérage et module E* 166

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AG	Analyse Granulométrique
AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
C1	Camion 1
C2	Camion 2
C3	Camion 3
EBHP	Enrobé Bitumineux Hautes Performances
ÉEQ	Éco Entreprises Québec
ESG	Enrobé Semi-Grenu
ÉTS	École de Technologie Supérieure
Fcg	Facteurs de correction pour la granulométrie
FWD	Déflectomètre à masse tombante (*Falling Weight Deflectometer*)
GNM	Grosseur Nominale Maximale
LA	*Los Angeles*
LC	Laboratoire des Chaussées
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
MB	Méga Boite
MC	Module Complexe
MD	Micro Deval
MLPC	Matériel du Laboratoire des Ponts et Chaussées
MTMDET	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transports
MTO	Ministère des Transports Ontario

NCAT	*National Center for Asphalt Technology*
Ng	Nombre de giration
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PG	Grade de performance d'un bitume (*Performance Grade*)
PL	Plaques pour les essais d'orniérage
PmB	Bitumes modifiés aux Polymères
PETT	Principe d'Équivalence Temps – Température
PIDF	Proportionnel-Intégrale-Dérivée avec Filtre
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
S	Seconde pour la rigidité de fluage du bitume
SAQ	Société d'Alcool du Québec
SMA	*Stone Mastic Asphalt*
THRD	Très Haute Résistance aux Désenrobage
TSR	*Tensile Strength Ratio*
VEL	Viscoélastique Linéaire
WLF	Loi de William – Landel – Ferry

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
°	Degré
°C	Degré Celsius
Ω	Pulsation
α	Surface spécifique
φ	Angle de phase
β	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
δ	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
a_T	Facteur de translation
b (%)	Pourcentage de bitume d'ajout
σ	Contrainte
C_1	Constante qui dépend du matériau testé pour la loi de WLF
C_2	Constante qui dépend du matériau testé pour la loi de WLF
E*	Module complexe
|E*|	Norme du module complexe
E_0	Module vitreux
E_{00}	Module statique
E_1	Composante élastique
E_2	Composante visqueuse
f	Fréquence
g	Gramme

h	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
Hz	Hertz
IQ	Indice de qualité (%)
k	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
kg	Kilogramme
kN	Kilo newton
$Nf_{50\%}$	Nombre de cycle à la rupture associé à une perte de 50 % de la valeur du module initial
$Nf_{II/III}$	Nombre de cycle à la rupture associé à la transition entre les phases II et III
$Nf_{\Delta ext}$	Nombre de cycle à la rupture associé à un écart d'un extensomètre
$Nf_{\varphi max}$	Nombre de cycle à la rupture associé à la valeur maximale de l'angle de phase
m	Mètre
mm	Millimètre
µm	Micromètre (10-6 m)
µdéf	Microdéformation (µm/m)
MPa	Méga pascal
Pba	Pourcentage de bitume absorbé
R_2	Coefficient de qualité d'une régression linéaire

INTRODUCTION

Le recyclage du verre au Québec a connu un défi majeur en 2013 avec la fermeture du plus important conditionneur de verre (Recyc-Québec, 2015). Cette situation est à l'origine de nombreux projets-pilotes qui ont vu le jour dans ce domaine et dont l'un des plus importants au Québec aujourd'hui est l'incorporation du verre recyclé dans la structure des chaussés bitumineuse. Incorporer le verre dans la chaussée et particulièrement dans les enrobés bitumineux pour désengorger les sites d'enfouissements et accroître les performances des matériaux dans les revêtements bitumineux est de fait un défi pour les chercheurs de l'école de technologie supérieure (ÉTS).

Afin d'évaluer la faisabilité de l'incorporation du verre recyclé dans les enrobés bitumineux et la possibilité de production en centrale d'enrobage, les chercheurs de l'ÉTS ont eu recours à un mélange bitumineux de haute performance développé à l'ÉTS. L'enrobé incorporant du verre a donc été formulé avec une substitution de 25% de la masse de pierre par du verre recyclé. Une précédente étude avait estimé cette proportion de substitution à un optimal de 10% pour un enrobé bitumineux de type ESG 14 (Lachance Tremblay, 2014). L'enrobé ainsi formulé a été produit en centrale et mise en œuvre par l'entreprise EUROVIA pour la réalisation d'une planche d'essai sur un site de la SAQ.

Cette étude a pour but la vérification de l'homogénéité de l'enrobé incorporant du verre recyclé produit en centrale d'enrobage. Aussi, ce travail va permettre de déterminer les performances de ce mélange bitumineux en laboratoire, in situ et d'évaluer l'influence du verre recyclé sur les propriétés de cet enrobé de haute performance. Pour ce faire, lors de la réalisation de la planche d'essai, deux lots d'échantillons ont été prélevés. Des essais visant à évaluer l'aspect volumétrique, à déterminer les performances mécaniques et de durabilité de la production ont été réalisé sur ces échantillons au laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB). Par la suite, des carottes prélevées dans la chaussée réalisée ont été testées, leurs performances ont été évaluées et comparées aux performances du mélange en laboratoire puis à celles des mélanges de référence formulés à l'ÉTS.

Le présent mémoire comporte cinq chapitres. Le chapitre 1 présente la revue de la littérature. Au chapitre 2, on retrouve les objectifs de ce travail et le programme expérimental de recherche. On retrouve également dans ce chapitre une mise en contexte et les problématiques de ce travail. Le chapitre 3 s'intéresse à la présentation des matériaux utilisés lors de la production du mélange bitumineux en centrale et aux différentes méthodes des essais de caractérisation en laboratoire. Il s'en suit au chapitre 4, les résultats des différents essais de caractérisation, les discutions et les analyses de ces résultats. Finalement, au chapitre 5, une analyse globale de la caractérisation de la production et l'influence du verre recyclé sur les performances de cet enrobé en sont présentées.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Structure d'une chaussée bitumineuse et sollicitations induites dans la chaussée bitumineuse

1.1.1 Structure d'une chaussée bitumineuse

Une chaussée bitumineuse, appelée chaussée ``souple``, a une structure qui est généralement composée de plusieurs couches (Murillas, 2010). Au Québec, une structure de chaussée bitumineuse est composée des couches suivantes : la couche de sous-fondation, la fondation, la couche de base, couche de liaison et la couche de roulement (Agal, 2005; Meunier, 2012). Ces trois dernières couches constituent le revêtement bitumineux de la chaussée.

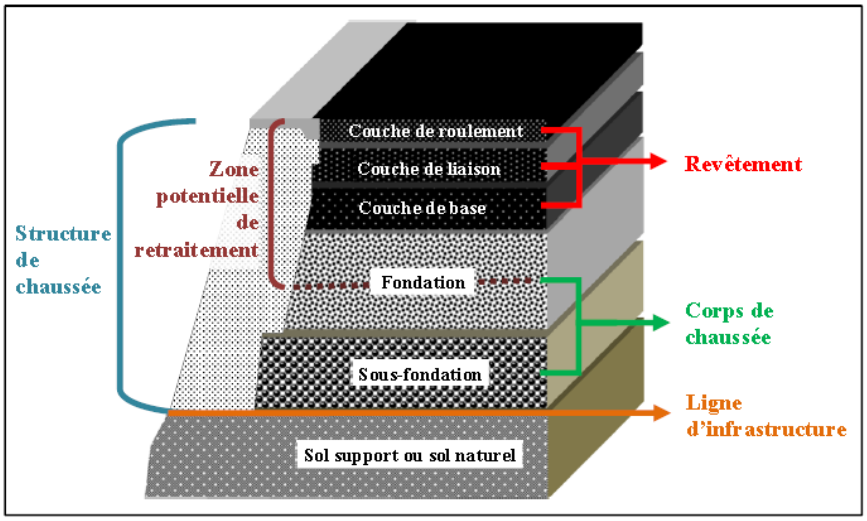


Figure 1.1 Différentes couches d'une chaussée bitumineuse au Québec
Source Bitume Québec (2007) et MTQ (2010-1)
Tirée de Meunier (2012)

La couche de roulement confère au revêtement bitumineux les caractéristiques de rugosité, de drainage et de réduction de bruit pour assurer la sécurité et le confort aux usagers (Murillas, 2010; Perraton, 2015). Elle permet aussi d'assurer la protection des couches sous-jacentes et

l'intégrité de la chaussée. Elle présente une surface unie tout en éliminant la perte des granulats et la poussière (Agal, 2005). La couche de liaison assure le collage des couches de roulement et de base. Elle joue aussi un rôle d'étanchéité, de protection thermique et limite les remontées de fissures. La couche de base apporte la rigidité du revêtement, réduit les contraintes aux couches sous-jacentes et assure la résistance à la fatigue du revêtement (Perraton, 2015). La couche de base peut être constituée de plusieurs couches (Murillas, 2010).

La couche de fondation est en matériau granulaire non traité ou traité. Elle constitue l'élément porteur qui supporte le revêtement et contribue à la répartition des charges appliquées (Agal, 2005). Elle protège le sol support contre le gel et offre une surface stable qui permet la pose du revêtement. La couche de sous – fondation est en matériau granulaire non traité au Québec, elle assure la répartition des charges sur le sol support et sa protection contre le gel. Le rôle principal de cette couche est le drainage de la fondation et limite sa contamination par le sol support (Agal, 2005).

1.1.2 Sollicitations induites dans la chaussée

1.1.2.1 Effets de trafic

Le passage des véhicules constitue une des principales sollicitations à l'origine des désordres observés dans les chaussées. Sous l'effet du trafic, les différentes couches de la chaussée sont sujettes à des écrasements et des flexions. Cette action engendre de petites tractions répétées à la base des couches liées créant dès lors des microdégradations qui s'accumulent et peuvent conduire à la fatigue du matériau (Di Benedetto et Corté, 2005). Le passage des véhicules provoque aussi le tassement des couches bitumineuses et la déformation des couches non liées, conduisant ainsi à des déformations permanentes qui se traduisent par l'orniérage de la chaussée. Le comportement des chaussées bitumineuses dépend de la vitesse de chargement et de la température. La Figure 1.2 présente les sollicitations induites par le trafic dans la chaussée.

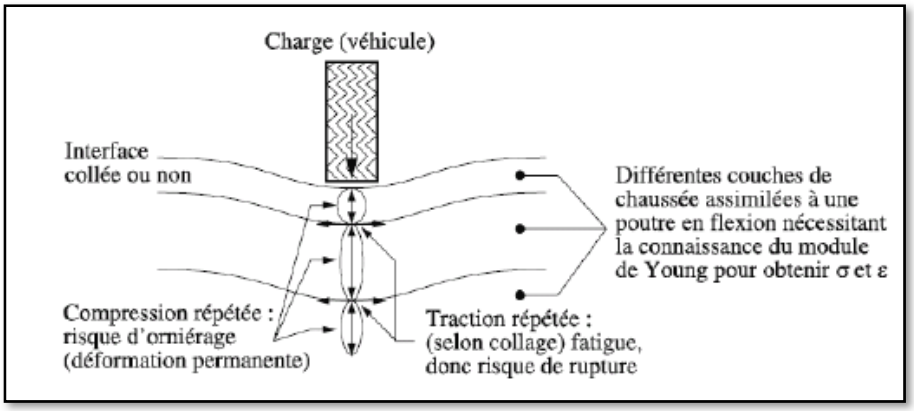


Figure 1.2 Sollicitations induites par le trafic
Tirée de Di Benedetto et Corté (2005)

Les différents désordres observés sur les chaussés sous l'effet du trafic sont uniquement liés au trafic poids lourds. En effet, les essais A.A.S.H.O réalisés aux USA en 1957 et 1961 ont permis de quantifier le phénomène et d'établir une loi d'équivalence entre charges de poids différents (Faure, 1998). Cette loi d'équivalence montre que l'agressivité d'un véhicule poids léger est de très loin inférieure à celui d'un poids lourd et n'a aucun effet sur la chaussée. D'où le fait de négliger le trafic léger pour ne prendre en considération que le trafic poids lourd.

1.1.2.2 Effet de la température

Les variations de la température ont deux effets sur les matériaux bitumineux : un changement de rigidité (module) et la création de contraintes et déformations au sein des matériaux. Les enrobés bitumineux sont des matériaux thermosensibles et leur comportement est caractérisé par la dépendance de leur rigidité vis-à-vis de la température, mais également de la vitesse de chargement en raison du caractère visqueux du comportement (Di Benedetto et Corté, 2005). Les contraintes et déformations engendrées par les variations de la température sont très néfastes pour les enrobés. Elles sont à l'origine de l'apparition et de la propagation des fissures dans l'enrobé avec les variations de température. La Figure 1.3 présente les types de sollicitations induites par les effets de la température dans la chaussée.

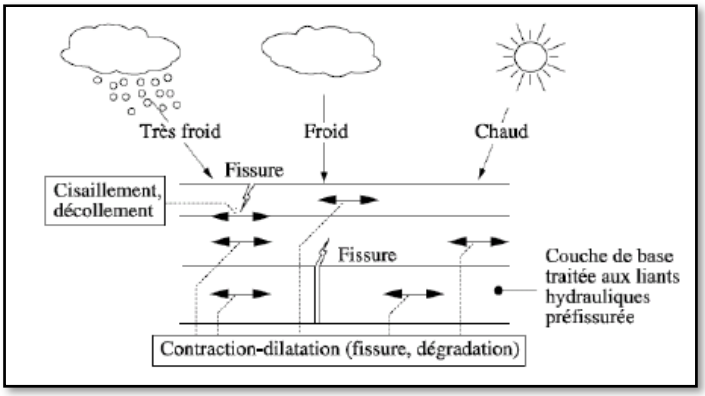


Figure 1.3 Sollicitations induites par la température
Tirée de Di Benedetto et Corté (2005)

1.2 Les enrobés bitumineux

Les mélanges bitumineux sont principalement composés de pierre, sable, filler, liant bitumineux et des additifs en proportion bien définie, variant selon le type de mélange et selon sa fonction dans la chaussée (Di Benedetto et Corté, 2005). L'ensemble gravillons, sable et filler constitue le squelette granulaire qui assure la rigidité du mélange tandis que le liant est responsable de la cohésion du mélange (Baaj, 2002). La composition d'un enrobé bitumineux compacté peut être représentée à l'aide du diagramme des phases tel qu'illustrée à la Figure 1.4.

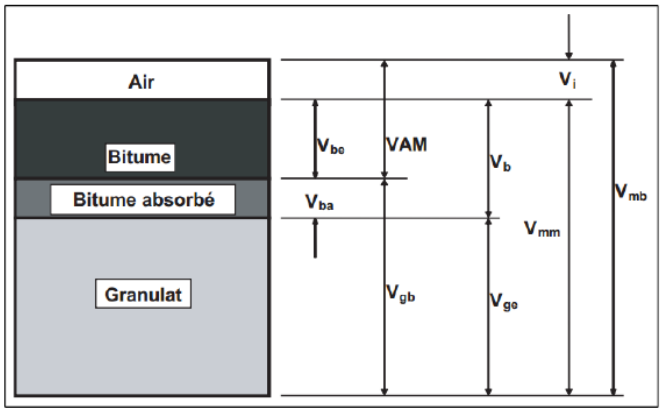


Figure 1.4 Diagramme des phases
Tirée de norme LC : Enrobés : Formulation selon la méthode LC (2006)

Où :

V_{mb} : volume brut de l'enrobé ;

V_i : volume des vides interstitiels ;

V_{mm} : volume maximal de l'enrobé (sans les vides interstitiels) ;

V_b : volume total de bitume ;

V_{ge} : volume du granulat effectif ;

VAM : volume des vides intergranulaires (entre les particules du granulat) ;

V_{gb} : volume du granulat brut ;

V_{be} : volume de bitume effectif ;

V_{ba} : volume de bitume absorbé.

1.2.1 Les principaux constituants d'un enrobé

Un enrobé bitumineux est principalement constitué de deux éléments qui sont : le squelette granulaire et le liant bitumineux (bitume).

1.2.1.1 Les granulats

Les granulats représentent environ 80 à 85% du volume d'un enrobé bitumineux et sont représentés par l'ensemble des fillers, sables et pierres. Ils ont une grande influence sur les caractéristiques mécaniques et les performances de l'enrobé (Sohm, 2011). Le squelette granulaire est composé de différente classe de granulats. Au Québec, les granulats composants les enrobés sont appelés : gros granulats (GG, particules de tailles > 5mm, classes 5-10, 10-14 et 14-20mm), granulats fins (GF, particules de taille < 5mm) et filler d'appoint (FM, particules de taille < 630µm) (Lamothe, 2014). L'étendue granulaire est désignée par "d" et " D" qui représentent la plus petite et la plus grande des dimensions de la classe granulaire. Pour désigner la classe granulaire, le Laboratoire LC du MTMDET a défini une grosseur nominale maximale (GNM) du granulat. Le GNM représente la dimension du plus petit tamis de la série normalisée qui est supérieure au premier tamis ayant un pourcentage retenu plus grand que 10% (Perraton et Olard, 2015).

Selon Perraton (2015), on distingue deux catégories de granulats : les granulats de source naturelle qui sont extraits des carrières, gravières ou des sablières et les granulats artificiels fabriqués pour des usages particuliers ou des sous-produits d'origine industrielle (les laitiers, les scories, les cendres volantes, les résidus de mines, le verre, etc.). Leurs principales caractéristiques qu'on évalue en laboratoire sont :

- dureté ;
- ténacité ;
- dimension des particules ;
- forme des particules (Sphéricité et Angularité) ;
- surface des particules ;
- absorption.

Ainsi, selon le type de route, le niveau de service (trafic) et de leurs positions dans la chaussée, ces granulats doivent satisfaire à certaines exigences fixées par le MTMDET pour les propriétés intrinsèques (résistance à l'abrasion et résistance à l'usure) et de fabrication (pourcentage de particules fracturées, proportion de particules plates et allongées et la friabilité) (Lachance Tremblay, 2014; Lamothe, 2014).

1.2.1.2 Combinaison granulaire

Un granulat est un ensemble de particules (Perraton, 2015) qui peuvent être classées suivant leurs dimensions. Un matériau granulaire est constitué d'une multitude de particules (Perraton, 2015), donc de différentes classes de granulats qui sont combinées entre elles et dont l'ensemble des proportions des différentes classes forme la granularité du matériau (Baron, 1982). Les propriétés du matériau granulaire sont donc liées à ces différentes classes granulaires, mais surtout à la combinaison de ces classes.

1.2.1.3 Porosité et indice des vides

La porosité est le volume laissé libre entre les particules au volume total de l'empilement, elle est la propriété la plus importante des empilements granulaires (Aim et Le Goff, 1968) et se détermine par l'équation 1.1 :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \tag{1.1}$$

Avec

$$V_t = V_v + V_s \tag{1.2}$$

Où

n porosité ;

V_s volume des solides ;

V_v volume des vides ;

V_t volume total.

L'indice des vides d'un matériau granulaire est le rapport entre le volume des vides et le volume des particules solides. Il caractérise globalement la structure du matériau granulaire (Baron, 1982) et est lié à la porosité par la relation suivante :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{1.3}$$

$$n = \frac{e}{1+e} \tag{1.4}$$

Où

e indice des vides ;

Vs volume des solides ;

Vv volume des vides ;

n porosité.

1.2.1.4 Évolution de l'indice des vides pour un mélange binaire

Deux types d'interactions et leurs incidences sur l'indice des vides d'un mélange binaire ont été mises en évidence par Caquot en 1937. Le mélange de deux granulats uniformes de taille différente (un gros granulat et un granulat fin) produit soit un effet de paroi ou un effet d'interférence. Pour Perraton, Meunier et Carter (2007), il y a effet de paroi lorsqu'on ajoute, par exemple, quelques particules du gros granulat dans du granulat fin. L'effet de paroi se produit aussi lors des interactions entre les particules et tout type de paroi (tuyau, coffrage, etc.) et a pour conséquence l'augmentation l'indice des vides du mélange granulaire.

L'effet d'interférence est lui traduit par l'ajout de particules de granulat fin dans du gros granulat. Au-delà de la proportion optimale du granulat, les particules grossières du gros granulat s'écartent par desserrement ; c'est l'effet d'interférence. Il entraine aussi une augmentation de l'indice des vides du mélange granulaire. L'évolution de l'indice des vides en fonction des proportions des particules des granulats dans un mélange binaire est illustrée à la Figure 1.5.

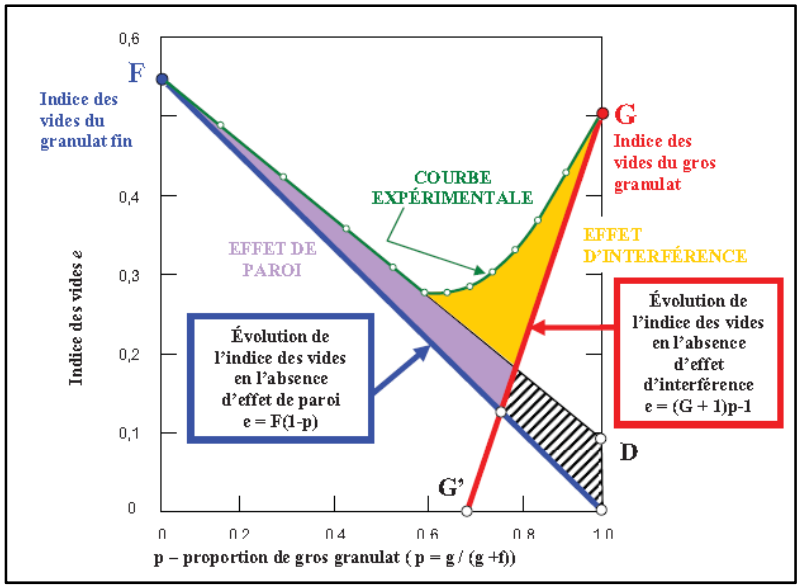


Figure 1.5 Présentation des interactions dans un mélange binaire
Tirée de Perraton, Meunier et Carter (2007)

L'évolution de l'indice des vides au sein d'un mélange binaire est aussi liée au rapport de la dimension moyenne du granulat fin à celle du gros granulat. Perraton, Meunier et Carter (2007) recommandent de limiter la taille et le dosage de la fraction des particules intermédiaires afin de minimiser leurs interactions sur les particules grossières et de combler le maximum de vides avec des particules fines. La Figure 1.6 montre l'évolution de l'indice des vides établie selon Furnas sur un combiné binaire gros et fin en fonction de la proportion de gros granulat dans le mélange pour divers rapports des diamètres des particules.

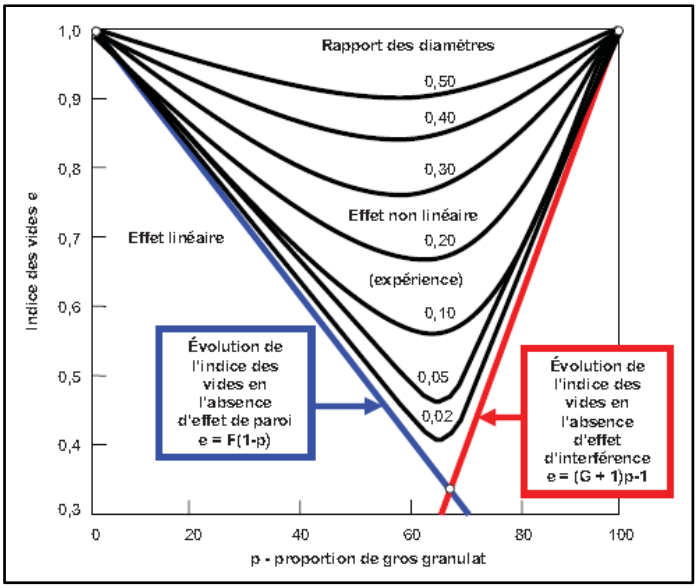


Figure 1.6 Évolution de l'indice des vides dans un mélange binaire selon Furnas en fonction du rapport des dimensions moyennes des particules
Tirée de Perraton, Meunier et Carter (2007)

1.2.1.5 Influence des fillers sur les performances du mélange

Les fillers sont définis comme étant les granulats fins dont les dimensions des particules sont comprises entre 0mm et 630µm (BNQ, 2014). Ils servent à remplir les vides entre les particules plus grossières. De fait, la quantité de filler dans un mélange bitumineux a une grande importance, car elle peut influencer de beaucoup les paramètres de formulation et donc les performances du mélange bitumineux.

Selon Lamothe (2003), le filler peut avoir un effet variable sur le VAM. Il diminue au fur et à mesure de l'addition du filler dans un mélange bitumineux jusqu'à atteindre une valeur optimale au-delà de laquelle 1'ajout de filler fait augmenter le VAM. L'excès de filler entraine donc un effet de desserrement et diminue la qualité de contact entre les particules grossières. De plus, cet excès entraine une augmentation de la quantité de bitume nécessaire à l'enrobé du fait d'une augmentation de la surface spécifique des granulats fins.

L’excès de filler peut être particulièrement néfaste pour la résistance à l’orniérage de l’enrobé bitumineux. En plus de créer un effet de desserrement des grosses particules, le filler peut avoir aussi un comportement semblable à celui des billes et permettre ainsi le glissement des particules grossières les unes par rapport aux autres lors des chargements (Perraton, 2015). L’enrobé bitumineux présente dès lors un comportement instable à l’orniérage.

La distribution granulométrique et la taille du filler sont deux paramètres aussi très importants. Pour Lamothe (2003), ces deux paramètres peuvent avoir un effet sur l’ouvrabilité du mélange. Il distingue alors dans le filler une portion relativement grossière (> 40µm) et une seconde ultra fine (entre 20 et 5µm). Les particules inférieures à 10µm entrent dans la composition du FBE sans interaction avec les plus grosses particules. Par contre les particules plus grosses que l'épaisseur du FBE prennent part dans la structure minérale et vont contribuer aux contacts entre les particules (Lamothe, 2003).

En dehors de la quantité de filler, le type de filler aussi peut influencer la résistance à l’orniérage du mélange bitumineux. Bérubé et Paradis (1997), mentionnent qu’il semble préférable d'utiliser un filler de même composition minéralogique que la fraction sable donc que la fraction intermédiaire afin d'avoir une meilleure résistance à 1'orniérage. Pour ces auteurs, les différences dans l'angularité, la rugosité, les résistances mécaniques, les compositions chimiques et l'absorptivité de la fraction de sable des granulats et du filler entrainent des modifications du comportement des mélanges.

1.2.1.6 Le liant bitumineux

Le bitume est un produit complexe composé de différents hydrocarbures de poids moléculaire élevé appartenant dans leur grande majorité aux groupes aliphatique et naphténique (Di Benedetto et Corté, 2003). Il est obtenu par raffinage et traitement des pétroles bruts et doit présenter une cohésion suffisante pour résister aux sollicitations thermiques et mécaniques imposées par les conditions atmosphériques et de circulation (Di

Benedetto et Corté, 2003). De fait, le bitume servant de liant pour les enrobés n'est en général pas utilisé à l'état pur en tant que matériau de construction (Sohm, 2011).

Le bitume est principalement caractérisé par sa susceptibilité thermique liée à la variation de sa consistance avec la température et par sa susceptibilité cinétique. Avec les variations de température, le bitume passe d'un état de liquide newtonien peu visqueux dans le domaine des hautes températures à un solide vitreux élastique et fragile dans le domaine des températures négatives, en passant par des états dits viscoélastiques (linéaire et non linéaire) (Sohm, 2011). La susceptibilité cinétique est liée aux variations des propriétés du bitume avec le temps d'application des charges. Malgré la faible proportion du bitume comparativement à celle du granulat, les caractéristiques du bitume influencent de façon importante les propriétés de l'enrobé (Di Benedetto et Corté, 2003). Aussi, les changements d'état des enrobés sous sollicitations climatiques et de circulation (trafic) sont liés au bitume et sont à l'origine des déformations permanentes aux températures élevées, de l'endommagement ou fatigue aux températures intermédiaires, de la fissuration thermique et de la rupture fragile aux basses températures (Sohm, 2011).

Il existe plusieurs classes de bitume en construction. La classification des bitumes se fait en quantifiant la cohésion du bitume en fonction d'une température de référence (méthode européenne) ou bien en déterminant des plages de température pour des niveaux de cohésion de référence (méthode SHRP « Strategic Highway Research Program ») (Lachance Tremblay, 2014; Lamothe, 2014). La classification Superpave est celle utilisée au Québec.

1.2.2 Les types d'enrobé bitumineux

Selon leur rôle dans la chaussée, il existe plusieurs types de mélange bitumineux. En se référant à la manière dont le liant est incorporé pour former le mélange avec la phase granulaire, Di Benedetto et Corté (2005) distinguent :

- les enrobés à chaud en centrale ou hors du site d'application : le macadam (Royaume-Uni), la grave-bitume (GB), le sable-bitume (SB), enrobé à module élevé (EME), les bétons bitumineux (BB), les SMA, etc ;
- les enrobés traités à froid à l'émulsion, à la mousse ou avec liant mixte hydrocarboné/hydraulique ;
- les enrobés à base d'émulsion ou bitume fluxé.

Au Québec, les différents types d'enrobé formulés selon la méthode LC du MTQ sont : la grave-bitume (GB), les enrobés grenus (EG), les semi grenus (ESG), les grenus avec amiante (EGA), les grenus minces (EGM), l'enrobé de correction (EC), les coulés à froid (ECF) et les *stone mastic asphalt* (SMA) (Perraton, 2015).

1.2.3 Formulation des enrobés bitumineux

La formulation des enrobés bitumineux peut se faire selon différentes méthodes. Pour les enrobés bitumineux standards, les principales méthodes les plus utilisées dans le domaine des enrobés sont la méthode Marshall, la méthode Superpave, la méthode française et la méthode du laboratoire des chaussées (LC) du ministère des transports du Québec (MTMDET). Chacune de ces méthodes ont leur principe, des avantages et des inconvénients. Pour les enrobés non standards, des modifications sont apportées à ces différentes méthodes selon les types de performances visées à la formulation. C'est le cas pour les enrobés SMA dont le *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) a mise en place une méthode de formulation basée sur les différentes méthodes précitées (Meunier, 2005). La méthode du NCAT est donc une méthode hybride qui tient compte des caractéristiques et particularités spécifiques de cet enrobé en énonçant une série d'exigences et de recommandations pour la formulation, la fabrication et la mise en œuvre des SMA (Tremblay, 2001). Toutes ces méthodes ont en commun, mais sous des formes différentes, la détermination des masses volumiques des constituants et du mélange, le compactage des mélanges et les essais mécaniques sur les mélanges compactés (Di Benedetto et Corté, 2005). Au Québec, les enrobés sont formulés selon la méthode LC du MTMDET. Toutefois, la méthode Marshall

est encore en vigueur pour les enrobés formulés à froid. Ici, nous faisons une brève présentation des principes de la méthode LC.

1.2.4 Méthode du laboratoire des chaussées (LC)

Au Québec, les enrobés bitumineux sont formulés selon la méthode LC du MTMDET. La méthode LC a été mise au point en combinant la méthode du LCPC (France) et la méthode SUPERPAVE (États-Unis) (Perraton, 2015). L'approche LC vise la formulation d'enrobé performant du point de vue de la fatigue, en permettant une teneur en bitume la plus élevée possible, tout en considérant qu'il doit être suffisamment résistant à la déformation permanente (Perraton, 2015). C'est une méthode d'étude volumétrique qui a pour principe de fixer, selon le type d'enrobé, le volume de bitume effectif (V_{be}) et de spécifier la teneur en vide interstitielle (Lachance Tremblay, 2014).

La méthode de formulation LC comprend deux niveaux de formulation :
Niveau 1 : Aptitude au compactage à la Presse à cisaillement giratoire (PCG)
Il permet de déterminer les proportions des différents composants des mélanges afin d'obtenir les caractéristiques volumétriques en fonction du nombre de girations.
Niveau 2 : Essais de résistance à l'orniérage
Il permet la vérification en laboratoire de la performance à l'orniérage de l'enrobé formulé (Laldji, 2015).

1.2.5 Comportements des enrobés

Quatre types de comportements ont été identifiés pour les enrobés bitumineux en considérant l'amplitude de déformation et le nombre de cycles de chargement appliqué (Di Benedetto et Corté, 2005). La figure 1.13 présente les différents domaines de comportement identifié pour les enrobés bitumineux.

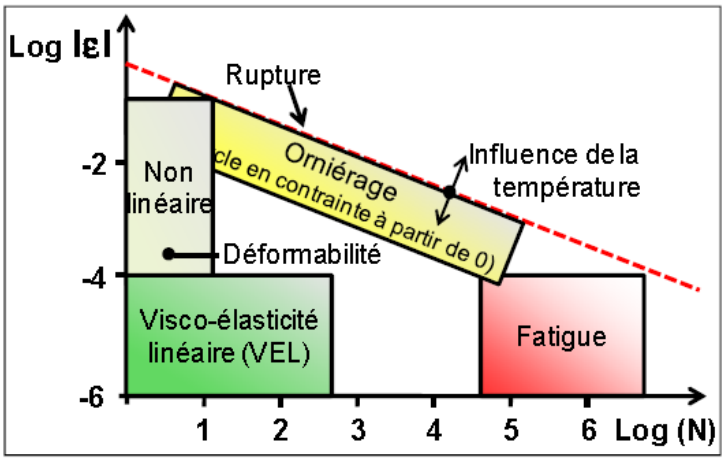


Figure 1.7 Comportements des enrobés bitumineux
Tirée de Lachance Tremblay (2014) adapté de
Di Benedetto et Corté (2005)

Les quatre comportements sont :

- le comportement fortement non linéaire qui se produit pour un faible nombre de cycles de chargement et des déformations élevées (quelques pourcents) ;
- le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations faibles ($< 10^{-4}$) ;
- le phénomène de fatigue se produit lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations ”faibles” qui favorisent le développement de l’endommagement ;
- l’orniérage qui est le quatrième type de comportement se produit suite à l’accumulation des déformations irréversibles sous un grand nombre de cycles de chargements à une température élevée.

1.2.6 Les enrobés SMA

Le SMA est un enrobé à granulométrie discontinue ayant une forte proportion (60 % – 80 %) de granulats grossiers (> 5 mm), une forte teneur en bitume (5,5 % - 7,0 %), un fort pourcentage de filler minéral (8 % – 11 %) et un ajout de fibres (1 %) (DLC, 2006). L’enrobé

SMA est formulé de manière à maximiser le contact pierre-sur-pierre (Perraton, Meunier et Carter, 2007) et se révèle être un matériau performant et durable avec un faible pourcentage de vides (de l'ordre de 2 à 6%).

1.2.6.1 Historique des SMA

Découvert en Allemagne dans les années 1960 suite aux problèmes d'ornière constatés sur les chaussées bitumineuses dus à l'utilisation des pneumatiques cloutés et à l'augmentation du trafic, l'utilisation des enrobés SMA c'est rapidement répandu dans le monde et particulièrement dans les pays européens. L'enrobé SMA est le fruit de Zichner, qui pour corriger les pathologies liées aux pneus cloutés proposait un mélange de mastic et de pierre concassés de haute qualité dans les proportions de 30/70 (Perraton, Meunier et Carter, 2007). Ainsi naissait l'enrobé SMA en 1968. Toutefois, le fort taux de bitume du mélange entraina un problème de saignement dans le SMA. Zichner utilisa des fibres pour stabiliser le mastic et ainsi empêcha le saignement de l'enrobé SMA. Les toutes premières spécifications pour l'enrobé SMA ne voient le jour qu'en 1984 avec la norme allemande ZTV-Asphalt 1984. Aujourd'hui la norme utilisée en Europe est la norme EN 13108-5, rédigée en décembre 2006, intitulée : Mélange bitumineux– Spécifications des matériaux – partie 5 : Stone Mastic Asphalt (Gourier, 2009).

Aux USA, les problèmes d'orniérage par fluage des chaussées bitumineuses dans les années 1980 amenèrent les américains à s'intéresser aux enrobés SMA. Fort de l'expérience allemande, les premiers projets à base d'enrobé SMA virent le jour en 1991 (Tremblay, 2001).

L'usage des enrobés SMA sur les routes au Canada date des années 1990. Les premières expérimentations in situ sont réalisées sur l'autoroute 401 et sur le boulevard Lakeshore à Toronto dans l'Ontario, et dans la même année sur l'autoroute 20 près de la ville de Québec. Le MTO estimait dès lors la durée de vie utile des enrobés SMA utilisés en couche de roulement de 5 à 8 ans supérieure à celle des enrobés conventionnels (Tremblay, 2001).

1.2.6.2 Principes des enrobés SMA

La principale caractéristique des enrobés SMA est le contact pierre sur pierre. Les enrobés SMA sont formulés selon la méthode développée par le NCAT. Selon Meunier (2005) la méthode de formulation selon le NCAT se résume en cinq points :

1) la sélection des matériaux ;
2) la sélection du fuseau granulaire optimum ;
3) la sélection de la teneur en liant optimale ;
4) l'évaluation de l'enrobé à la tenue à l'eau et au ressuage et
5) l'évaluation des propriétés de l'enrobé.

L'étape de sélection des matériaux permet de choisir les différents constituants du mélange bitumineux répondant aux critères spécifiques préétablis et aux critères de performances spécifiés dans les normes.

Le NCAT a établi des fuseaux granulaires suivant le GNM des granulats et a basé le choix du fuseau granulaire selon le type de chaussée à réaliser. La granulométrie optimale à retenir est celle qui assure au mélange un minimum de vides inter granulaire (VAM) tout en maximisant le contact pierre sur pierre (Meunier, 2005).

1.2.7 SMA – Cpack

Les SMA – Cpack sont une nouvelle génération de SMA formulé selon la méthode de formulation du laboratoire de chaussée du MTQ. La méthodologie de formulation développée pour les SMA – Cpack permet de concilier le contact pierre sur pierre et l'optimisation de l'aptitude au compactage à la PCG (Perraton, Meunier et Carter, 2007). Les enrobés SMA – Cpack ont été développés pour quatre classes de GMN : 5, 10, 14 et 20mm tel qu'illustré à la Figure 1.8.

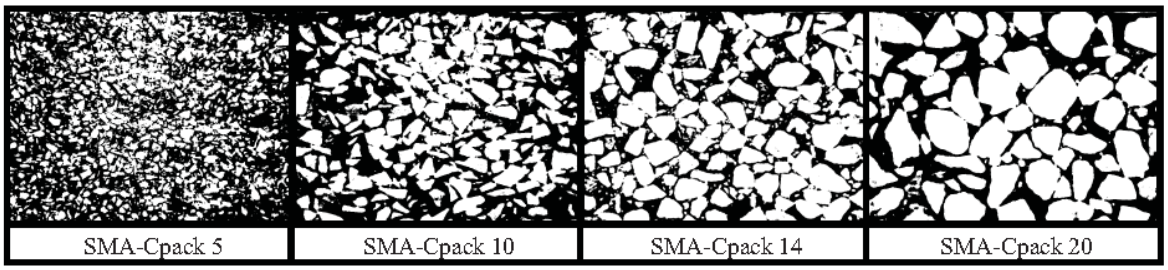


Figure 1.8 Illustration des classes de SMA-Cpack
Tirée de Perraton, Meunier et Carter (2007)

La méthodologie consiste à déterminer un combiné granulaire optimal par mesure de l'indice de vide plutôt que de fixer un fuseau granulaire tel que recommande la méthode du NCAT. En lieu et place d'une teneur en bitume fixée, on sélectionne un Vbe en fonction du GNM ciblé. Les proportions du mélange sont déterminées ensuite sur une base volumétrique et validées en laboratoire par la PCG. Le Vbe vise d'une part à assurer un enrobage minimum des granulats par le bitume et d'autre part garanti la durabilité a l'enrobé (Perraton, Meunier et Carter, 2007). Les enrobés SMA – Cpack sont formulés avec une teneur en bitume inférieure (réduction de 20 à 30%) à celle des enrobés spéciaux du MTQ et à celle des SMA formulés suivant la méthode du NCAT. Le tableau 1.1 présente les différentes teneurs en bitume des enrobés conventionnels.

Tableau 1.1 Teneur en bitume des enrobés conventionnels
Tiré de Perraton, Meunier et Carter (2007)

		Teneur en bitume (%)			
GNM (mm)		5	10	14	20
Enrobés spéciaux du MTQ		5,9 (EG-5)	5,4 (ESG-10)	5,0 (ESG-14)	4,5 (GB-20)
SMA	NCAT	≥ 6,1	≥ 6,1	≥ 6,1	≥ 6,1
	International	≥ 7,2	≥ 6,5	6,5 à 7,5	5,5 à 7,2

Les enrobés SMA – Cpack présentent de bonnes performances à la PCG et à la résistance à l'orniérage. Les tableaux 1.2 et 1.3 présentent un exemple des performances des enrobés SMA – Cpack, des SMA formulés selon la méthode du NCAT et des enrobés spéciaux du MTMDET.

Tableau 1.2 Valeurs du N_{design}
Adapté de Perraton, Meunier et Carter (2007)

		N_{Design}			
GNM (mm)		5	10	14	20
Enrobés spéciaux du MTQ		50	80	100	120
SMA	**NCAT (USA)**	70	70	70	70
	Cpack	25	30	60	25

Tableau 1.3 Performances à l'orniérage
Adapté de Perraton, Meunier et Carter (2007)

		Pourcentage d'orniérage (%)			
GNM (mm)		5	10	14	20
Exigences MTQ	Enrobés	EG-5	ESG-10	ESG-14	GB-20
	à 1000	≤ 10	≤ 10	n/a	n/a
	à 3000	≤ 20	≤ 20	n/a	n/a
	à 30000	n/a	n/a	≤ 10	≤ 10
SMA - Cpack	à 1000	3,7	2,9	4,2	3,0
	à 3000	6,0	4,7	4,6	3,8
	à 30000	9,0	6,7	5,9	5,5

1.2.8 La grave – bitume

La grave – bitume a été élaborée en France dans les années 1960 pour être utilisé en couche d'assise. Elle était considérée comme l'évolution des macadams dont le contact entre les grains grossiers était optimisé pour répartir et diffuser les charges (Di Benedetto et Corté, 2005). La grave – bitume est constituée par des granulats concassés et avec au départ, une faible teneur en bitume. Mais pour améliorer ces performances en fatigue, la teneur en bitume fut augmentée et différentes classes de performance ont été définies selon les applications. Par la suite, les méthodes d'empilement granulaire développées dans le domaine des bétons de ciment hautes performances, transposées et adaptées au domaine des bétons bitumineux ont permis le développement et la formulation des enrobés bitumineux à hautes performances GB5 pour couche d'assise ou liaison (Olard et al., 2010; Olard, 2012).

Au Québec, les graves – bitumes sont apparues dans les années 1970. Elles sont principalement utilisées en couche de base ou en plusieurs couches et en couche de liaison pour les chaussées à longue durée de vie (Diakité, 2014). Elles sont de dimension de grosseur nominale maximale de 20 à 28mm et d'une teneur en bitume faible (DLC, 2006). L'augmentation de la teneur en bitume a permis de réduire l'épaisseur de pose (Diakité, 2014).

1.2.9 Les Enrobés Bitumineux Hautes Performances (EBHP)

Les enrobés bitumineux hautes performances sont une famille d'enrobé conçue pour être plus résistant à l'orniérage, à la fatigue et aux effets des variations de température (Meunier, 2013). Ces enrobés sont formulés selon le principe d'une optimisation du contact pierre – sur – pierre. Les enrobés EBHP constituent la version améliorée des enrobés SMA – Cpack (Diakité, 2014). Les SMA – Cpack sont le fruit de la méthodologie de formulation développée par Perraton, Meunier et Carter (2007) qui consiste à combiner la méthode d'optimisation du squelette granulaire à la méthode LC de formulation des enrobés du MTQ.

Le principe de formulation des EBHP est de maximiser la proportion des gros granulats, d'introduire le maximum de granulats intermédiaire sans interférer sur l'agencement des gros granulats et combler les vides par les granulats fins plus le bitume (Meunier, 2013). La formulation des EBHP se déroule donc en trois phases : 1) la sélection du dosage en granulat gros et intermédiaire, 2) la sélection des dosages optimaux en granulat et 3) la détermination du dosage de bitume en fonction des vides. Quatre classes d'EBHP ont été développées suivant le GNM et sont présentées à la Figure 1.9. Les chiffres 5, 10, 14 et 20 de la Figure 1.9 représentent les limites supérieures des classes de gros granulat des différentes formules.

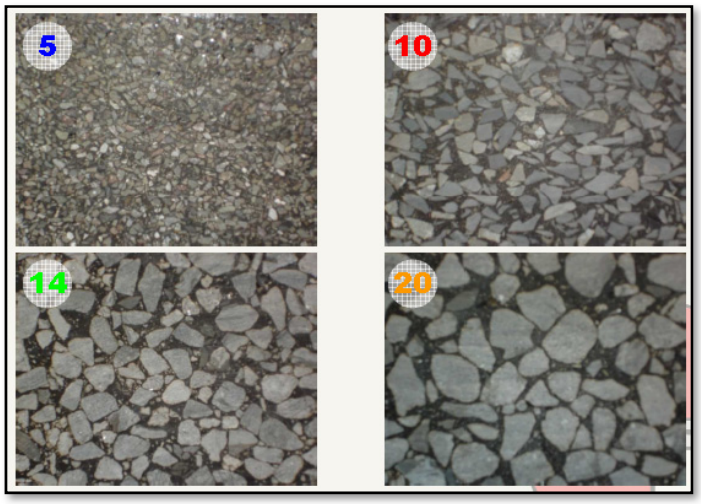


Figure 1.9 Illustration des classes d'EBHP
Tirée de Meunier (2013)

1.2.9.1 Sélection du dosage en granulat gros et intermédiaire

Cette sélection s'effectue sur la base de la teneur en vide à la PCG de chaque classe granulaire. En effet, une PCG est réalisée sur 100% de gros (G) granulat pour déterminer son indice de vide puis par la suite sur 100% de granulat intermédiaire (I) pour le même but que précédemment (Diakité, 2014; Meunier, 2013). Finalement, des PCG sont réalisées sur différentes combinaisons des deux classes granulaires pour obtenir le combiné optimal. Selon Meunier (2013), il faut combiner 40% de granulat intermédiaire et 60% de gros granulat pour obtenir le combiné optimal. Pour Diakité (2014), la validation du combiné optimal est liée à

la qualité du contact gros – sur – gros du combiné apprécié en comparant la porosité et la masse volumique maximale du combiné à celles du gros granulat seul.

1.2.9.2 Sélection des dosages optimaux en granulat

La sélection des dosages optimaux en granulat se fait dans le but d'éliminer toute interférence sur l'arrangement des gros granulats. Dans un premier temps, on détermine les quantités optimales suivant l'indice des vides sans interaction des gros (G) granulats et intermédiaire (I) qui permettent de définir les seuils inférieurs et supérieurs ($P_I^{G/I}$ et $P_S^{G/I}$) du combiné gros – intermédiaire.

Dans le second temps, le dosage optimal en fine (F) est déterminé suivant le même principe d'absence d'interférence. Puis les seuils $P_I^{(G/I)-F}$ et $P_S^{(G/I)-F}$ du combiné (G/I) – F sont établis. Toutefois, le dosage en granulat fin (F) est déterminé en considérant le volume de bitume effectif (V_{be}) et la teneur en vide qu'on désire avoir dans le mélange final (Diakité, 2014).

1.2.9.3 Détermination du volume de bitume en fonction des vides

La teneur en vide du mélange est fixée d'avance, il revient donc de choisir le teneur en bitume (V_{be}) de façon à éviter tout saignement dans le mélange. Perraton, Meunier et Carter (2007) proposent de fixer la teneur en V_{be} des enrobés SMA – Cpack en fonction du GNM et un Vbe de 9,9% a été retenu pour les SMA – Cpack 20. Ils proposent également de contrôler le rapport volumique entre les granulats fin (F) et le bitume à l'aide de ratio volumique dont la valeur est fixée à 1,0 (Vbe/Vf – 1,0) pour les SMA – Cpack de GNM > 5mm et un ratio de 1,2 (Vbe/Vf – 1,0) pour ceux de GNM < 5mm. La Figure 1.10 présente l'évolution du Vbe des enrobes SMA en fonction du GNM.

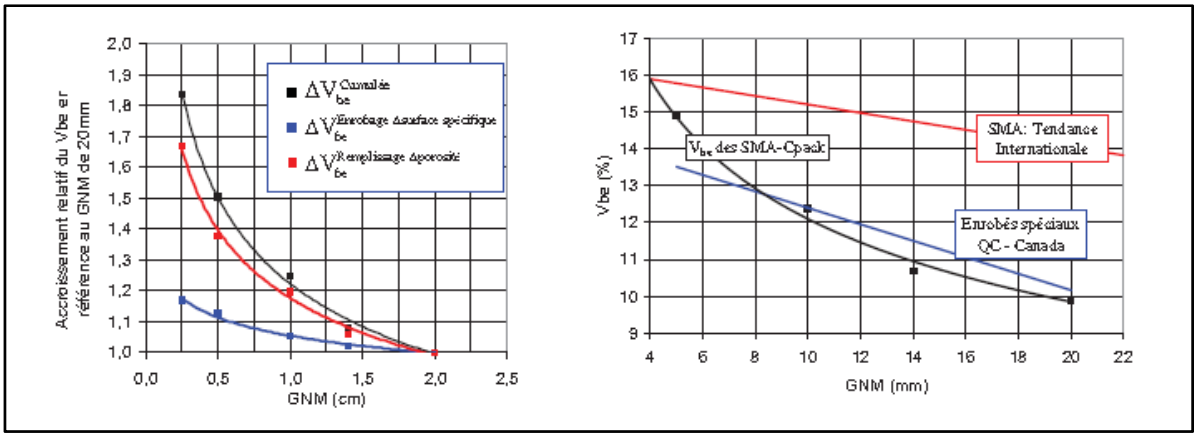


Figure 1.10 Évolution du Vbe des SMA en fonction du GNM
Tirée de Perraton, Meunier et Carter (2007)

Le Tableau 1.4 présente une formule de départ d'un EBHP 20 confectionné en laboratoire.

Tableau 1.4 Proportion de l'EBHP 20
Tiré de Diakité (2014)

Proportions massiques (%)	**EBHP – 20**		
	1ère étape	**2e étape**	**Formule de départ**
Combiné Gros/Intermédiaire			
Intermédiaire	14,10 %		
Gros	85,90 %		
Combiné (Gros/Intermédiaire)/Fin			
Fins (seuil maximal)		11,75 %	
Gros/Intermédiaire		88,25 %	
Mélange de départ			
Gros granulat			72,42 %
Granulat intermédiaire			11,90 %
Filler			11,23 %
Bitume (Vbe = 9,9 %)			4,45 %

1.2.9.4 Performances des EBHP

Les EBHP sont conçus pour être plus résistants à l'orniérage, avoir un bon comportement en fatigue et une bonne résistance à la fissuration à basse température. Selon Meunier (2013) les EBHP respectent ces exigences tant que la production est constante et de qualité.

La norme du module complexe de l'EBHP 20 testé en laboratoire à 10 ˚C et 10Hz est de 11 260 MPa pour un mélange produit avec un bitume PG 64 – 28. Cette valeur de module est légèrement supérieure aux 11 000 MPa que le MTMDET trouve pour l'enrobé GB 20 (Diakité, 2014). Une représentation du module complexe dans le plan Cole - Cole pour les EBHP 20_15% et EBHP 20_11% à est montrée à la Figure 1.11. Les 11% et 15% représentent la proportion de filler de chacun des mélanges.

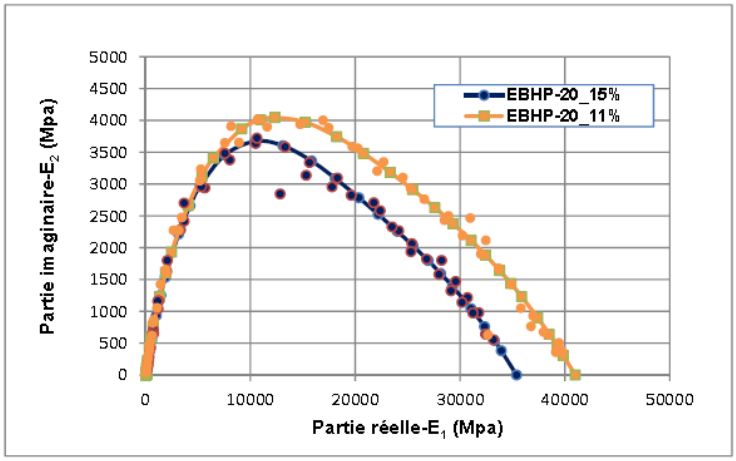


Figure 1.11 Représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole de l'EBHP 20
Tirée de Diakité (2014)

Pour un EBHP 14 (bitume PG 76 – 28 + SBS), la norme du module en laboratoire à 10 ˚C et 10 Hz est de 14 030 MPa (Caron, 2015). Le tableau 1.5 présente les résultats de module complexe de différents types d'EBHP 14 dont l'EBHP de référence incorporant du verre recyclé a le module le plus élevé.

Tableau 1.5 Exemple de norme de module complexe d'EBHP 14
Tiré de Caron (2015)

Enrobés	$\lvert E^* \rvert_{15°C,\ 10Hz}$ (MPa)	$\lvert E^* \rvert_{10°C,\ 10Hz}$ (MPa)
EBHP (Réf)	10 946	14 980
EBHP (FS10) (1)	8 331	11 849
EBHP (FS20) (1)	9 226	12 957
EBHP (FS30) (1)	10 335	14 322
EBHP (Inter-Carlc) (2)	10 542	14 657
EBHP (Fines-Carlc) (3)	9 215	13 175
EBHP (Chaux-H)	10 718	14 755
EBHP (PG88-28)	14 948	18 236
EBHP (PG76-28+SBS)	10 461	14 030

(1) FS10 = 10% de fumée de silice, etc.
(2) Usage de particules intermédiaires de calcaire
(3) Usage de particules fines de calcaire

L'EBHP-20 présente de bonnes performances à la résistance à l'orniérage et respecte les spécifications du MTMDET pour l'enrobé GB-20. En effet, l'EBHP ne fait pas parti des enrobés standards du MTMDET donc les critères pour les enrobés GB ont été retenus pour les EBHP. Selon le MTMDET, à 30 000 cycles le pourcentage d'ornière pour les enrobés GB-20 ne doit pas dépasser les 10%. La Figure 1.12 montre les résultats des essais d'orniérage réalisés sur les EBHP 20_11% et EBHP 20_15%.

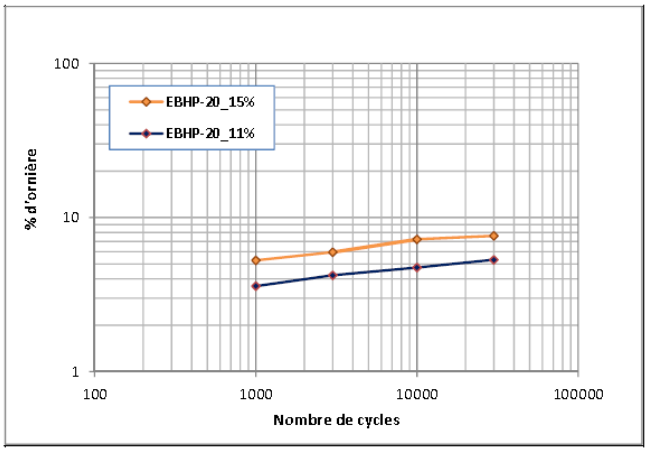


Figure 1.12 Évolution du pourcentage d'orniérage suivant
le nombre de cycle des EBHP-20
Tirée de Diakité (2014)

La durée de vie des EBHP varie suivant la teneur en bitume des mélanges. Pour les deux EBHP-20 testés par Diakité (2014), les valeurs de ε_6 sont de 103 µdéf pour l'EBHP-20_11% avec une teneur en bitume de 3,86% et 142 µdéf pour l'EBHP-20_15% avec une teneur de 3,93% de bitume. La Figure 1.13 montre les courbes de fatigue à 10 ˚C et 10 Hz de ces deux EBHP-20.

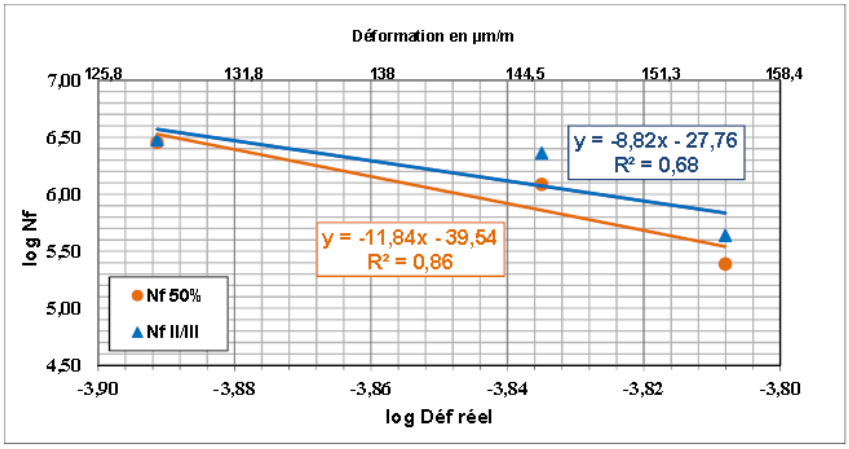


Figure 1.13 Courbes de fatigue des EBHP-20
Tirée de Diakité (2014)

L'amplitude de déformation de ε_6 pour l'EBHP-14 incorporant du verre recyclé avec ajout de la chaux hydratée est plus élevée que celui de l'EBHP-20. Le tableau 1.6 présente les performances de fatigue de l'EBHP-14 (Chaux-H).

Tableau 1.6 Résultats de fatigue de l'EBHP-14 (Chaux-H)
Tiré de Caron (2015)

Critères de rupture sans correction de température (T=11,1 ± 0,1°C)					
Méthode de calcul $N_{II/III}$	c_1 (1)	c_2 (1)	b (1)	ε_6 (1) (µm/mm)	R^2
Déformation du $N_{II/III}$ (φ max)	1,54E -41	12,49	-0,080	178,1	0,66
Déformation du $N_{II/III}$ (point d'inflexion)	2,49E -41	12,43	-0,080	178,0	0,65
Critères de rupture avec correction de température à 10 ° C (k_3 = 2,5)					
Méthode de calcul $N_{II/III}$	c_1 (1)	c_2 (1)	b (1)	ε_6 (1) (µm/mm)	R^2
Déformation du $N_{II/III}$ (φ max)	3,05E -41	12,43	-0,080	180,5	0,68
Déformation du $N_{II/III}$ (point d'inflexion)	4,93E -41	12,37	-0,081	180,5	0,66

(1) Coefficient de la loi de fatigue : voir ξ 1.5.3.6

Les résultats de l'essai de tenue à l'eau réalisé sur l'EBHP-20_11% (Diakité, 2014) montrent que l'EBHP conserve à 90% sa stabilité à la tenue à l'eau. Cela représente une bonne performance de durabilité.

1.3 Utilisation du verre recyclé dans les enrobés

L'utilisation du verre recyclé dans la chaussée et en particulier dans les enrobés bitumineux est une des meilleures solutions pour désengorger les sites d'enfouissement (Recyc-Québec, 2015). Selon Lu et al. (2011), l'incorporation du verre recyclé dans les mélanges bitumineux en tant qu'éléments agrégats est l'un des meilleurs moyens de recyclage qui créera de grands avantages environnementaux et économiques. Les différentes utilisations possibles du verre recyclé dans la construction routière sont présentées au tableau 1.7.

Tableau 1.7 Utilisation du verre recyclé dans la construction routière
Tiré de Lupien (2006)

Utilisations	Commentaires
Enrobés bitumineux (GlassPhalt)	Comme granulat dans l'enrobé dans une proportion maximale de 15 %. La partie très fine peut être utilisée comme filler. Plusieurs expériences ont été rapportées.
Dans le béton de ciment	Lorsque concassé très fin, voire en poudre, il développe des propriétés cimentaires. À cet égard, il pourrait être utilisé pour substituer une partie du ciment. Les études restent à être complétées. Il peut aussi être utilisé comme granulat dans le béton, mais dans une proportion très faible, car il y a diminution de résistance et des problèmes potentiels de réaction alcali-granulat.
Enrobage de tuyaux	Il peut être utilisé comme matériau d'enrobage (granulat) des conduites en raison de ses propriétés drainantes.
Comme granulat de chaussée	Peut être utilisé à 100 % dans l'infrastructure. Les propriétés physiques et mécaniques du verre concassé permettent d'envisager son utilisation dans la sous-fondation d'une chaussée. Peut-être mélangé dans une proportion de 15 à 20 % aux granulats des couches de pierre concassée de la structure de la chaussée.

Selon l'étude d'incorporation de verre recyclé dans l'enrobé ESG14 réalisée par Lachance Tremblay (2014), le dosage optimal pour avoir de bonnes performances à l'orniérage est de 10 %. À ce taux, l'utilisation du verre dans les enrobés diminue très peu les performances thermomécaniques des enrobés. De plus, l'incorporation du verre dans le mélange bitumineux permet de diminuer la teneur en bitume, augmente la maniabilité du mélange, ne modifie pas la macro texture et l'adhérence de l'enrobé (Lachance Tremblay, 2014). Le verre renforce la réflexion de la lumière du mélange bitumineux, ce qui peut permettre d'améliorer la visibilité la nuit lorsque l'enrobé est utilisé en couche de surface (Lu et al., 2011). Toutefois, les enrobés incorporant du verre recyclé ont comme problèmes :

- un manque d'adhésion entre le bitume et le verre ;
- une perte d'adhérence entre la surface de roulement et les pneus des véhicules ;
- des bris des particules de verre grossières donc augmentation du risque d'arrachement ;
- une augmentation de la sensibilité du mélange à l'eau.

1.4 Production et mise en œuvre des enrobés bitumineux à chaud

Les enrobés bitumineux servant de revêtement pour les chaussées sont fabriqués à chaud dans des centrales d'enrobage. Ils sont transportés par des camions bennes puis mise en œuvre à chaud sur les chantiers.

1.4.1 Fabrication des enrobés bitumineux en centrale d'enrobage

Une centrale d'enrobage est un ensemble d'organes aux fonctions bien précises dont le principal est le malaxeur où s'effectue le mélange des granulats presque parfaitement déshydratés dans le sécheur avec le bitume, les fines ou d'autres additifs (Faure et Noël, 1981). Il existe principalement deux types de centrale d'enrobage : les centrales continues et discontinues.

1.4.1.1 Fabrication des enrobés en centrale continue

Les centrales continues sont de deux types : à tambour sécheur et tambour sécheur malaxeur. Dans ces postes, le dosage des granulats, du bitume et le malaxage sont faits en continu. Les centrales continues peuvent être fixes ou mobiles avec un grand rendement. La centrale continue tambour sécheur ne produit qu'une formule unique. La centrale continue tambour sécheur malaxeur ou enrobeur (TSM ou TSE) produit quelques formules (Noël, 2013). Les figures 1.14 et 1.15 présentent les schémas de principe des centrales continues.

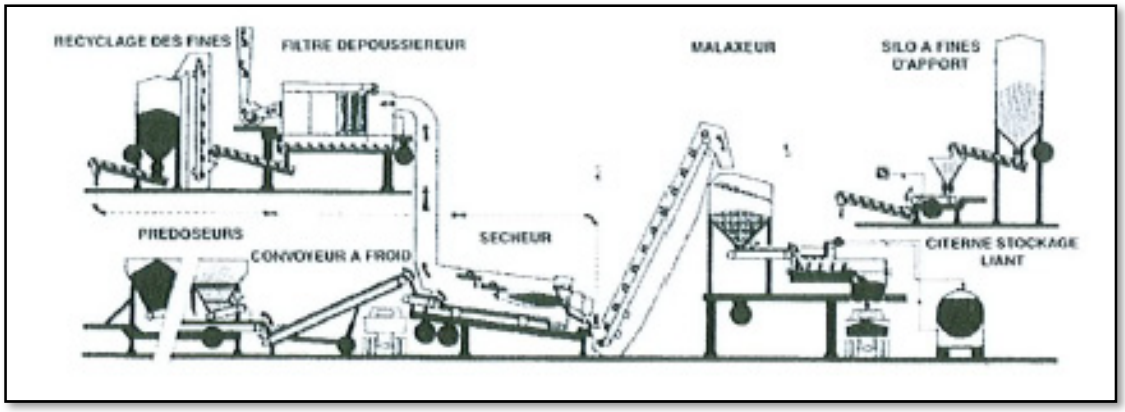


Figure 1.14 Schéma de principe d'une centrale continue à tambour sécheur (Faure et Noël, 1981)

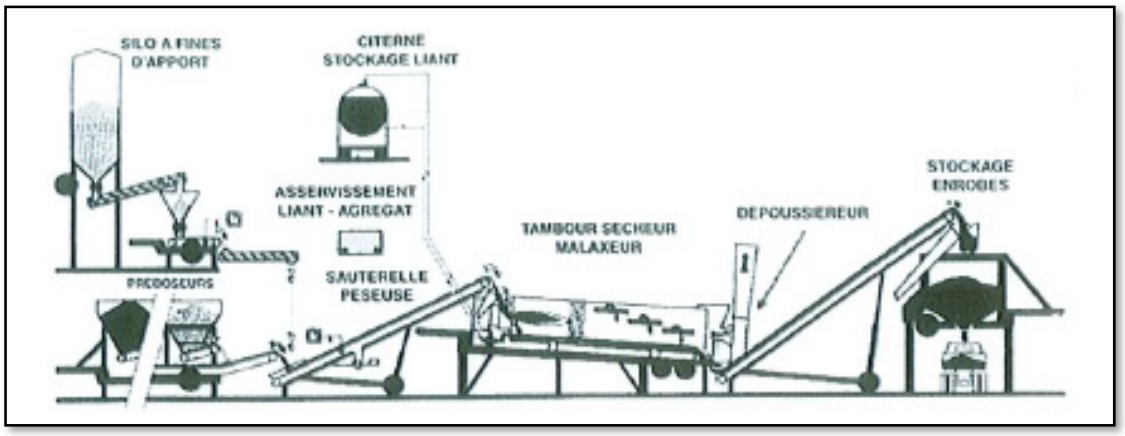


Figure 1.15 Schéma de principe d'une centrale continue TSM (Faure et Noël, 1981)

La centrale continue TSM ne dispose pas d'un organe de malaxage. Le malaxage est fait directement dans le tambour sécheur. Les organes communs aux centrales continues sont :

- Le chargeur qui assure l'alimentation en granulats ;
- Les doseurs ou pré-doseurs pour le calibrage et la pesée des granulats ;
- Le tube sécheur ;
- Le dépoussiéreur ;
- Le stockage du liant et
- Les silos à fine

1.4.1.2 Fabrication des enrobés en centrale discontinue

En centrale discontinue, les granulats chaud sont criblés et pesées séparément. Le malaxage se fait alors par gâchée et permet ainsi le changement de formule au cours de la production (Faure et Noël, 1981; Noël, 2013). La centrale discontinue est très automatisée et est utilisée en installation fixe. La Figure 1.16 présente le schéma de principe des centrales discontinues.

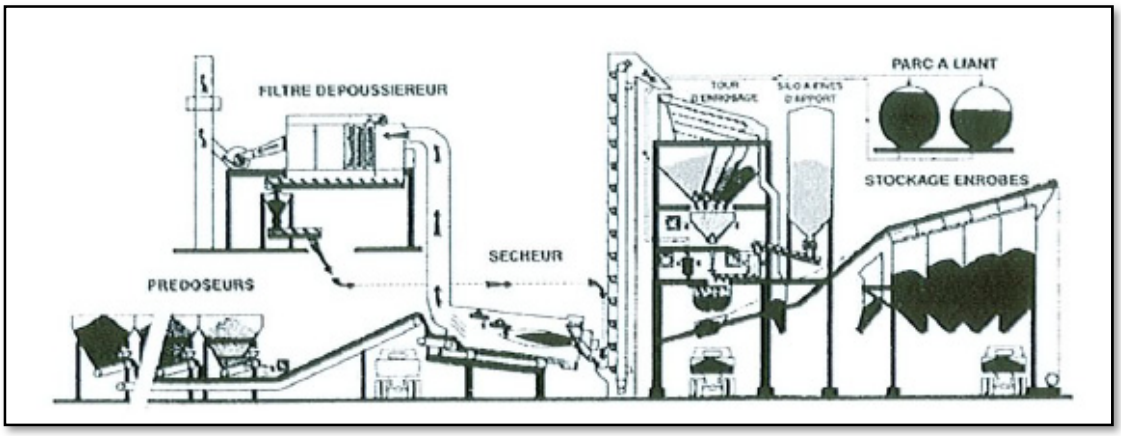


Figure 1.16 Schéma de principe d'une centrale discontinue (Faure et Noël, 1981)

1.4.1.3 Chargement des camions

Les centrales peuvent être à terre, avec un skip conjugué avec un cycle de fermeture du malaxeur pour évacuer les enrobés dans une trémie, ou surélevées pour des chargements direct dans les camions. Dans les différents types de centrales, le chargement des camions nécessite des précautions pour éviter la ségrégation. Ainsi, l'ouverture des trémies du malaxeur se fait automatiquement suivant un cycle pré affiché (Faure et Noël, 1981). Les enrobés sont régulièrement répartis par amas dans la benne du camion. Un chargement en plusieurs amas est recommandé (Bitume Québec, 2008). Des trémies de stockage sont prévues pour le cas des grands chantiers à longue durée.

1.4.2 Mise en œuvre des enrobés bitumineux à chaud

Les enrobés bitumineux sont mis en œuvre après la mise en place de la couche d'accrochage. La couche d'accrochage, réalisée soit avec de l'émulsion de bitume ou soit avec du bitume pur, sert de colle entre la fondation en matériau granulaire et la nouvelle couche d'enrobé à mettre en œuvre. L'enrobé est rependu par la suite à chaud à l'aide du finisseur.

1.4.2.1 Déchargement des camions

Le déchargement des camions dans le finisseur se fait en respectant les étapes de la Figure 1.17.

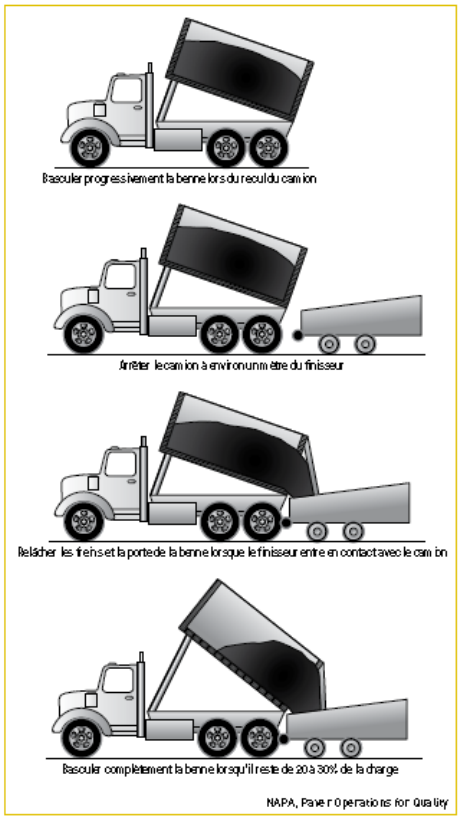


Figure 1.17 Méthode de déchargement d'un camion dans le finisseur
Tirée de Bitume Québec (2008)

Pour assurer une meilleure mise en place de l'enrobé pour certains chantiers, le véhicule de transfère des matériaux (VTM) est utilisé pour alimenter le finisseur. Les avantages de l'utilisation d'un véhicule de transfert sont les suivants (Bitume Québec, 2008) :

- malaxage du mélange d'enrobés avant l'épandage, minimisant ainsi la ségrégation physique et thermique ;
- réduction du nombre d'arrêts et de départs ;
- uniformisation de température de la couche épandue favorisant ainsi un compactage uniforme ;
- obtention d'un meilleur uni.

1.4.2.2 Compactage des enrobés bitumineux à chaud

Le compactage des enrobés est assuré par un équipement composé de compacteurs à pneus, des cylindres lisses vibrants et des cylindres lisses. Les buts visés par le compactage d'un enrobé sont (MTQ, 2009) :

- de densifier le matériau au pourcentage de vides optimal afin d'obtenir l'ensemble des propriétés mécaniques désirées du mélange bitumineux et d'assurer la durabilité du revêtement ;
- de sceller la surface en la rendant uniforme afin d'assurer un bon uni avec des caractéristiques d'adhérence compatible avec la sécurité des usagers de la route.

Pour réaliser un compactage adéquat, il faut respecter les temps limites recommandés par le MTMDET qui figure au Tableau 1.8.

Tableau 1.8 Temps limites de compactage d'un enrobé

Tiré de MTQ (2009)

Épaisseurs		Temps de compactage (minutes)																	
sur enrobé	sur fondation *	Condition A: Ciel dégagé et temps sec avec des vents de 0 à 10km/h																	
		T° = 5°C			T° = 10°C			T° = 15°C			T° = 20°C			T° = 25°C			T° = 30°C		
		GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1
20		5	6	7	5	6	7	6	7	8	6	7	9	7	8	10	8	9	12
25		7	8	10	8	9	11	8	10	12	9	11	13	10	12	15	11	14	17
30		10	11	13	10	12	14	11	13	16	12	15	18	13	16	20	15	18	23
35		12	14	17	13	16	19	14	17	21	16	19	23	17	21	26	19	24	30
40		15	18	21	17	20	23	18	21	26	20	24	29	22	27	33	24	30	38
45		19	22	26	20	24	29	22	26	32	24	29	35	26	32	40	29	37	47
50		22	26	31	24	29	34	26	31	38	29	35	42	32	39	48	35	44	56
55	50	26	31	36	28	33	40	31	37	44	33	41	50	37	45	56	41	52	66
60	55	30	36	42	32	39	46	35	42	51	39	47	57	43	52	65	48	60	76
65	60	34	41	48	37	44	53	40	48	58	44	54	66	49	60	75	55	68	87
70	65	39	46	55	42	50	60	46	55	67	50	61	75	56	68	85	62	78	100
75	70	44	52	61	47	56	67	51	62	75	56	68	84	62	77	96	70	88	112
80	75	49	58	69	53	63	75	58	69	84	63	77	94	70	86	106	78	98	126
85	80	54	64	76	58	70	83	64	76	92	70	85	104	77	95	119	87	109	139
90	85	60	70	84	64	77	92	70	84	102	77	93	115	85	105	131	96	120	154
95	90	65	77	91	70	84	100	77	92	111	84	102	125	93	115	144	104	131	168
100	95	71	84	100	77	91	110	84	100	122	92	111	137	102	125	157	114	143	183
105	100	77	91	108	83	99	119	91	109	132	99	121	148	110	136	169	124	155	198

Épaisseurs		Temps de compactage (minutes)																	
sur enrobé	sur fondation *	Condition B: Ciel partiellement ennuagé (50%) avec des vents de 10 à 20km/h																	
		T° = 5°C			T° = 10°C			T° = 15°C			T° = 20°C			T° = 25°C			T° = 30°C		
		GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1
20		4	5	6	5	6	6	5	6	7	6	6	8	6	7	8	7	8	9
25		6	7	8	7	8	9	7	9	10	8	9	11	8	10	12	9	11	13
30		8	10	11	9	10	12	10	11	13	10	12	14	11	13	16	12	15	18
35		10	12	14	11	13	15	12	14	17	13	15	18	14	17	20	16	19	23
40		13	15	17	14	16	19	15	17	20	16	19	22	17	21	25	19	23	28
45		16	18	21	17	19	23	18	21	25	19	23	27	21	25	30	23	28	33
50		18	21	25	20	23	27	21	25	29	23	27	32	25	29	35	27	32	39
55	50	21	25	29	23	26	31	24	29	34	26	31	37	29	34	41	31	38	45
60	55	24	28	33	26	30	35	28	33	38	30	36	42	33	39	46	36	43	52
65	60	28	32	37	29	34	40	32	37	43	34	40	47	37	44	52	41	49	58
70	65	31	36	42	33	39	45	36	42	49	39	45	54	42	50	59	46	55	65
75	70	35	40	46	37	43	50	40	46	54	43	50	59	47	55	66	51	61	73
80	75	38	45	52	41	48	56	44	52	60	48	56	66	52	61	73	56	67	81
85	80	42	49	57	45	52	61	48	57	66	52	61	72	57	67	80	62	74	89
90	85	46	54	62	49	57	67	53	62	72	57	67	79	62	73	87	68	81	97
95	90	50	58	67	54	62	73	58	67	79	62	73	86	67	80	95	74	88	105
100	95	55	63	73	58	68	79	63	73	85	67	79	93	73	86	102	80	95	114
105	100	59	68	79	63	73	85	67	79	92	73	85	100	79	93	110	86	102	123

Épaisseurs		Temps de compactage (minutes)																	
sur enrobé	sur fondation *	Condition C: Ciel totalement ennuagé (100%) avec des vents de 20 à 30km/h																	
		T° = 5°C			T° = 10°C			T° = 15°C			T° = 20°C			T° = 25°C			T° = 30°C		
		GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1	GB3	GB2	GB1
20		4	5	5	4	5	6	5	5	6	5	6	7	5	6	7	6	7	8
25		6	7	8	6	7	8	6	8	9	7	8	9	8	9	10	8	10	11
30		7	9	10	8	9	11	8	10	11	9	11	12	10	12	14	11	13	15
35		9	11	12	10	12	13	11	12	14	11	13	16	12	15	17	13	16	19
40		11	13	15	12	14	16	13	15	18	14	16	19	15	18	21	16	19	23
45		14	16	18	15	17	19	16	18	21	17	19	23	18	21	25	20	23	27
50		16	18	21	17	20	23	18	21	24	20	23	27	21	25	29	23	27	32
55	50	19	21	24	20	23	26	21	24	28	23	26	31	24	28	33	26	31	37
60	55	21	24	28	22	26	30	24	28	32	26	30	35	28	32	38	30	35	41
65	60	24	27	31	25	29	34	27	31	36	29	34	39	31	36	42	34	40	47
70	65	27	31	35	28	33	38	30	35	41	32	38	44	35	41	48	38	44	52
75	70	30	34	39	32	36	42	34	39	45	36	42	48	39	45	53	42	49	58
80	75	33	38	43	35	40	46	37	43	50	40	46	54	43	50	58	46	54	64
85	80	36	41	47	38	44	50	41	47	54	44	51	59	47	55	64	51	59	70
90	85	39	45	52	42	48	55	45	51	59	48,6	55	64	51	60	69	55	65	76
95	90	43	49	56	45	52	60	48	56	64	52	60	69	55	64	75	60	70	82
100	95	46	53	60	49	56	65	52	60	69	56	65	75	60	70	81	65	76	89
105	100	50	57	65	53	61	69	56	65	74	60	69	80	64	75	87	70	81	95

1.5 Caractéristiques volumétriques des enrobés bitumineux

1.5.1 Détermination de la densité maximale des enrobés bitumineux

La densité maximale est un paramètre très important pour les enrobés bitumineux. Elle intervient dans le calcul des vides, du compactage, de l'absorption de bitume et de la masse requise pour différents essais (presse à cisaillement giratoire (PCG), compacteur de plaques). Selon le MTMDET, la densité maximale est le rapport de la masse de l'échantillon d'enrobé non compacté, à 25 °C, sur la masse d'eau déplacée par le volume de l'échantillon désaéré à la même température. Elle est mesurée selon la méthode d'essai LC 26 – 045 :« Détermination de la densité maximale » du MTMDET.

1.5.2 Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire des enrobés bitumineux

L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) permet de déterminer la maniabilité d'un mélange bitumineux à chaud en confectionnant une éprouvette à l'aide d'une presse faisant pivoter un cylindre de moulage d'un angle d'inclinaison externe de 1,25 degré avec une vitesse de giration de 30 tours par minute, sous une pression de 600 kPa. Il se produit un mouvement de pétrissage du matériau similaire à celui obtenu sur chantier avec les engins de compactage. Selon Di Benedetto et Corté (2005), ce mode de sollicitation provoque des cisaillements au sein de l'enrobé qui favorisent le réarrangement granulaire.

La PCG permet de suivre l'évolution du volume des vides dans l'enrobé et l'aptitude au compactage est déterminé à travers les nombres de girations nécessaires pour atteindre les teneurs en vides dans l'enrobé spécifiées par les normes du MTMDET. Les exigences du MTMDET pour les enrobés conventionnels figurent au tableau 1.9.

Tableau 1.9 Exigences à la PCG du MTQ

Critères (nombre de giration)	**Exigences (% de vide)**
10	≥ 11,0
N_{design} (80 à 120)	4,0 à 7,0
200	≥ 2,0

La valeur du N_{design} varie en fonction du type d'enrobé. Elle est par exemple de 100 girations pour les enrobés de type ESG-14. Selon les travaux de Tremblay (2001), un nombre de 60 girations avait été retenu pour le N_{design} des enrobés de type SMA. Cet enrobé de par son squelette spécifique requiert une valeur de N_{design} plus faible.

1.5.3 Détermination de la teneur en bitume au four à ignition

La méthode de calcination au four à ignition permet de déterminer la teneur en liant d'un enrobé dans une fournaise à convection ou à infrarouge. Selon le MTMDET, cette méthode d'essai s'applique aux enrobés fabriqués en usine ou en laboratoire, mais ne s'applique pas aux enrobés additionnés de fibres ajoutées lors du malaxage. Cette méthode d'essai a été élaborée par le MTMDET pour remplacer l'essai de teneur en bitume nécessitant au préalable l'extraction du bitume (Labrie, 2000). Selon Piérard (2011), la méthode de calcination est une alternative appropriée à la méthode d'extraction pour de la détermination de la teneur en bitume des enrobés à base de PmB ou non modifié. Cependant, cette méthode exige la détermination préalable de facteurs de correction, ce qui limite son utilisation aux laboratoires et centrales d'enrobage qui la maîtrise.

La méthode d'essai consiste à chauffer un échantillon d'enrobé bitumineux à une très haute température (540 ˚C par exemple) afin de brûler le bitume. Le bitume est brûlé et une légère partie des granulats est emportée par la ventilation. La teneur en bitume est donc obtenue en

calculant un différentiel de masse avant et après ignition au four. Un facteur de correction est pris en compte par la suite pour tenir compte de la partie de granulats brûlés.

1.5.4 Détermination de la teneur en bitume par la méthode d'extraction

L'extraction est une méthode qui permet de déterminer la teneur en liant d'un mélange bitumineux. Cette méthode nécessite l'utilisation d'un solvant qui permet d'extraire et de récupérer le bitume par évaporation du solvant à l'aide d'un évaporateur rotatif. La méthode d'extraction est surtout utilisée lorsqu'on désire caractériser, après l'extraction, le bitume récupéré (Piérard, 2011).

Au Québec, la détermination de la teneur en liant des mélanges hydrocarbonés par extraction est effectuée suivant la méthode d'essai LC 26 – 100 du laboratoire des chaussées du ministère des transports. Cette norme préconise l'utilisation du trichloroéthylène ou du 1,1,1-trichloroétane comme solvant d'extraction.

En Europe, l'extraction est réalisée selon les normes européennes NBN EN 12697 – 1 Annexe B.2 et NBN EN 12697 – 3. Ces normes décrivent spécifiquement les modes opératoires des mélanges bitumineux non modifiés. Les études réalisées par le centre de recherche routier (CRR) sur l'utilisation des méthodes standard d'extraction pour les enrobés bitumineux à base de bitume modifié au polymère (PmB) ont montré que les méthodes standards d'extraction pouvaient être utilisées pour les enrobés à bas de PmB. Cependant, ces études révèlent la nécessite d'une prise en compte des caractéristiques du polymère dans le choix du solvant d'extraction. Selon Piérard, Vansteenkiste et Vanelstraete (2010), les solvants recommandés en fonction du type polymère ayant servi à modifier le bitume sont :

- le toluène et le dichlorométhane pour les mélanges bitumineux à base de PmB – SBS, avec une préférence pour le toluène ;
- toluène et le trichloroéthylène pour les mélanges bitumineux à base de PmB – EVA.

Pour les différents auteurs, la teneur en liant déterminée par extraction reste inférieure à la teneur initiale utilisée pour fabriquer le mélange, que ce soit pour les mélanges à base de bitume modifié ou non. Dans l'ensemble, les valeurs après extraction restent de 3% à 9% en dessous de la valeur réelle initiale (Piérard, 2011). Dans le cas des enrobés à base de PmB, on note la présence de fillers dans le bitume extrait. Le laboratoire des chaussées (LC) prévoit la détermination d'un facteur de correction selon la méthode d'essai LC 26–150 « Détermination du facteur de correction à utiliser pour le calcul de la teneur en bitume », et recommande dans le cas des bitumes modifiés au polymère, la réalisation de l'essai à une température comprise entre 60 et 70 °C et une augmentation du temps de trempage initial.

1.6 Caractéristiques thermomécaniques

1.6.1 Résistance à l'orniérage

L'ornière dans les chaussées est le résultat du passage répété des véhicules sur la chaussée. Il peut être défini comme le phénomène de déformation permanente du profil transversal de la chaussée. L'orniérage peut atteindre des profondeurs jugées critiques et représente un problème majeur pour les chaussées bitumineuses (Ali, Sadek et Shahrour, 2008). Sur les chaussées, on observe deux types d'orniérages, celui à petit rayon et l'orniérage à grand rayon. Le premier cas se produit dans les enrobés bitumineux. L'orniérage à grand rayon provient du tassement des couches de structure non liées (Bérubé et Paradis, 1997; Di Benedetto et Corté, 2005). Selon Ali, Sadek et Shahrour (2008), les ornières ont pour origine, l'usure du revêtement bitumineux, une perte de capacité structurelle de la chaussée sous chargement répété du trafic et le fluage latéral des matériaux dans la couche de surface en enrobé bitumineux. Selon ces auteurs, les facteurs influençant le développement de l'orniérage sont les propriétés mécaniques des matériaux de la chaussée, les conditions d'exploitation et les facteurs environnementaux.

1.6.1.1 Ornières dans le revêtement bitumineux

L'orniérage des enrobés bitumineux est causé par l'application de charges répétées du trafic et à une résistance au cisaillement insuffisante de l'enrobé (Barco, 2007). Les facteurs qui influencent l'apparition de l'orniérage des enrobés sont la composition du mélange, la compacité et les sollicitations liées au trafic. Selon Lamothe (2003), l'orniérage des enrobés bitumineux existe en trois catégories : les ornières de consolidation, les ornières de déformation plastique et les ornières d'usure.

L'orniérage de consolidation se produit lorsque la teneur en vide dans l'enrobé en place est supérieure à 4%. La densification de l'enrobé se poursuit jusqu'à ce qu'une teneur environ 2% de vide soit atteinte (Lamothe, 2003).

L'orniérage de déformation plastique est lié à la composition de l'enrobé. L'origine des ornières des enrobés est souvent attribuée au liant bitumineux (Nguyen, 2006), donc de sa déformation par fluage sous l'effet du couplage température – sollicitation. Toutefois, le squelette granulaire peut aussi se déformer plastiquement par translation ou rotation favorisée par le fait que le liant se fluidifie sous l'effet de la température (Nguyen, 2006). Selon Barco (2007), un mélange granulaire avec un VAM faible est plus résistant aux déformations permanentes. Le MTMDET a déterminé une zone de restriction au tour de la courbe de masse volumique maximale pour la granulométrie des enrobés. Cette zone (Figure 1.18) indique une teneur élevée en fine du squelette granulaire ce qui conduit à un risque d'orniérage du mélange.

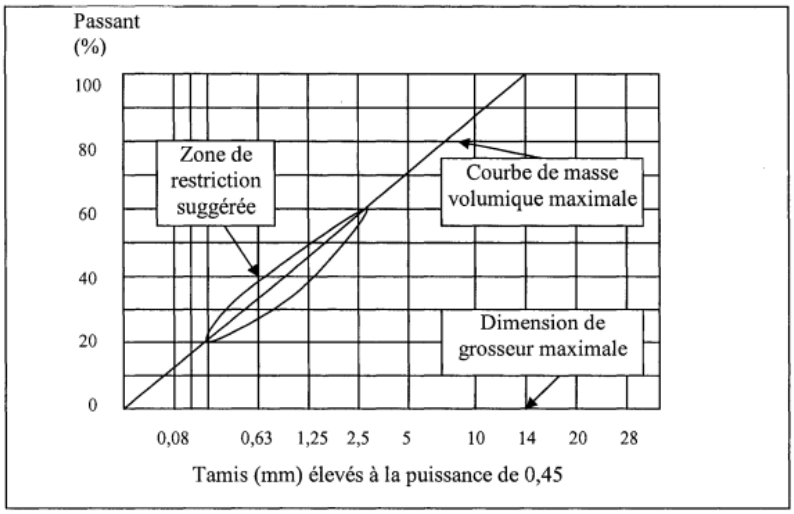


Figure 1.18 Zone de restriction du MTQ
Tirée de Barco (2007)

L'ornière d'usure provient du polissage, de l'arrachement ou désenrobage des granulats. On le rencontre sur les routes à haute vitesse de circulation (Lamothe, 2003). L'orniérage d'usure par polissage se rencontre dans les pays nordiques et est lié à l'usage des pneus minus de crampons. L'usure due à l'arrachement peut être causé par la détérioration du granulat, par un manque de bitume dans le mélange ou un sous-compactage de l'enrobé (Lamothe, 2003).

1.6.1.2 Paramètres influençant la résistance à l'orniérage des enrobés bitumineux

Les principaux facteurs à l'origine des déformations permanentes des enrobés bitumineux peuvent être classés en deux catégories : les paramètres de formulation et les paramètres liés aux sollicitations.

Les paramètres de formulation influençant la résistance à l'orniérage des enrobés sont la nature du bitume, la teneur en bitume, la fraction de sable, la forme géométrique et la texture des granulats, les fillers et la compacité du mélange (Nguyen, 2006). Parmi les paramètres de sollicitation, on peut citer la température et les charges du trafic. L'influence de la température sur la résistance à la déformation permanente est liée à la susceptibilité

thermique que confère le bitume à l'enrobé. Les charges du trafic se caractérisent par l'amplitude de chargement, la vitesse du trafic et son intensité.

Plusieurs auteurs s'accordent sur le fait que le type de liant utilisé pour former l'enrobé influence de beaucoup sa résistance à l'orniérage. Selon Meunier (2012), les liants non modifiés plus rigides (bitumes durs) permettent d'atténuer l'orniérage des enrobés, mais ces bitumes perdent de la flexibilité à basse température et peuvent donc entrainer un risque de fissuration thermique plus élevé. D'autre part, la teneur en liant aussi influence les performances à l'orniérage des enrobés. Une teneur en excès du liant dans le mélange joue sur les contacts entre les granulats. La qualité de contact entre les granulats n'est plus de mise, seules la cohésion et l'adhésivité du liant assurent de fait la résistance à l'orniérage du mélange (Sohm, 2011).

Le filler est un des paramètres très important dans les performances des enrobés aux déformations permanentes. Le filler absorbe une partie du liant pour former le mastic qui remplit les vides entre le granulat et sa présence augmente le temps de relaxation du bitume et le rigidifie (Nguyen, 2006; Sohm, 2011).

1.6.1.3 Ornières dans la fondation

L'orniérage dans la fondation est le principal mode de dégradation des chaussées à assises non traitées (Absamad, 2006). Selon Lamothe (2003) cinq principales causes peuvent être à l'origine des ornières dans la fondation de la chaussée :

- mauvaise estimation des épaisseurs de structures nécessaires pour supporter le trafic ;
- sous compactage des couches de sous-fondation et fondation ;
- mauvais drainage de la fondation ;
- sous-dimensionnement vis-à-vis des actions du gel et dégel ou ;
- tassement du sol support.

Ces causes peuvent individuellement ou se combiner entre elles pour engendrer de l'orniérage dans la structure de la chaussée et qui se manifeste à la surface sous forme d'ornière à grand rayon.

1.6.1.4 Types d'essai

Plusieurs essais permettent de caractériser la déformation permanente des enrobés bitumineux. Ces différents essais sont : l'essai de compression Marshall, les essais de compression diamétrale sous chargement répété, l'essai de fluage, les essais à chargements répétés, l'essai de cisaillement répété à hauteur d'éprouvette constante RSCH (Repeated Shear at Constant Height), l'orniéreur PURWheel (Purdue Wheel PURWheel Testing Deviee), l'orniéreur Hamburg (Hamburg Wheel Tracking Deviee), l'orniéreur APA (Asphalt Pavement Analyzer), le manège de fatigue LCPC et le simulateur de trafic LCPC ou orniéreur (Barco, 2007).

L'orniéreur LCPC sera utilisé dans cette recherche pour évaluer la résistance à l'orniérage des enrobés. Pour ce simulateur de trafic, il est exigé que l'échantillon d'essai soit compacté au compacteur LCPC. Au Québec, le compactage des plaques pour l'orniérage au compacteur LCPC est réalisé suivant la méthode d'essai LC 26 – 400 : «Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC».

1.6.2 Détermination du module complexe des enrobés bitumineux

Le module complexe (E*) est l'expression de la rigidité d'un matériau bitumineux sous chargement cyclique (Doucet et Auger, 2010). Il est caractérisé par sa norme, le module de rigidité du matériau et l'angle de phase. Le module de rigidité est un indicateur du degré de cohésion au sein de la structure d'un matériau. Pour un enrobé bitumineux, le degré de cohésion varie en fonction de la température et de la fréquence de chargement (Carter et Perraton, 2002). Selon Di Benedetto et Corté (2005), le module complexe peut être défini comme étant le rapport entre l'amplitude complexe d'une contrainte sinusoïdale de pulsation ω ($\sigma(t) = \sigma 0 \cdot \sin(\omega t)$), et l'amplitude complexe de la déformation sinusoïdale qui en résulte

($\varepsilon(t) = \varepsilon 0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$) en régime établi. C'est le nombre complexe mesuré à l'aide d'un essai qui soumet le matériau, dans le domaine des petites déformations, à des sollicitations sinusoïdales de fréquences variées pour une température donnée et à différente température. Les matériaux bitumineux ayant un comportement viscoélastique, la réponse du matériau sous sollicitation est caractérisée par un angle de phase (φ) qui varie entre 0° pour un matériau purement élastique et 90° pour un matériau purement visqueux (Carter et Perraton, 2002).

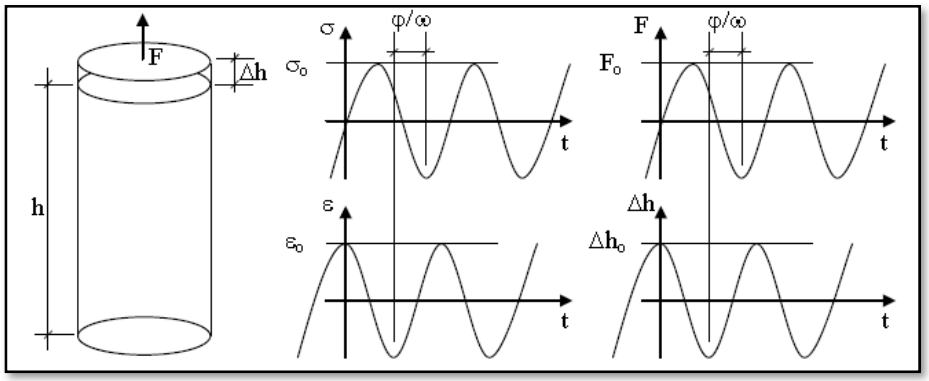


Figure 1.19 Définition du module complexe
Tirée de Carter et Perraton (2002)

Le module complexe est défini par (Di Benedetto et Corté, 2005):

$$E^*(t) = \frac{\sigma*(t)}{\varepsilon*(t)} \tag{1.5}$$

$$\text{Soit : } E^*(\omega) = \frac{\sigma_0 \ e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 \ e^{i(\omega t - \varphi)}} = |E^*| \ e^{i\varphi} \tag{1.6}$$

Où

E* module complexe ;

|E*| norme du module complexe ;

σ_0 amplitude de contrainte ;

ε_0 amplitude de déformation ;

ω pulsation ($2\pi f$) (rad/s) ;

φ angle de phase ($\varphi = \omega * t$) ;

i partie imaginaire d'un nombre complexe ($i^2 = -1$) ;

t temps de déphasage entre $\sigma 0$ et $\varepsilon 0$.

Le module complexe se note également par : $E^* = E_1 + i\ E_2$, E_1 étant la partie réelle est appelé module d'élasticité dynamique et E_2 représente la partie imaginaire est appelé module de perte (Di Benedetto et Corté, 2005).

1.6.2.1 Types d'essais pour la mesure du module complexe

Plusieurs essais permettent de déterminer le module complexe des matériaux bitumineux. Selon Di Benedetto et Corté (2005), on peut distinguer deux catégories d'essai : les essais homogènes et les essais non homogènes.

Dans un essai en condition homogène, l'état de contrainte et de déformation est le même en chaque point de l'éprouvette testé. Les essais homogènes permettent d'avoir accès directement aux contraintes et déformations, donc à la loi de comportement des matériaux et aux limites du domaine linéaire (Baaj, 2002; Di Benedetto et Corté, 2005). Quant aux essais non homogènes, ils ne permettent pas d'obtenir directement les propriétés rhéologiques du matériau, mais nécessitent l'utilisation de lois de similitude (Carter et Perraton, 2002). Les figures 1.20 et 1.21 présentent les différents essais permettant de mesurer le module complexe d'un matériau.

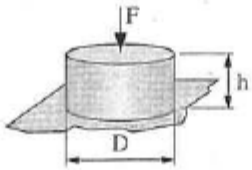
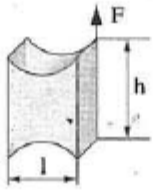
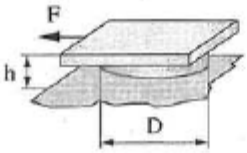
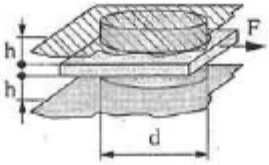
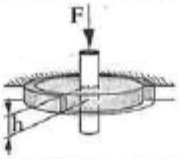
	Schéma de principe	Facteur de forme[2] γ	Références
Traction compression (avec ou sans confinement)		$\frac{4h}{\pi D^2}$	[CHA 91, DOU 95]
Essai de scission LCPC		$\frac{l}{hc}$	[ASS 81, ROC 96]
Essai de cisaillement à hauteur constante		$\frac{4h}{\pi D^2}$	[KEN 94]
Shearing test machine		$\frac{4h}{\pi D^2}$	[LEM 92]
Co-axial shear test[3]		$\frac{\ln\left(\frac{d}{D}\right)}{2\pi h}$	[GUB 90]

Figure 1.20 Récapitulatif des essais homogènes de module complexe des enrobés
Tirée de Di Benedetto et Corté (2005)

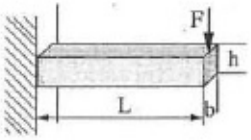
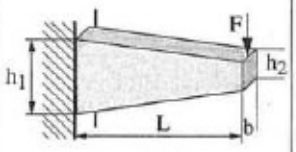
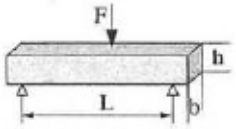
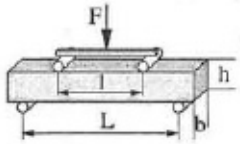
	Schéma de principe	Facteur de forme γ	Facteur de masse[4]	Références
Flexion 2 points		$\frac{4L^3}{bh^3}$	$\frac{M}{4} + m$	[FRA 94]
		$\frac{12\,L^3}{b\,(h_1-h_2)^3} \times \left[\left(2-\frac{h_2}{2h_1}\right)\cdot\frac{h_2}{h_1}-\frac{3}{2}-\ln\frac{h_2}{h_1}\right]$	0,135 M + m	[CHA 90, HUE 63]
Flexion 3 points		$\frac{24L^3}{\pi^4 bh^3}$	0,5 M + m	[MYR 92]
Flexion 4 points		$\frac{2L^3-3Ll^2+l^3}{8bh^3}$	0,5M + m	[PRO 96]

Figure 1.21 Récapitulatif des essais non homogènes de module complexe des enrobés
Tirée de Di Benedetto et Corté (2005)

Un autre type d'essai retrouvé dans la littérature et qui est souvent utilisé en laboratoire pour déterminer le module de rigidité des enrobés bitumineux est l'essai de traction indirecte. Selon la norme NF EN 12697 – 26 «Mélanges bitumineux : Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud», il existe deux options pour les essais de traction indirecte :

- essai de traction indirecte sur des éprouvettes cylindriques (Annexe C) ;
- essai de traction indirecte cyclique sur des éprouvettes cylindriques (Annexe F).

  Les deux options ont été utilisées dans le cadre de ce projet pour déterminer le module de rigidité des éprouvettes prélevées sur chantier.

1.6.2.2 Modélisation du module complexe d'un enrobé bitumineux

Le comportement des matériaux bitumineux dans le domaine viscoélastique linéaire (VEL) est modélisable à l'aide d'assemblage discret de ressorts et d'amortisseurs. Ainsi, il existe plusieurs modèles rhéologiques analogues, trouvés dans la littérature, qui décrivent le comportement VEL des liants et enrobés bitumineux.

Les modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt sont les plus simples, mais ils ne peuvent pas décrire correctement le comportement complexe des matériaux bitumineux (Olard, 2003). Le modèle de Maxwell est constitué d'une combinaison d'un ressort et d'un amortisseur monté en série et représente un liquide viscoélastique. Celui de Kelvin-Voigt est constitué de la même combinaison, mais d'un montage en parallèle. Il représente un solide viscoélastique (Olard et Di Benedetto, 2003).

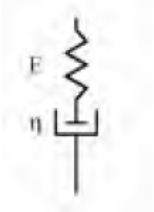
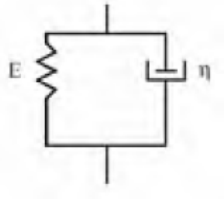
Modèle de Maxwell	Modèle de Kelvin-Voigt
 Liquide viscoélastique	 Solide viscoélastique
$E^*(\omega) = E\,\dfrac{i\omega\tau}{1 + i\omega\tau} = \dfrac{E\,\omega^2\,\eta^2 + i\,E^2\,\omega\,\eta}{E^2 + \omega^2\,\eta^2}$	$E^*(\omega) = E + i\omega\eta$

Figure 1.22 Modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt
Tirée de Lamothe (2014)

Il existe des modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt généralisés, qui sont constitués chacun de *n* éléments de Maxwell montés en parallèle pour le modèle généralisé de Maxwell et de *n* éléments de Kelvin-Voigt pour son modèle généralisé. Ces modèles généralisés permettent une description satisfaisante du comportement des liants et des enrobés bitumineux lorsqu'ils possèdent un nombre suffisant d'éléments *n* (Olard, 2003). Ainsi, en constituant un modèle avec un nombre infini d'éléments de l'un de ces deux modèles, on obtient un modèle à

spectre continu qui améliore la modélisation du VEL des mélanges bitumineux. Le modèle proposé par Huet (1963) est un modèle à spectre continu. C'est un modèle analogique à 3 éléments qui associe en série un ressort de raideur E_0 et deux éléments à fluage parabolique de paramètres h et k de la forme $F_1(t) = at^h$ et $F_2(t) = bt^k$. Les paramètres h et k du modèle sont reliés aux pentes à l'origine et au point asymptotique E_{00} (Olard, 2003). Le modèle de Huet permet une bonne modélisation du comportement des enrobés. Mais toutefois, dans le domaine des basses fréquences et hautes températures, le module complexe dans le plan Cole – Cole tend vers zéro pour ce modèle et donne ainsi un comportement fluide aux enrobés.

Le problème du comportement fluide du modèle de Huet est résolu par Sayegh (1965) lorsqu'il obtient pour le domaine des basses fréquences et hautes températures un module réel E_{00} non nul, très faible par rapport à E_0 et dépendant du squelette granulaire du mélange : le module statique. Il proposa par la suite le modèle de Huet – Sayegh, en ajoutant un élément ressort de très faible rigidité (E_0) en parallèle aux éléments du modèle proposé par Huet (Lamothe, 2014; Olard, 2003).

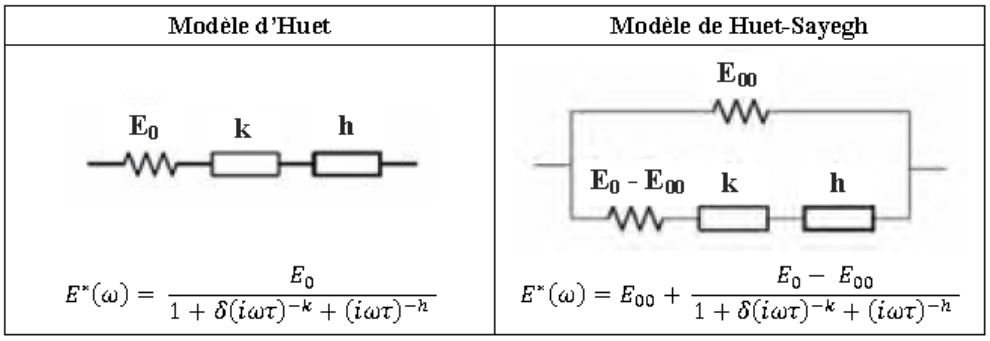


Figure 1.23 Représentation des modèles de Huet et Huet-Sayegh
Tirée de Lamothe (2014)

Selon Olard (2003), le modèle de Huet – Sayegh traduit correctement le comportement des enrobés bitumineux dans le domaine des petites déformations et ne nécessite que six constantes (δ, k, h, E_{00}, E_0, et τ_0) pour déterminer le comportement VEL du matériau à une température donnée. Toutefois, Olard et ses collaborateurs ont proposé un nouveau modèle

analogique pour tous les types de matériaux bitumineux (liants, mastic et enrobés) : c'est le modèle 2S2P1D.

1.6.2.3 Présentation du modèle analogique 2S2P1D

Le modèle 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic and 1 Dashpot) est un modèle ayant un spectre continu obtenu en améliorant le modèle de Huet – Sayegh à hautes températures et basses fréquences par ajout d'un amortisseur linéaire en série avec les deux éléments paraboliques et le ressort de rigidité E_{00}-E_0.

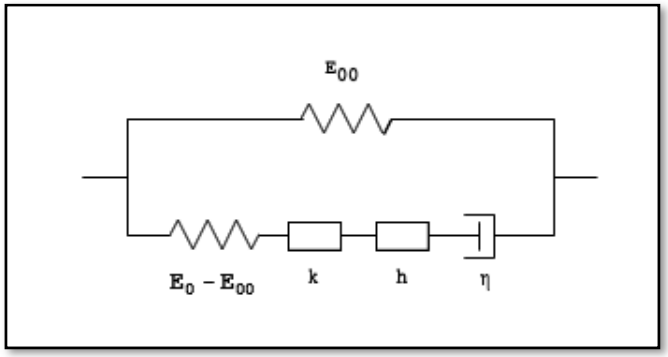


Figure 1.24 Représentation du modèle 2S2P1D
Tirée de Olard (2003)

Le module complexe est donné à une température par l'expression :

$$E^*(i\omega\tau) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1+\delta(i\omega\tau)^{-k}+(i\omega\tau)^{-h}+(i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (1.7)$$

Avec :

i : nombre complexe défini $i^2 = -1$;

ω = 2π * fréquence, pulsation ;

k, h : exposants tels que $0 < k < h < 1$;

E_0 la valeur du module lorsque $\omega \rightarrow 0$ (module statique) ;

E_{00} la valeur du module lorsque $\omega \rightarrow \infty$ (module vitreux) ;

δ : constante sans dimension ;

β : constante sans dimension ;

η : viscosité Newtonienne ;

τ_0 : temps caractéristique dont la valeur dépend uniquement de la température.

1.6.2.4 Principe d'équivalence temps – température

Le module complexe des enrobés bitumineux dépend à la fois de la pulsation ω et de la température T. Pour un enrobé bitumineux, l'augmentation de la fréquence de sollicitation équivaut à l'effet d'une baisse de température. De la même manière, lorsqu'on augmente la température, on a l'effet d'une baisse de fréquence de sollicitation. Ainsi se défini le principe d'équivalence temps – température (PETT) des enrobés bitumineux (Carter et Perraton, 2002; Lamothe, 2014). Un enrobé bitumineux respecte le PETT lorsque les deux variables indépendantes du module (T et ω) peuvent être ramenées à une seule variable réduite tel que (Di Benedetto et Corté, 2005) :

$$E^*(\omega, T) = E^*(\omega \cdot f(T)) \tag{1.8}$$

Lorsque ce principe est respecté, les résultats expérimentaux forment une courbe unique pour la représentation du module complexe dans le plan Cole – Cole et l'espace de Black.

Ce principe permet alors la translation à une température de référence T_{ref} des résultats obtenus à une température donnée T, en déterminant des fréquences équivalentes. Selon Carter et Perraton (2002), pour translater les résultats obtenus à une température T vers une température de référence T_{ref}, il faut simplement multiplier chaque fréquence de la température T par un facteur de translation a_t et associer la valeur du module mesuré à T à cette nouvelle fréquence dans le domaine T_{ref}. Au cours de l'essai, on mesure le module de l'enrobé à sept différentes fréquences pour plusieurs températures. Ainsi, pour chaque température, on a sept points qui forment une courbe isotherme et chaque point des isothermes représente le module dynamique obtenu pour un couple de fréquence (ω) et

température (T). Par le PETT, une valeur du module dynamique peut être attribuée à différent couple de température et fréquence. Une courbe maîtresse est tracée avec ces différentes isothermes dans un repère bilogarithmique en fonction des fréquences pour une température de référence choisie en translatant les isothermes à l'aide des coefficients de translation a_T. Plusieurs lois permettent de déterminer les coefficients a_T. L'une des relations permettant d'établir le facteur a_T, et la plus utilisée est la relation de Williams, Landel et Ferry (WLF) définie par :

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

Où :

C_1, C_2 Constantes déterminées à partir des résultats d'essai et dépendant de la valeur de la température de référence T_{ref}.

1.6.2.5 Représentation graphique des résultats de module complexe

Les résultats de l'essai de module complexe (|E*|, φ, E_1 et E_2) sont souvent représentés par quatre courbes soit (Di Benedetto et Corté, 2005): les courbes isothermes et isochrones, le plan Cole-Cole et l'espace de Black.

Les courbes isothermes sont obtenues en traçant norme du module complexe |E*| en fonction de la fréquence pour chacune des températures d'essais, le plus souvent en coordonnée bilogarithmique. La pente des isothermes permet d'estimer la susceptibilité cinétique des matériaux bitumineux (Di Benedetto et Corté, 2005). La Figure 1.25 présente les courbes isothermes de module complexe d'un enrobé de type EBHP14-verre testé au LCMB.

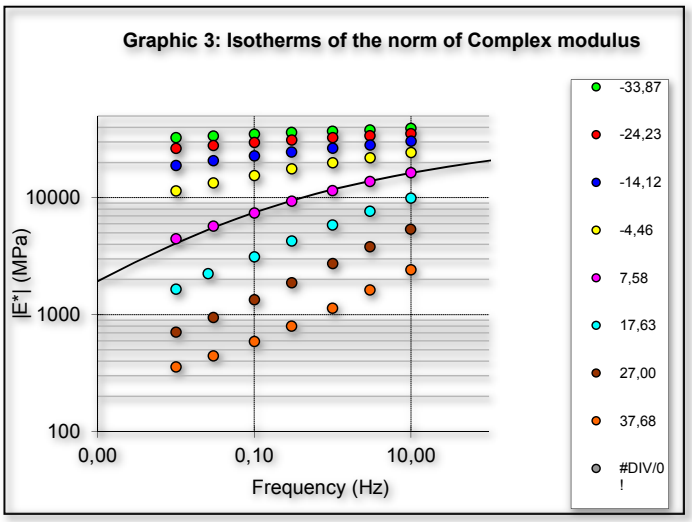


Figure 1.25 Courbes isothermes de module complexe
d'un enrobé bitumineux

Les courbes isochrones obtenues en traçant la norme du module |E*| en fonction de la température pour chaque fréquence d'essais en coordonnées semi-logarithmiques. Elles permettent d'estimer la susceptibilité thermique du matériau bitumineux (variation du module en fonction de la température).

Les courbes du plan Cole – Cole sont obtenues en portant la partie réelle E_1 en abscisse et la partie imaginaire E_2 en ordonnée. Selon Di Benedetto et Corté (2005), cette représentation permet le calage des modèles rhéologiques et lorsque le matériau respecte le principe d'équivalence temps – température, les points expérimentaux suivent une courbe unique. La Figure 1.26 présente une représentation des résultats de module complexe dans le plan Cole – Cole pour une enrobé de type EBHP 14 – verre.

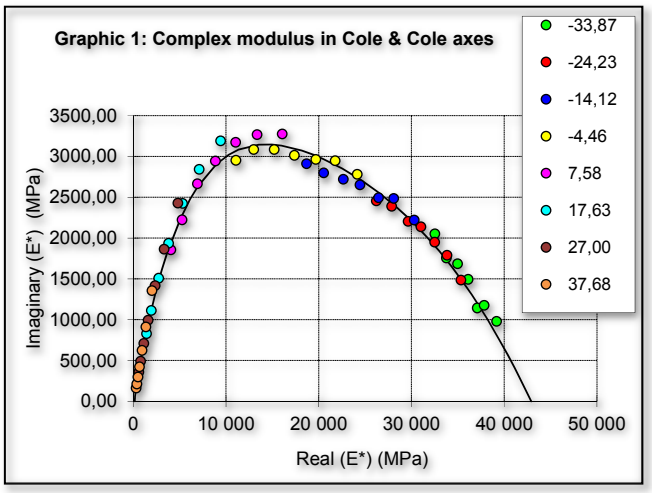


Figure 1.26 Représentation du module complexe dans le plan Cole – Cole

L'espace Black permet de représenter la norme du module complexe |E*| en fonction de l'angle de phase φ. Cette représentation permet de visualiser la zone des modules faibles et la diminution de l'angle de phase pour les hautes températures. De même que le plan Cole – Cole, lorsque le matériau respecte le principe d'équivalence temps – température, les points expérimentaux suivent une courbe unique (Di Benedetto et Corté, 2005). La Figure 1.27 montre les résultats de module complexe d'un enrobé bitumineux dans l'espace Black.

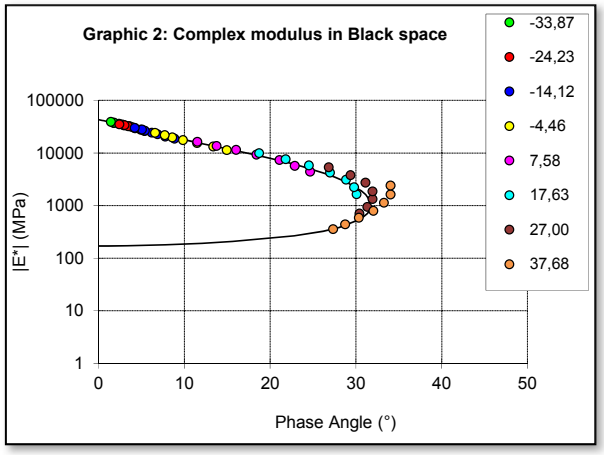


Figure 1.27 Représentation du module complexe dans l'espace Black

1.6.2.6 Paramètres influençant la valeur du module complexe

Di Benedetto (1998) identifie deux catégories de paramètre qui influencent la valeur du module complexe des enrobés. Ces deux catégories sont les paramètres de chargement en cours d'essai (fréquence, température et niveau de chargement) et les paramètres de constitution du matériau (vides, liant, granulat et filler).

À haute température, la fréquence a une influence importante sur la valeur de la norme du module complexe. Inversement, la température influence fortement la rigidité de l'enrobé à basse fréquence. Ces deux paramètres influencent également l'angle de phase du module de l'enrobé. Di Benedetto et Corté (2005) recommandent un contrôle fin de ces paramètres lors des essais. En particulier, la température doit être contrôlée à deux niveaux (environnement et éprouvette) afin d'éviter une interprétation erronée des résultats d'essai.

Le niveau et nombre de sollicitations influencent aussi le résultat de module complexe de l'enrobé. Avec le niveau de sollicitation, le comportement de l'enrobé peut rapidement devenir non linéaire, car le domaine linéaire des enrobés bitumineux est très restreint et diminue avec l'augmentation de la température. Aussi, au cours des cycles de sollicitations, il se produit un échauffement parasite dans l'éprouvette par dissipation d'énergie. L'énergie dissipée à chaque cycle de sollicitation est proportionnelle à la fréquence et au carré de l'amplitude de déformation et contribue à la diminution de la rigidité de l'enrobé bitumineux (Di Benedetto et Corté, 2005).

Les différents paramètres de composition de l'enrobé bitumineux influençant la valeur de sa rigidité sont le liant, les granulats et fines et la teneur en vides. Pour le liant, une augmentation de sa teneur entraine une augmentation du module jusqu'à une valeur optimale de la teneur en liant. Au-delà de cette valeur, le module diminue. Également, la nature du liant influence la norme du module et aussi la susceptibilité thermique et cinétique de l'enrobé. Pour les faibles fréquences et hautes températures, la rigidité de l'enrobé bitumineux dépend beaucoup plus du squelette granulaire. Quant aux fines, elles améliorent

la qualité du mastic et leur augmentation dans le mélange améliore les caractéristiques mécaniques de l'enrobé jusqu'à une certaine teneur en fine. Au-delà de cette teneur, les caractéristiques rechutent. La diminution de la teneur en vides dans l'enrobé entraine une augmentation de sa rigidité et une diminution de sa susceptibilité à la température (Di Benedetto et Corté, 2005).

1.6.3 Résistance à la fatigue

Le passage successif des véhicules lourds sur la chaussée soumet les couches d'enrobés bitumineux à des sollicitations de courtes durées qui produisent de la traction par flexion à la base de ces couches (Baaj, 2002). Les contraintes induites par ces sollicitations ne causent pas immédiatement la rupture du matériau. Mais leur répétition dans le temps entraine une fissuration par fatigue du matériau (Nguyen, 2009). On appelle résistance à la fatigue pour N cycle de sollicitation, la valeur de la sollicitation qui conduit à la rupture pour N cycle (Di Benedetto et Corté, 2005). Le phénomène de fatigue est considéré comme le mode de dégradation prépondérant à température moyenne (0 à 45°C) des matériaux et il est caractérisé par la rupture du matériau après l'application d'un grand nombre de sollicitations (N > 10 000 cycles) dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture instantanée du matériau (Baaj, 2002; Di Benedetto et Corté, 2005; Perraton et al., 2003).

1.6.3.1 Types d'essai de fatigue

En laboratoire, plusieurs essais permettent de caractériser la résistance en fatigue des enrobés bitumineux. Ces essais tentent de simuler le comportement observable sur chaussée en imposant à une éprouvette d'enrobé des sollicitations répétées. On classe ces essais en trois grands types (Di Benedetto et Corté, 2005) à savoir :

- essais de flexion (2, 3 et 4 points) ;
- essai de traction-compression ;
- essais de cisaillement.

Selon Nguyen (2009) on peut utiliser pour les essais de fatigue en laboratoire toutes les configurations d'essais utilisées pour la mesure du module complexe. Toutefois, pour un souci de simplification et de maîtrise de l'essai, les essais de laboratoire sont réalisés avec des sollicitations sinusoïdales avec ou sans temps de repos (Lamothe, 2014). Ces essais sont réalisés soit en mode sollicitation imposée de contrôle de force ou en contrôle de déplacement à une température de 10 ˚C et une fréquence de 10 Hz (Lamothe, 2014).

1.6.3.2 Évolution de la rigidité |E*| au cours d'un essai de fatigue

Au cours d'un essai de fatigue en laboratoire, on mesure les contraintes et déformations. Cela permet de déterminer l'évolution de la rigidité |E*| du matériau en fonction du nombre de cycles de sollicitation. Ainsi, trois phases ont été distinguées dans l'évolution de la rigidité du matériau en cours d'essai. La figure 1.24 montre les phases et l'évolution de rigidité d'un enrobé au cours d'un essai de fatigue.

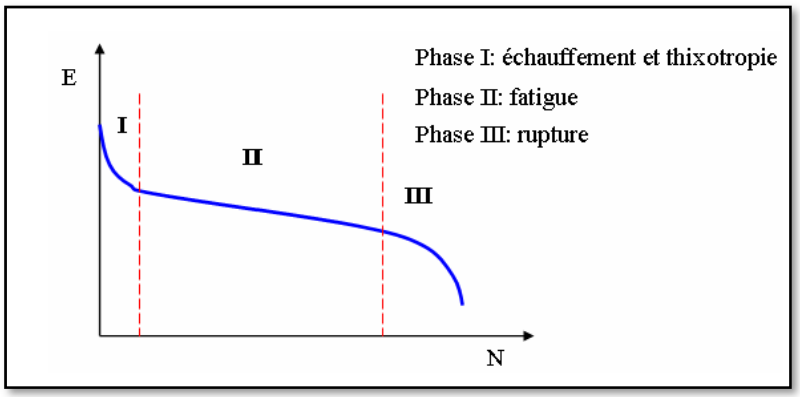


Figure 1.28 Évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles
Tirée de Nguyen (2009)

La phase I (phase d'adaptation) est caractérisée par une chute rapide du module de rigidité, qui n'est pas considérée exclusivement comme de la fatigue, mais plutôt liée aux effets biaisant (échauffement du matériau et thixotropie du bitume).

La phase II (Fatigue) est caractérisée par la chute lente du module de rigidité, progression des microfissures, évolution stable et presque linéaire.

La phase III (Rupture) est caractérisée par la chute rapide du module de rigidité, apparition des macrofissures en début de phase, concentration brutale des contraintes et progression des macrofissures jusqu'à la rupture complète (Baaj, 2002).

Selon plusieurs auteurs (Baaj, 2002; Di Benedetto et Corté, 2005; Doan, 1976; Domec et al., 2005; La Roche, 1996; Lamothe, 2014; Perraton et al., 2003), des écarts importants de durée de vie existent entre les différents essais de fatigue liés aux effets biaisant autres que l'endommagement même. Selon Baaj (2002), les essais de fatigue sur plusieurs matériaux ont révélé l'existence d'une dispersion importante dans les résultats de durées de vie. L'hétérogénéité du matériau et le phénomène de fatigue lui-même seraient responsables de ces résultats. Il est donc nécessaire d'effectuer un grand nombre de répétitions afin d'avoir des valeurs de nombre de cycles représentatif du phénomène réel.

1.6.3.3 Méthodes d'analyse des résultats d'un essai de fatigue

La littérature distingue deux méthodes pour l'analyse des résultats des essais de fatigue. La première est basée sur des critères d'évolution de la rigidité et la seconde concerne l'analyse en terme d'endommagement par la méthode du département de génie civil et bâtiment (DGCB) (Baaj, 2002; Nguyen, 2009). L'analyse par la méthode DGCB propose une procédure pour le calcul du taux d'endommagement par cycle de chargement en tenant compte de la non-linéarité et des phénomènes parasites qui apparaissent lors des essais de fatigue. Les critères d'évolution de la rigidité sont les plus utilisés pour l'analyse de la fatigue et parmi ceux-ci, le critère le plus usuel est le critère classique de rupture.

Le critère classique définit la durée de vie en fatigue (Nf) des éprouvettes comme étant le nombre de cycles correspondant à une perte de 50% de la norme du module complexe initial. Pour les essais en mode de contrôle de force, les durées de vie suivant ce critère sont peu

différentes de la rupture physique de l'éprouvette. Mais en mode contrôle de déplacement, ce critère semble plus arbitraire en regard à la rupture physique de l'éprouvette (Lamothe, 2014). Le choix du module initial est très important pour ce critère classique et plusieurs auteurs donnent des intervalles du nombre de cycles de sollicitations permettant de déterminer le module initial $|E_0^*|$. Le Tableau 1.10 présente ces différentes intervalles de détermination de $|E_0^*|$.

Tableau 1.10 Nombre de cycles de détermination de $|E_0^*|$
Tiré de Lamothe (2014)

Méthode utilisée	Référence
Module mesuré au 1er cycle.	Baaj, 2002
Module mesuré au 100ème cycle.	Di Benedetto et coll., 2004
Extrapolation linéaire en considérant les valeurs de module mesuré entre le 50ème et le 300ème cycle.	Nguyen, 2009
Extrapolation linéaire en considérant les valeurs de module mesuré entre le 50ème et le 250ème cycle.	Tapsoba, 2012

La durée de vie réelle en fatigue du matériau correspond au moment précis où le mode d'endommagement change de mécanisme, donc le moment de transition entre les phases II et III (Lamothe, 2014). Il faut donc déterminer le nombre de cycles $Nf_{II\text{-}III}$ correspondant à ce moment qui constitue un aspect crucial dans l'évaluation de la résistance en fatigue du matériau (Lamothe, 2014). Ainsi, d'autres critères ont été proposés pour les sollicitations en mode contrôle de déformation. Il s'agit du suivi de l'évolution de l'angle de phase et des critères relatifs à la notion d'homogénéité au sein de l'éprouvette testée. Selon Lamothe (2014), l'angle de phase atteint une valeur maximale (ϕ_{fmax}) entre la fin de la phase II et le début de la phase III. Ce qui constitue donc un critère approprié quant à la détermination de la durée de vie en fatigue de l'éprouvette ($N_{fmax\phi}$).

Les écarts entre les extensomètres permettent de caractériser l'état d'homogénéité du champ de déformation de l'éprouvette tout au long de l'essai de fatigue. Le nombre de cycles

correspondant à l'atteinte d'un écart de ± 25% entre la déformation d'un des extensomètres par rapport à la valeur moyenne est généralement reconnu comme étant la valeur du $N_{f\Delta ext}$ (Caron, 2015; Lamothe, 2014). Cet écart est déterminé à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta\varepsilon_{ext} = \frac{\varepsilon_{Aaxi} - \varepsilon_{Aax}}{\varepsilon_{Aax}} x\ 100 \tag{1.10}$$

Où

$\Delta\varepsilon_{ext}$ écart entre la déformation d'un extensomètre et la déformation moyenne des trois extensomètres

ε_{Aaxi} déformation de l'extensomètre *i*

ε_{Aaxi} déformation moyenne des trois extensomètres

Une méthode complémentaire aux critères d'évolution de la rigidité a été utilisée par Caron (2015), cette méthode permet une meilleure identification du moment de la transition entre les phases II et III. C'est la méthode d'identification géométrique des points d'inflexion de la transition des phases II/III. Elle consiste à tracer une droite à partir des résultats de l'essai dont la fonction est corrélée linéairement avec les données mesurées.

1.6.3.4 Représentation graphique des résultats d'un essai de fatigue

La durée de vie en fatigue du matériau en fonction de l'amplitude de sollicitation est représentée par la courbe de Wöhler. Cette courbe est caractérisée par l'une des relations suivantes (Di Benedetto et Corté, 2005) :

- $S = a.N^{-b}$: la courbe est alors une droite en coordonnées logarithmique ;
- $S = \alpha - \beta.\log(N)$: la courbe est alors une droite en repère semi-logarithmique.

Avec :

S : la sollicitation imposée (contrainte ou déformation imposée) ;

N : la durée de vie correspondante ;

a, b (α, β) : les constantes de la relation.

La figure 1.25 présente une courbe de Wöhler qui permet de caractériser la durée de vie en fatigue d'un matériau bitumineux.

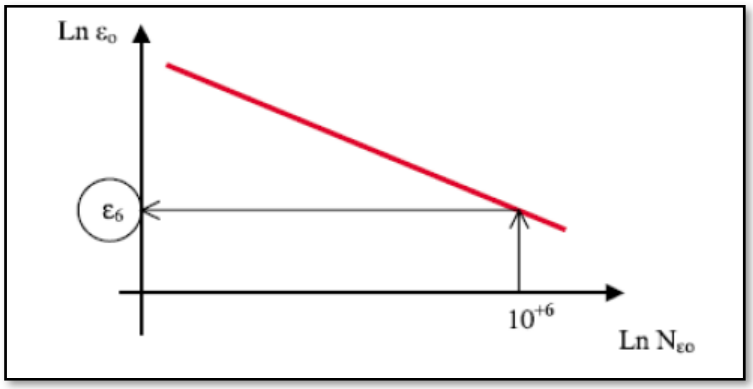


Figure 1.29 Courbe de Wöhler
Tirée de Nguyen (2009)

1.6.3.5 Paramètres influençant la fatigue des enrobés

Les différents paramètres qui ont une influence sur la résistance à la fatigue sont : le liant (teneur, additifs et nature), la compacité (ou la teneur en vide), le type de granulats et la courbe granulométrique et la teneur en fines (Baaj, 2002). Selon Lamothe (2014), l'influence de la composition du matériau sur sa résistance à la fatigue doit être analysée avec précaution. Pour Baaj (2002), il est très difficile de déterminer, d'une façon absolue, le rôle d'un paramètre indépendamment des autres paramètres, car le changement d'un paramètre de formulation d'un enrobé bitumineux, peut modifier d'autres paramètres de formulation.

1.6.3.6 Paramètres de la loi de fatigue

La loi de fatigue qui permet d'obtenir la courbe de Wöhler est définit par (Perraton, Di Benedetto et Carter, 2011):

$$N_f = c_1 \varepsilon_0^{-c_2} \tag{1.11}$$

Où

ε_0 est l'amplitude de la déformation cyclique imposée (m/m) à une température donnée (Ti) et une fréquence donnée (fi);

c_1 est le coefficient correspondant à la durée de vie du matériau pour une amplitude de déformation imposée de 1 m/m, à une température et une fréquence données ;

c_2 est coefficient lié à la pente de la droite de Wöhler, qui doit être représentée dans le plan log N_f – log ε_0, pour un matériau donné (sans unité).

Dans la méthode française de dimensionnement, la pente de la droite de fatigue est définie par $b = -1/c_2$ (Lamothe, 2014). La droite de fatigue (Wöhler) permet de déterminer l'amplitude de déformation ε_6 qui correspond à 1 million (10^6) de cycles.

La droite de fatigue est obtenue par une régression linéaire sur les résultats de plusieurs essais réalisés pour un même matériau à différent niveau de sollicitation (Di Benedetto et Corté, 2005). Le coefficient R^2 variant entre 0 et 1 permet de juger de la qualité de la régression linéaire.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Mise en contexte

Au Québec, il est généré des quantités importantes de verre. En 2012, on estimait à environ 159 000 tonnes la quantité générée par année et dont 43% étaient récupérés pour le recyclage (Recyc-Québec, 2015). En 2015, l'ÉTS et ses partenaires (SAQ, ÉEQ, Mitacs, Recy-Québec et la ville de Montréal), estimaient une production annuelle 192 000 tonnes dont 77% de ces verres étaient récupérés par la collecte sélective et constituaient ainsi une grande réserve de matériaux recyclables. Pour Lupien (2006), le verre récupéré par la collecte sélective se recycle facilement, mais est très souvent contaminé dans les centres de tri. Ce qui en fait un matériau difficile à écouler sur les marchés. Donc la possibilité d'utiliser les verres postconsommation dans les enrobés et plus généralement dans la chaussée est alors une solution idéale et écoresponsable pour le recyclage de ce matériau.

À l'ÉTS, les chercheurs ont développé l'enrobé bitumineux haute performance (EBHP) formulé selon le principe d'une optimisation du contact gros sur gros. Les chercheurs de l'ÉTS ont de fait choisi de recourir à l'EBHP pour évaluer la faisabilité d'incorporer le verre postconsommation dans les enrobés. L'incorporation d'une partie du verre recyclé dans l'EBHP sans altérer ces performances est donc un enjeu de taille pour les chercheurs. Une formule de l'enrobé l'EBHP 14 – Verre a été développée au laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) pour permettre de démarrer l'étude de faisabilité d'incorporation du verre recyclé dans les enrobés.

Une planche d'essai a été réalisée à cet effet sur un site de la SAQ à partir de l'EBHP 14 incorporant du verre postconsommation le 12 novembre 2015. L'entreprise EUROVIA a été chargée de la production en centrale d'enrobage discontinue et de la mise en œuvre sur le site de la SAQ de cet enrobé. Les techniciens de l'ÉTS ont échantillonné cette production pour contrôler et vérifier sa qualité.

2.2 Problématiques

La production d'un mélange bitumineux en laboratoire, quel que soit le type d'enrobé, est réalisable sans aucune contrainte majeure. Par ailleurs, une formule d'un EBHP incorporant du verre recyclé a été produite et testée en laboratoire afin d'évaluer ces propriétés. Mais contrairement à la production en laboratoire, les procédés de production des enrobés en centrale sont beaucoup plus complexe et loin des procédés de laboratoire. Parfois, selon le type de mélange à produire, des ajustements des procédés de la centrale deviennent indispensables afin de produire un mélange de qualité. Quant à la production d'enrobé – verre, les centrales au Québec ne sont pas encore équipées pour permettre une production d'enrobé incorporant du verre recyclé. Il est alors justifié que l'on s'interroge quant à la faisabilité de produire dans de telles conditions en centrale d'enrobage l'EBHP 14 – Verre.

La formulation du mélange bitumineux EBHP 14 – Verre en laboratoire a permis de prédire le comportement et les performances in situ du mélange. Toutefois, les performances in situ sont souvent liées à la qualité de la production et aux conditions de mise en œuvre du mélange. Il est donc nécessaire qu'on vérifie si les performances in situ après la mise en place du mélange correspondent à celles obtenues pour la même formule en laboratoire. D'autre part, le verre recyclé a des propriétés qui diffèrent de celles des granulats de pierre calcaire. Une analyse des propriétés de l'EBHP 14 – Verre est donc nécessaire afin de mettre en évidence l'impact que peut avoir l'incorporation du verre recyclé sur les propriétés du mélange bitumineux.

2.3 Objectifs de recherche

Les objectifs de cette maîtrise sont de vérifier d'une part, l'homogénéité de l'EBHP 14 – Verre produit pour réaliser la planche d'essai SAQ afin de mettre en évidence les difficultés liées à la production de l'EBHP 14 incorporant du verre recyclé en centrale d'enrobage et d'en déduire les conditions qui permettraient de faciliter la production en centrale d'enrobé incorporant du verre recyclé. D'autre part, ce travail a pour but de :

- déterminer les performances mécaniques et thermomécaniques de l'enrobé EBHP 14 – Verre mis œuvre sur la planche d'essai SAQ ;
- vérifier si les performances in situ de l'EBHP 14 – Verre correspondent à celles escomptées à la formulation du mélange en laboratoire ;
- évaluer l'impact de l'incorporation du verre recyclé sur les performances de l'EBHP 14 produit en usine d'enrobage.

Dans cette optique, une série d'essais en laboratoire et in situ ont été réalisés. Ce travail est concentré exclusivement sur la caractérisation en laboratoire du mélange mis en œuvre lors de la réalisation de la planche d'essai SAQ. Toutefois, des carottes prélevées in situ ont été testées, leurs performances ont été évaluées et les résultats des essais in situ réalisés dans le cadre d'un autre projet de maîtrise ont été analysés afin de valider les résultats des essais de performance en laboratoire.

2.4 Méthodologie

La démarche adoptée afin d'atteindre les objectifs de ce projet de recherche s'articule principalement autour de deux points. Dans un premier temps, il a été question d'effectuer une revue de la littérature afin d'avoir les éléments essentiels qui ont par la suite facilité la caractérisation de l'EBHP14 – Verre. Deuxièmement, un programme expérimental permettant la caractérisation de l'enrobé au laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB), a été mis en place. Au cours de cette caractérisation, une série d'essais a été réalisée afin d'évaluer la qualité et de déterminer les performances de l'enrobé mise en œuvre pour la réalisation de la planche d'essai SAQ. Des plaques ont été fabriquées pour les essais d'orniérage. Les éprouvettes pour les essais de module complexe et de fatigue ont été extraites par carottage des briquettes compactées à PCG. En fin, des carottes ont été prélevées dans la chaussée pour déterminer leur module de rigidité. Afin de comparer les performances du mélange avec verre et les performances du mélange sans verre, le mélange sans verre a été fabriqué en laboratoire en utilisant les mêmes matériaux qui ont servi à la production en centrale du mélange avec verre utilisé pour la planche d'essai SAQ.

2.4.1 Caractérisation du EBHP 14 – Verre de la planche d'essai de l'entrepôt de la SAQ

2.4.1.1 Échantillonnage

Lors de la réalisation de la planche d'essai SAQ en novembre 2015, trois camions ont été produits (camion C1, C2 et C3). Essentiellement, deux camions ont été échantillonnés : le camion C2 approximativement vers 7h 00 et le camion C3 vers 8h 20. De fait, 42 boites d'enrobé d'environ 8 kg chacune ont été échantillonnées sur le chantier. Les échantillons ont été prélevés directement du godet d'une pelle excavatrice dont le contenu venant du véhicule de transfert des matériaux (VTM). Le Tableau 2.1 présente l'identification des matériaux échantillonnés lors de la réalisation de la planche SAQ.

Tableau 2.1 Identification des échantillons

Camion	**Nbre de boites**	**Durée de mise place des camions (Heure)**	
		Début du déchargement dans le VTM	**Fin du déchargement dans le VTM**
C1	0	6h 26	6h 35
C2	23	6h 46	7h 00
C3	19	8h 10	8h 25

Afin d'obtenir des matériaux représentatifs du mélange mis en place lors de la réalisation de la planche d'essai de la SAQ, les échantillons prélevés dans des boites en carton cirées ont été recombinés suivant une méthode basée sur une étude statistique réalisée à l'ETS pour fabriquer des boites de matériau appelé ''méga boite : MB'' qui ont servies à la réalisation

des essais en laboratoire. Cette façon de faire est rendu nécessaire du fait qu'il a été montré (Cholloux, 2015) qu'il fallait un certain nombre de boites pour assurer la production d'échantillons qui soient représentatif de la gâchée. Le détail quant à la façon retenue pour constituer les méga boites est détaillé à la section suivante.

2.4.1.2 Choix du nombre de boite de constitution pour la fabrication des méga boites

Les méga boites (MB) sont fabriquées pour chacun des deux lots d'échantillons, soit pour les camions C2 et C3. Le choix du nombre de boites pour la fabrication des méga boites est basé sur une étude statistique réalisée par Sarah Cholloux (2015) dans le cadre de son projet de maîtrise : «**Étude de la variabilité et de la reproductibilité de quatre enrobés bitumineux incorporant des scories d'acier**», réalisée à l'École de technologie supérieure (ÉTS).

Selon Cholloux (2015) pour avoir un échantillon représentatif d'un mélange, on pouvait soit, combiner un minimum de deux boites, soit combiner trois boites ou soit combiner un maximum de cinq boites. Le tableau 2.3 extrait de son rapport de maîtrise présente le nombre de boite à combiner pour chaque mélange étudié.

Tableau 2.2 Nombre de boîtes tiré de Cholloux (2015)

	% Bitume		**Dmm**	
	$\delta = 0{,}4$		$\delta = 0{,}02$	
	n inf	**n sup**	**n inf**	**n sup**
Hi-Tech 100	0,23	1,59	0,17	1,22
Hi-Tech Fondation	0,14	0,99	0,62	4,36
Hi-Tech Unik Urbain	0,30	2,11	0,11	0,78
Hi-Tech Unik Rural	0,10	0,73	0,43	3,03

Suivant ces travaux et nécessitant environ 15 kg de matériaux pour chaque méga boite pour la caractérisation en laboratoire des mélanges EBHP 14 – Verre fabriqués en usine, nous avons retenu pour notre étude un nombre maximum de six boites de 8 à 10 kg à combiner

pour la fabrication des méga boites. Toutefois, les plaques ayant servi à la réalisation des essais d'orniérage n'étant pas directement inclus dans les méga boites, il a été retenu une combinaison de trois boites pour la fabrication de chaque plaque. Le recours à trois boites permettait d'avoir la quantité nécessaire pour la fabrication de chaque plaque tout en ayant une masse de matériau suffisante pour constituer un échantillon représentatif (Cholloux, 2015). En effet, l'étude statistique réalisée par Cholloux (2015) a montré que le mélange de trois boites, soit une masse totale d'enrobé de 24 à 30 kg permettaient ainsi d'avoir un échantillon homogène et représentatif du mélange bitumineux suivant un intervalle de confiance de 95%. La procédure de fabrication des méga boites est détaillée à la section suivante (§2.4.1.3).

2.4.1.3 Procédure de fabrication des méga boites

Les méga boites (MB) sont des boites contenant environ 15 kg d'enrobé EBHP 14 – Verre provenant de la planche d'essai SAQ. Elles sont au nombre de quatre et sont fabriquées à partir de six boites de chaque lot d'échantillon. Les différentes étapes de fabrication de ces boites sont les suivantes :

a) le choix des boites de constitution : on choisit dans un lot d'échantillon (exemple lot d'échantillon C2) les six (6) boites les plus lourdes donc contenant le plus de matériaux ;
b) chauffer les boites retenues dans un four ventilé jusqu'à la température de malaxage du mélange (160˚C dans le cas du EBHP 14 – Verre). Il faut environ 4 à 5 heures pour atteindre cette température ;
c) préparer les quatre contenants devant recevoir une part de matériaux de chaque boite sélectionnée. Les contenants (bols ou plateaux) doivent être assez grands pour permettre de rendre homogène le mélange après combinaison des différentes parties de chaque boite ;
d) séparer chacune des boites en quatre parties égales à l'aide du séparateur mécanique ;
e) homogénéiser le mélange de chacune des quatre (4) méga boites ainsi fabriquée à l'aide de spatule et de truelle. Si nécessaire chauffer les méga boites pendant 30 min afin de faciliter l'homogénéisation ;

f) après homogénéisation remplir chaque boite, bien identifiée, de matériau constituant chaque méga boite.

La Figure 2.1 présente schématiquement le principe de séparation préconisé des six (6) boites d'échantillons en vue de constituer les quatre (4) méga boites.

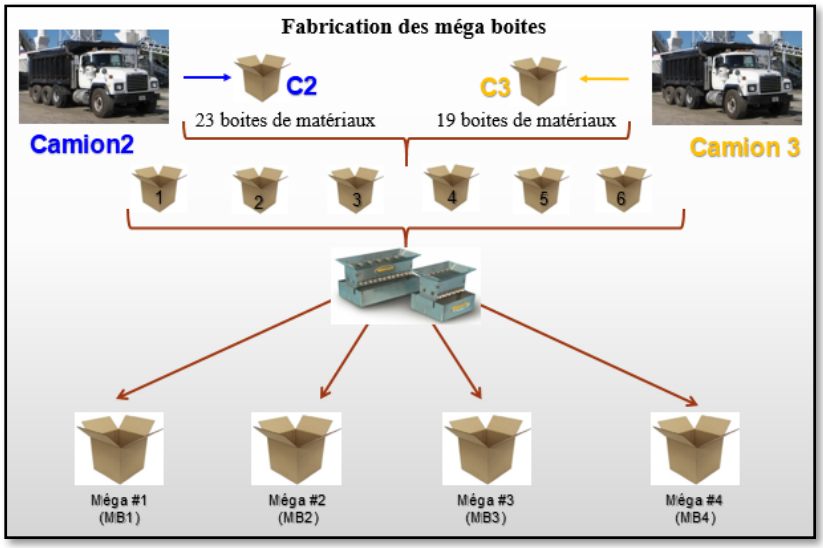


Figure 2.1 Procédure de fabrication des méga boites

Suivant les objectifs de cette recherche, un certain nombre d'essais de caractérisation a été retenu pour déterminer les propriétés rhéologiques de l'EBHP 14 – Verre. Ces différents essais sont énumérés à la section suivante.

2.4.1.4 Essais retenus pour la caractérisation de l'EBHP 14 – Verre

Pour la caractérisation de l'EBHP 14 – Verre, nous avons sélectionné suivant les objectifs du projet une série d'essais à réaliser pour déterminer les propriétés du dit enrobé. Il a donc été réalisé sur l'EBHP 14 – Verre des essais permettant de déterminer les propriétés volumétriques, mécaniques, thermomécaniques et de durabilité. Une description des différentes méthodes d'essai est présentée au chapitre 3 de ce travail. Le Tableau 2-2 présente les essais réalisés sur le mélange bitumineux avec verre.

Tableau 2.3 Essais de caractérisation de l'EBHP 14 – Verre

Essais	**Nombre d'échantillon testé**		**Laboratoire**
	C2-MB	**C3-MB**	
Densité maximale (d_{mm})	14	12	LCMB
Presse à cisaillement giratoire (PCG)	8	8	LCMB
Four à ignition + analyse granulométrique	10	7	LCMB
Extraction + analyse granulométrique	4	4	DJL
Résistance à l'orniérage	2	2	LCMB
Module complexe	1	1	LCMB
Résistance à la fatigue	4	4	LCMB
Tenue à l'eau	6	5	LCMB
Module de rigidité par traction indirect	**Échantillon in situ**		
	C1	**C2**	**C3**
	1	1	1

2.4.1.5 Étapes de caractérisation de l'EBHP 14 – Verre

Les différentes étapes de caractérisation de l'EBHP14 – Verre permettant d'atteindre les objectifs de ce travail sont présentées à la Figure 2.2.

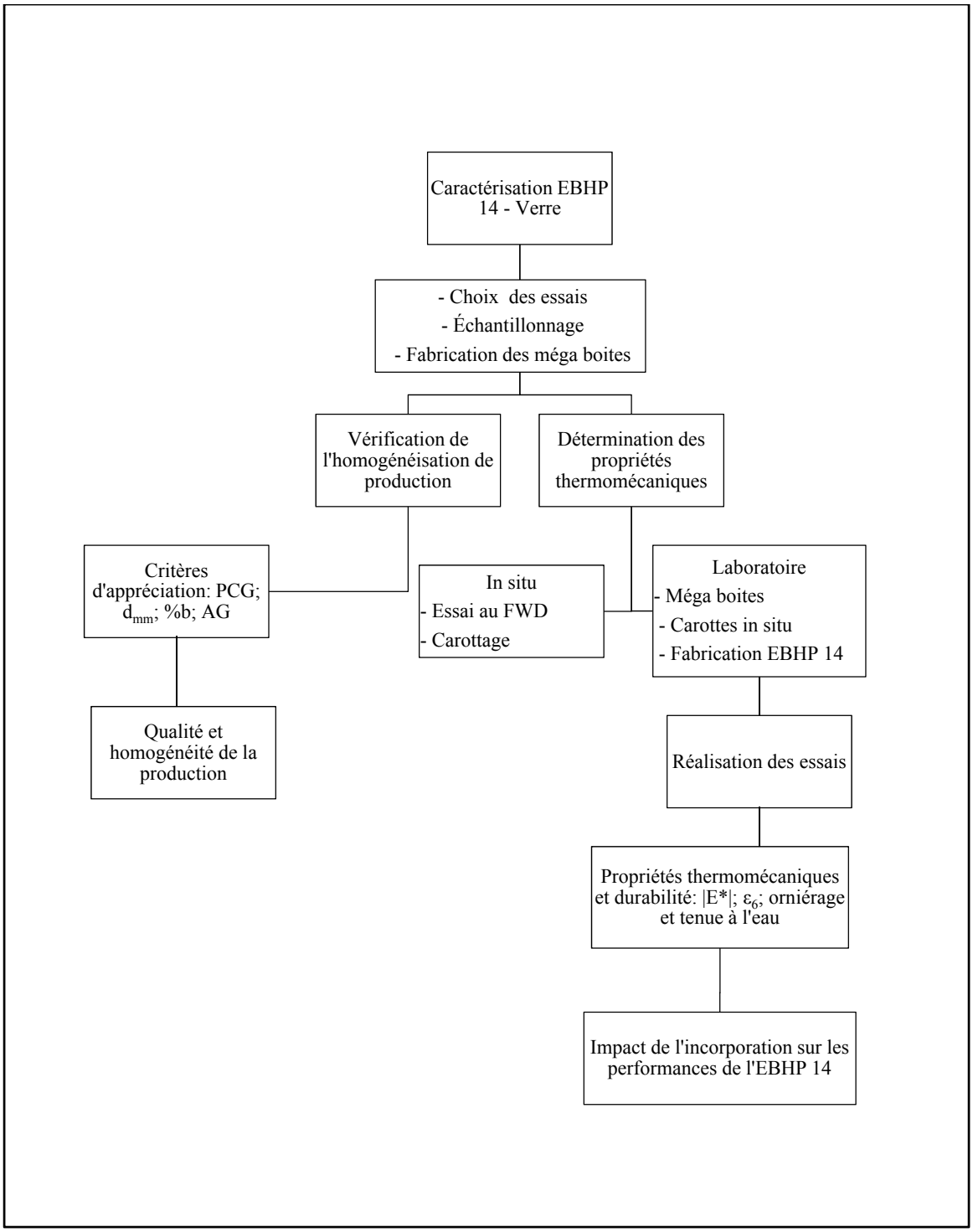


Figure 2.2 Étapes de caractérisation de l'EBHP 14 – Verre

CHAPITRE 3

MATÉRIAUX UTILISÉS, PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES ET MÉTHODES D'ESSAIS

Ce chapitre présente les matériaux utilisés pour la fabrication du mélange bitumineux en centrale d'enrobage. Une description est faite des différentes méthodes d'essai utilisées pour la caractérisation de la production. On retrouve également dans ce chapitre une présentation des éprouvettes confectionnées pour ce projet.

3.1 Description des matériaux utilisés pour la production du EBHP 14 – Verre

L'enrobé EBHP 14 – Verre est constitué d'un squelette granulaire et d'un bitume de type PG 76 – 28 THRD. Le squelette granulaire est composé de pierres concassées de calibre 10 – 14mm et de verres recyclés de trois différents calibres. Les pierres concassées sont produites par construction DJL, le verre recyclé est produit par la compagnie Tricentris et le bitume PG 76 – 28 THRD est fourni par Bitumar Inc. Les proportions massiques des différents constituants du mélange bitumineux EBHP 14 – Verre lors de la production en centrale sont :

- pierres concassées 10 – 14 : 71,9% ;
- verre recyclé : 24% ;

Sable C (14,9%)

- ✓ 0,630 – 2,500mm (10,1%)
- ✓ 0,315 – 0,630mm (4,8%)

Micronisé (filler de verre) (9,1%)

- bitume : 4,1%.

L'EBHP14 – Verre est formulé de sorte à maximiser le contact gros sur gros par optimisation du squelette granulaire. Ainsi, le verre recyclé (sable C et filler) ne joue que le rôle d'éléments de remplissage pour combler les vides entre les pierres sans interférer sur leurs agencements. Le mélange formulé est donc un enrobé avec des performances accrues liées au choix de chacun des éléments qui le composent.

3.1.1 Les granulats

Les granulats ayant servi à la production du mélange EBHP 14 – Verre sont de calibre 10 – 14. Les caractéristiques de ces granulats fournies par le producteur Construction DJL dont la fiche technique est présentée à l'annexe IX sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Caractéristiques du granulat calcaire
du EBHP14 – Verre

Classe granulaire	**10 – 14**	
Nature minéralogique		Calcaire
Densité brute (d_{gb})		2,729
Absorption en eau (%)		0,58
Granulométrie	**Tamis (mm)**	**% Passant**
	20	100
	14	88
	10	40
	5	12
	2,5	3,0
	1,25	2,0
	0,630	2,0
	0,315	2,0
	0,160	2,0
	0,080	1,4
Caractéristiques intrinsèques	Micro-Deval : MD (%)	14
	Los Angeles : LA (%)	22
	MD + LA (%)	36
	Indice de friabilité (%)	s.o
Caractéristiques de fabrication	% fragmentation	100
	% particules plates	19,9
	% particules allongées	23,1
Catégorie de granulat selon la norme BNQ 2560-114		1a

3.1.2 Le verre

Trois calibres de verre recyclé ont été utilisés pour la production de l'EBHP 14 – Verre. Le premier calibre (16/30) est constitué de la fraction 0,630 – 2,5mm. Le deuxième calibre de verre (30/90) est la fraction 0,315 – 0,630mm du squelette granulaire du mélange. La combinaison de ces deux calibres de verre donne le sable C qui constitue la classe intermédiaire du squelette granulaire. Le troisième calibre quant à lui est du verre micronisé qui est le filler du mélange bitumineux. Le Tableau 3.2 présente les caractéristiques et la compilation granulométrique des différentes fractions du verre recyclé utilisé à la production du mélange bitumineux.

Tableau 3.2 Caractéristiques du verre utilisé à la production du mélange

Classe granulaire	**A 0.315 – 0,630mm**	**B 0,630 – 2,5mm**	**Sable C (0,32A+0,68B)**	**Micronisé**
Nature minéralogique	Silice			
Densité brute (d_{gb})	2,511	2,511	2,511	2,560
Absorption en eau (%)	0,02	0,02	0,02	0,00
Tamis (mm)	**% passant**			
2,5	100	100	100	100
1,25	100	98,1	99	100
0,630	98,6	13,4	71,3	100
0,315	24,6	0,1	16,8	100
0,160	0,6	0	0,4	100
0,080	0	0	0	100

Le sable C représente la combinaison des classes granulaire (30/90) et (16/30) en proportion respective de 32% et 68%. Le tableau 3-3 présente la sédimentométrie du micronisé et du filler calcaire.

Tableau 3.3 Granulométrie par sédimentométrie
du micronisé et du filler calcaire

Tamis (µm)	Micronisé	Filler calcaire
	% Passant	% Passant
80	100	90
54	96	
39	87	70
29	79	70
19	64	54
11,7	46	41
8,6	33	35
6,2	23	29
4,5	14	17
3,1	8,0	
2,4	4,6	14
1,4	4,6	8,9

La distribution granulométrique des différentes classes (10 – 14mm, sable C et micronisé) ainsi que celle du mélange EBHP 14 – Verre et la courbe de masse volumétrique maximale (CMVM) sont représentées à la Figure 3.1.

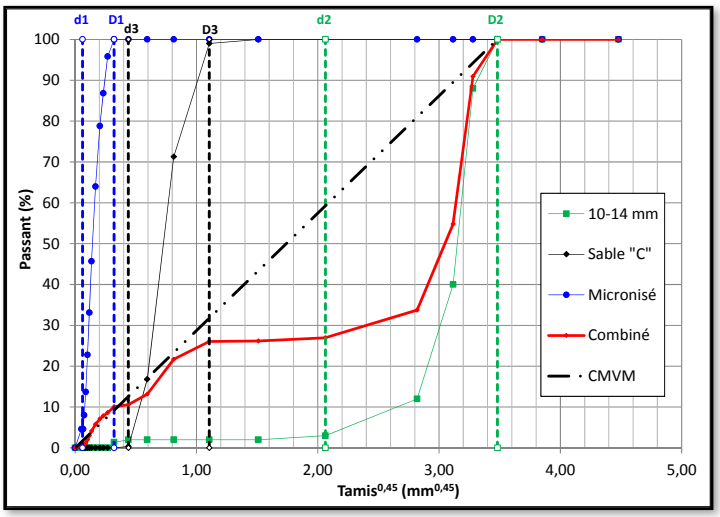


Figure 3.1 Courbes granulométriques des classes granulaires
de l'EBHP14-Verre

3.1.3 Le liant

Le liant utilisé pour la production du mélange est un bitume de grade PG 76 – 28 de très haute résistance au désenrobage (THRD) produit par la compagnie Bitumar Inc. C'est un produit réservé exclusivement pour la réalisation des pavages des routes. Il est à faible tension de vapeur et ne présente pas de risque en cas d'inhalation aux conditions ambiantes. Toutefois, porté à très haute température, l'inhalation des vapeurs de fumée peut présenter des risques pour la santé.

3.1.3.1 Composition du bitume de type PG 76 -28 THRD

Les principales composantes de ce liant dont la fiche technique est présentée en annexe X sont :

- des résidus (pétrole) ;
- bitumes oxydés ;
- soufre ;
- copolymère styrène butadiène ;
- agents d'allongement et ;
- des additifs.

3.1.3.2 Manipulation et entreposage

Selon la fiche signalétique de la compagnie Bitumar Inc, le PG 76 – 28 peut être transporté chaud. Cependant, il faut éviter tout contact avec la peau, les yeux et s'assurer que tout le matériel est mise à terre ou à masse. Au cours du transport ou durant l'entreposage, il peut avoir accumulation de sulfure d'hydrogène dans les espaces clos. De ce fait, l'ouverture des trappes, le jaugeage et la prise d'échantillon doivent être faits avec la plus grande précaution. De bonnes habitudes d'hygiène personnelles sont recommandées durant et après manipulation de ce produit pour éviter tous risques ingestion accidentelle. Le produit doit être entreposé à une température supérieure à la température ambiante pour faciliter le

pompage, mais inférieure au point d'éclair. Il faut dégager périodiquement les évents des toits afin de prévenir les dépôts de bitume provenant de l'accumulation des vapeurs.

3.1.3.3 Propriétés mécaniques, physiques et chimiques du bitume PG 76 -28 THRD

Le bitume est fourni avec une attestation de conformité qui présente les essais de caractérisation et de contrôle réalisés sur le produit. Le Tableau 3-4 présente en résumé les propriétés du bitume PG 76 – 28 THRD tirées de cette attestation.

Tableau 3.4 Caractéristiques du bitume PG 76 – 28 THRD (Bitumar Inc)

Caractérisation et contrôle	Valeur
TBA moyenne (˚C)	72
Point d'ébullition (˚C)	470
Pénétration (0,1 mm)	50 – 500
Viscosité Brookfield à 135 ˚C et 165 ˚C (Pa*s)	1,708 et 0,426
Recouvrance d'élasticité à 10 ˚C(%)	76,5
Température élevée de caractérisation (Te) (˚C)	79,7
Température basse de caractérisation (Tb) (˚C)	-33,7
Masse volumique à 15 ˚C et 25 ˚C (g/cm^3)	1,018 et 1,024
Variation de masse au RTFOT (%)	-0,595
Module de rigidité S (60) (MPa)	53,7
Teneur en cendre (%)	0,22

3.2 Description et procédures des essais

3.2.1 Détermination de la densité maximale de l'enrobé (d_{mm})

La densité maximale des enrobés bitumineux est un paramètre très important qui permet le calcul des quantités de matériaux nécessaires pour la réalisation de l'essai à PCG et pour la fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC. Mais aussi, c'est une donnée nécessaire pour le calcul des teneurs en vides des éprouvettes et plaques compactées en laboratoire. Deux essais de densité maximale ont été réalisés pour chacun des quatre méga boites de chaque camion selon la méthode LC 26 – 045 «Détermination de la densité maximale» du MTMDET.

Figure 3.2 Échantillons
pour l'essai de d_{mm}

3.2.2 Détermination de la teneur en bitume de l'enrobé

L'essai de détermination de la teneur en bitume des enrobés bitumineux permet de vérifier la quantité de bitume dans le mélange bitumineux. Deux méthodes normalisées permettent en laboratoire de déterminer la teneur en liant des enrobés. Au LCMB, la teneur en bitume des mélanges ont été déterminé selon la méthode LC 26 – 006 « Détermination de la teneur en bitume par ignition». Au laboratoire de Construction DJL, la teneur en bitume du mélange a

été déterminée par extraction selon la méthode LC 26 – 100 «Détermination de la teneur en bitume».

3.2.2.1 Détermination des facteurs de correction

Dans le cas de la détermination de la teneur en bitume à l'aide du four à ignition, il est nécessaire de déterminer des facteurs de correction qui permettent de prendre en compte la partie de granulat fin emportée par la ventilation au cours de l'essai. Les facteurs de correction ont été déterminés pour la teneur en bitume et pour la granulométrie. Ces facteurs ont été établis avant la réalisation des essais de détermination de la teneur en bitume par ignition selon la méthode LC 26 – 006. Ces facteurs de correction sont d'après la méthode d'essai LC propre à chaque type d'enrobé. De fait, les échantillons qui ont servis pour établir ces facteurs ont été fabriqués en laboratoire à partir des matériaux du mélange bitumineux à tester. Pour la granulométrie, les facteurs de correction sont établis aussitôt après les facteurs de correction pour le bitume. Pour ce projet, les facteurs de correction pour la granulométrie ont été déterminé selon la méthode LC 26 – 006. Pour une meilleure observation de l'effet du four à ignition sur la granulométrie du mélange bitumineux, un échantillon granulaire sans bitume ajouté a été testé au four (méthode d'ignition à blanc). Les résultats de la méthode d'ignition à blanc ont été par la suite pris en compte dans le calcul des facteurs de correction pour la granulométrie.

La méthode d'ignition à blanc consiste, lors de la détermination des facteurs de correction pour la teneur en bitume, de prévoir un combiné granulaire supplémentaire auquel ne sera pas ajouté de bitume. Ce combiné supplémentaire est par la suite brûlé au four à ignition dans les mêmes conditions qu'un essai de détermination de teneur en bitume. Les facteurs de correction sur la granulométrie sont déterminés selon la norme LC 26 – 006, mais en considérant aussi les résultats de ce combiné supplémentaire. Les facteurs de correction obtenus pour le bitume et la granulométrie sont par la suite appliqués aux résultats expérimentaux de ces deux méthodes d'essai. Les Tableaux 3-5 et 3-6 présentent les

différents facteurs de correction (Fcb) pour le bitume et pour la granulométrie (Fcg) établis dans le cadre de ce travail.

Tableau 3.5 Facteur de correction pour la teneur en bitume

EBPH 14 -SAQ	**Échantillons**		
	#1	**#2**	**#3**
Masse du bitume avant essai	59,2	59,1	59,1
Masse du bitume après essai	65,2	64,2	66,7
Masse échantillon	1597,5	1598,3	1596,5
Teneur en bitume non corrigée (%)	4,08	4,02	4,18
Moyenne des teneurs en bitume non corrigées (%)	4,09		
Teneur en bitume connue (%)	3,7		
Facteur de correction sur le bitume (Fcb)	-0,39		
Critères d'acceptabilité pour la teneur en bitume			
Écart type	D3S	Conformité	
0,08	0,16	CONFORME	

Tableau 3.6 Facteurs de correction pour la granulométrie

Tamis	**Témoin**	**% passant #1**	**% passant #2**	**% passant #3**	**% passant à blanc**	**Moy. % passant**	**Fcg**
28	100	100	100	100	100	100	0,00
20	100	100	100	100	100	100	0,00
14	91	89	89	93	91	90	-0,67
10	31	32	33	32	32	32	1,33
5	25	26	26	26	26	26	1,00
2,5	25	26	26	26	26	26	1,00
1,25	25	26	26	25	26	26	0,67
0,630	21	21	21	21	21	21	0,00
0,315	13	13	13	13	13	13	0,00
0,160	10	11	11	11	11	11	1,00
0,080	9,9	10,2	10,3	10,1	10,3	10,2	0,30

3.2.3 Fabrication des éprouvettes

3.2.3.1 Compactage des éprouvettes à la PCG

L'essai à la PCG, tel que réalisé au cours de ce projet, nous a permis de confectionner des briquettes avec des teneurs en vides ciblées et de valider l'ouvrabilité de l'EBHP14 – Verre. Au cours de l'essai, on suit l'évolution des vides dans l'éprouvette à l'essai. L'essai est arrêté une fois que la teneur en vides ciblée est atteinte. Le compactage a été réalisé suivant la méthode d'essai LC 26 – 003 «Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire». Des carottes ont été par la suite extraites des briquettes afin de servir pour la réalisation des essais de module complexe et de résistance à la fatigue. La figure 3.3 montre une briquette compactée à la PCG et une éprouvette extraite de cette briquette.

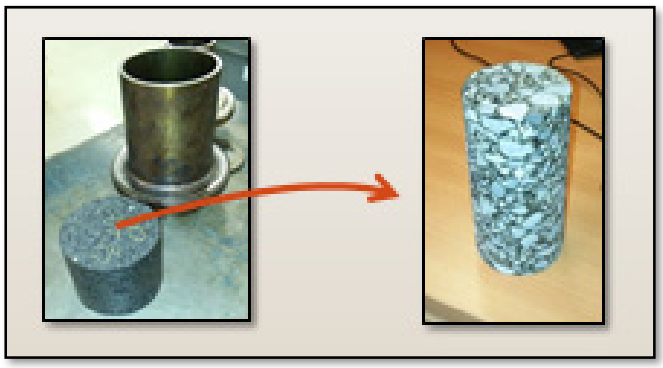


Figure 3.3 Briquette de 150mm compactée à la PCG et éprouvette de 75mm de diamètre extraite par carottage

Le Tableau 3.7 présente un exemple des résultats des essais sur les échantillons C2 et C3. On retrouve dans ce tableau les nombres de girations (Ng), l'évolution de la hauteur des éprouvettes en cours d'essai en fonction du Ng, les pourcentages de vides des éprouvettes ainsi que l'écart de vides entre les éprouvettes des deux échantillons.

Tableau 3.7 Exemple de résultats de PCG de l'EBHP14-verre

Particularités relatives à l'essai			Ng	H (C2)	H (C3)	%Vide C2	%Vide C3	D2S	norme	Accept.
			10	182,3	184,8	17,7	18,8	1,1	≥11,0	conforme
Enrobé	:	EBHP14	20	156,1	162,7	3,9	7,8	3,9		
Classe de bitume	:	PG76-28	40	-	159,1	-	5,7	-		
Teneur en liant (Pb)	:	4,11 et 3,83	60	-	157,5	-	4,8	-	4,0-7,0	conforme
Densité maximale	:	2,525 et 2,507	80	-	156,5	-	4,2	-		

3.2.3.2 Éprouvettes pour les essais de module complexe, fatigue et tenue à l'eau

Deux types d'éprouvettes cylindriques ont été confectionnés à la PCG pour réaliser les essais thermomécaniques et de durabilité. Le tableau 3-8 présente les caractéristiques des différentes briquettes compactées à la PCG.

Tableau 3.8 Caractéristiques des briquettes compactées à la PCG

Type de briquettes	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	Teneur en vides ciblée	Essais
Type 1	150	150	4%	Module complexe et fatigue
Type 2	100	50	8%	Tenue à l'eau

Les briquettes compactées à la PCG pour les essais de module complexe et fatigue sont de dimension 150mm de hauteur et 150mm de diamètre avec une teneur en vide ciblée de 4%. Des éprouvettes de 74mm de diamètre et de hauteur comprise entre 120 et 140mm ont été par

la suite extraites de ces briquettes par carottage. Après le carottage, les éprouvettes sont rectifiées par sciage dans un premier et ensuite par polissage afin de rendre les deux faces planes lisses et parallèles. Les éprouvettes pour la tenue à l'eau sont issues directement d'une PCG sans carottage ultérieur.

Afin de déterminer par calcul la teneur en vides des éprouvettes, on relève leurs dimensions ainsi que leur masse. La méthode de pesée hydrostatique est utilisée de même pour déterminer la compacité des éprouvettes. Mais avant de relever les dimensions et les masses des éprouvettes, juste avant le carottage, on prépare un bac de sable dans lequel reposeront ces éprouvettes tout au long des manipulations. Le lit de sable permet d'éviter et de limiter les phénomènes de fluage des éprouvettes. Avant la réalisation des essais de MC et fatigue, des casques en aluminium ont été collés sur les faces planes de chaque éprouvette.

3.2.3.3 Collage des casques sur les éprouvettes

Le collage des casques sur les éprouvettes se déroule en deux étapes. La première consiste à coller un casque sur une face à l'aide d'un banc prévu à cet effet. C'est une opération délicate, car il faut s'assurer de ne causer aucun dommage à l'éprouvette et de bien aligner le casque et l'éprouvette. Les casques sont collés à l'éprouvette à l'aide d'une colle à l'époxy. Les quantités de colle nécessaire pour l'opération sont définies suivant le diamètre des éprouvettes.

La seconde étape est le collage du deuxième casque sur l'autre face de l'éprouvette directement sur la presse hydraulique. Cette étape permet un alignement parfait de l'éprouvette avec l'axe du vérin et limite les torsions à la tête de l'éprouvette au cours du serrage du casque sur la presse hydraulique. Pour réaliser le collage sur presse, il faut en avoir fini avec l'installation de l'éprouvette dans la chambre de la presse hydraulique, c'est-à-dire le positionnement des différents capteurs (3 extensomètres et 3 sondes de températures). Par la suite, une partie de la colle est appliquée sur le casque avant son serrage sur le vérin de la presse. Le restant de la colle est appliqué sur la tête de l'éprouvette. Le

vérin est descendu pour assurer un léger contact entre le casque et l'éprouvette avant la fermeture de la porte de la chambre de la presse hydraulique.

3.2.3.4 Compactage des plaques au compacteur LCPC

Les plaques servant à la réalisation de l'essai d'orniérage sont de dimension 400mm de largeur, 600mm de longueur et 100mm d'épaisseur. Quatre plaques ont été confectionnées, deux pour chaque lot d'échantillon C2 et C3, à l'aide du compacteur LCPC. La confection des plaques a été réalisée suivant la méthode d'essai LC 26 – 400 «Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC» du MTMDET.

Figure 3.4 Compacteur de plaque LCPC du LCMB

3.2.3.5 Détermination de la teneur en vides des plaques

La détermination de la teneur en vide des plaques passe par la détermination de la densité brute de la plaque compactée. Après fabrication de la plaque au compacteur LCPC, l'essai de détermination de la densité brute est réalisé après une période de mûrissement de 24h environ suivant la méthode d'essai LC 26 – 040 «Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés». La teneur en vides des plaques est obtenue par la suite par calcul. Le pourcentage de vides des plaques est une donnée importante pour l'interprétation des résultats de l'essai de résistance à l'orniérage. La Figure 3.5 présente une photo de la pesée hydrostatique d'une plaque d'orniérage.

Figure 3.5 Photo illustrant la pesée hydrostatique
d'une plaque

3.2.4 Essai de résistance à l'orniérage

L'essai de résistance à l'orniérage permet de déterminer le comportement à la déformation permanente des enrobés bitumineux soumis à une charge roulante. L'essai est réalisé en laboratoire à l'aide de l'orniéreur MLPC de la Figure 3.6 sur une plaque d'enrobé compactée au compacteur LCPC suivant la méthode LC 26 – 410 «Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage». L'essai se déroule à une température de 60 ˚C, mesurée à l'aide d'une sonde placée au cœur dans une des deux plaques à l'essai.

Figure 3.6 Orniéreur LCPC du LCMB

La profondeur des ornières est relevée périodiquement suivant le nombre de cycles sur plusieurs points tel qu'illustré à la Figure 3.7.

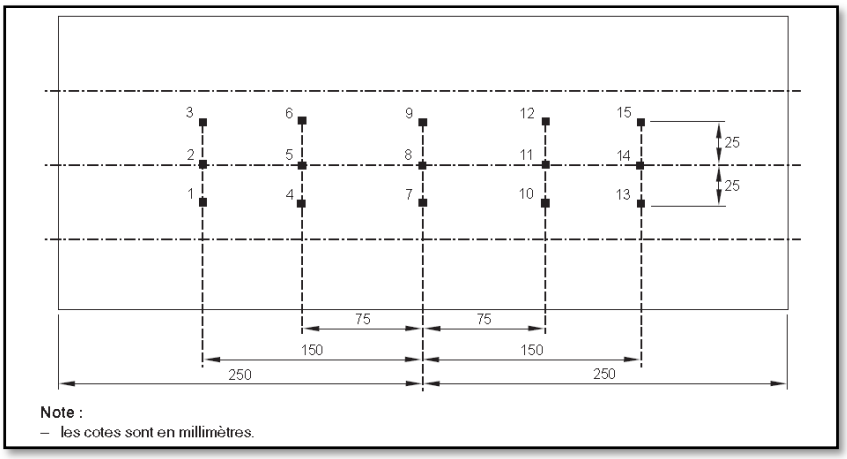


Figure 3.7 Localisation des points de mesurages des ornières
Tirée de la méthode d'essai LC 26-410

Les exigences pour les enrobés bitumineux standard du MTMDET sont inscrit dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.9 Exigences relatives à la résistance à l'orniérage
Tiré de Lachance Tremblay (2014)

Type d'enrobé		**Couche de base**	**Couche de surface**
Épaisseur des plaques (mm)		100	50
Profondeur moyenne des ornières (%)	1 000 cycles	S.O.	≤ 10
	3 000 cycles	S.O.	≤ 20
	30 000 cycles	≤ 10	S.O.

3.2.5 Essai de module complexe et module de rigidité

Les essais de module complexe de l'EBHP 14 – Verre ont été réalisés sur des éprouvettes de PCG fabriquées en laboratoire à partir des méga boites (MB). Sur les éprouvettes prélevées sur le site de la SAQ, des essais de module de rigidité ont également été réalisés en traction indirecte. Pour les éprouvettes fabriquées en laboratoire, les modules complexes ont été déterminés en soumettant ces éprouvettes à des sollicitations cycliques sinusoïdales de traction-compression dans le domaine des petites déformations selon la méthode d'essai LC 26 – 700. Quant aux éprouvettes prélevées in situ, elles ont été testées en traction indirecte suivant la norme NF EN 12697-26.

3.2.5.1 Essai sur les éprouvettes de PCG fabriquées en laboratoire

Les essais se sont déroulés en sollicitation imposée de contrôle de déplacement selon la procédure du LCMB. Comme mentionné précédemment, les éprouvettes testées au cours des essais ont été obtenues par carottage des briquettes compactées à la PCG. Les différentes composantes du module complexe dépendent de la température et de la fréquence de sollicitation. Les paramètres d'essai sont présentés au Tableau 3.10.

Tableau 3.10 Paramètre d'essai de module complexe
selon la méthode d'essai LC 26 – 700

Paramètres	**Mesures**
Hauteur des éprouvettes (mm)	120 – 140
Diamètre des éprouvettes (mm)	75 ± 5
Températures d'essais (°C)	-35; -25; -15; -5; 5; 15; 25; 35
Fréquences d'essais (Hz)	0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10

L'essai de détermination du module complexe est réalisé sur des éprouvettes cylindriques à l'aide de la presse hydraulique MTS du LCMB. La figure 3.7 montre une éprouvette montée dans la presse MTS pour un essai de module complexe.

Figure 3.8 Illustration d'une éprouvette
montée dans la presse pour
un essai de module complexe

3.2.5.2 Équipement utilisé pour la réalisation de l'essai de module complexe

La presse hydraulique MTS utilisée pour détermination les modules complexes de l'EBHP14 – Verre possède une cellule de chargement de 50 KN, une enceinte thermique qui permet d'assurer le contrôle des températures d'essai, un capteur de force, trois extensomètres de 50mm de longueur pour les essais de traction – compression et deux extensomètres de 115mm de longueur pour les essais de traction indirecte, trois capteurs de température de précision 0,1˚ C. Un ordinateur permet de contrôler le bon déroulement des essais et effectue l'acquisition des données.

3.2.5.3 Modélisation des résultats de l'essai

Les résultats des essais de module complexe en traction - compression ont été modélisés à l'aide du modèle rhéologique 2S2P1D développé à l'université de Lyon/ENTPE. Ce modèle permet une meilleure modélisation du comportement en petites déformations des enrobés bitumineux. Des solvers Excel développés au LCMB permettent l'analyse des résultats expérimentaux et mettent en œuvre le modèle 2S2P1D. Une présentation du modèle et ses différents paramètres a été faite au chapitre 1 de ce mémoire. Les résultats des essais de traction indirecte n'ont pas été modélisés avec le modèle rhéologique. Ces résultats ont été analysés à l'aide d'un solver Excel développé au LCMB.

3.2.5.4 Essai de module de rigidité par traction indirecte

Pour les carottes prélevées sur le chantier, les modules de rigidité ont été déterminés par l'essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques selon la norme NF EN 12697-26. Des briquettes de 150mm de diamètre ont été prélevées in situ dans la chaussée. De ces briquettes, nous avons extrait des éprouvettes dont les caractéristiques sont présentées au Tableau 3-11 des paramètres d'essai. Deux différents types d'essais de traction indirecte ont été réalisés sur ces éprouvettes. Dans un premier temps, l'essai a été réalisé selon l'option 1 correspondante à l'annexe C de la norme NF EN 12697-26. La sollicitation de l'éprouvette selon cette option est en contrôle de force imposée par pulsation. Par la suite, l'option 2

(Annexe F) de cette même norme a été utilisée pour déterminer les modules de rigidité des mêmes éprouvettes. Cette option permet un chargement cyclique sinusoïdal de l'éprouvette testée.

Tableau 3.11 Paramètres d'essai de module de rigidité pour les éprouvettes prélevées in situ

Paramètres	**Mesures**	
	Option 1	**Option 2**
Hauteur des éprouvettes (mm)	30 – 75	40 ± 2
Diamètre des éprouvettes (mm)	100 ± 5	100 ± 5
Températures d'essais (°C)	-10; 0; 10	-10; 0; 10; 20
Fréquences de sollicitation (Hz)	---	10; 5; 1; 0,1
Force de contact (N)	50 à 250	---
Force de cycle (N)	1 500 à 8 000	---

La fréquence de sollicitation de l'éprouvette lorsque l'essai se déroule selon l'option 1 n'est pas donnée directement. Elle est déterminée ultérieurement à l'aide de l'équation (3.3) tirée de Olard, Noël et Loup (2006).

$$t \approx \frac{1}{2\pi * f} \tag{3.1}$$

t étant le temps de sollicitation en seconde, et

f la fréquence de sollicitation en hertz.

La force de contact pour l'option 2 est calculée en considérant l'épaisseur de l'éprouvette testée et la largeur de la bande de chargement. La force de sollicitation cyclique est déterminée de sorte que la déformation horizontale au centre de l'éprouvette soit comprise entre 5‰ et 10‰ du diamètre de l'éprouvette. Les éprouvettes testées en traction indirecte sont montrées à la Figure 3.8. Elles sont obtenues par carottage des briquettes prélevées in situ, rectifiées par sciage et polissage.

Figure 3.9 Éprouvettes extraites des carottes in situ
pour les essais de module de rigidité

Après les essais selon l'annexe C de la norme NF EN 12697-26, ces éprouvettes ont été une nouvelle fois rectifiées afin d'obtenir des épaisseurs proches de la valeur normalisée pour l'option 2. Les essais de traction indirecte ont aussi été réalisés à l'aide de la presse hydraulique MTS. La Figure 3.9 permet de visualiser le montage de l'éprouvette dans la presse MTS pour la réalisation de l'essai.

Figure 3.10 Illustration d'une éprouvette montée dans la presse pour un essai de module de rigidité

Tel qu'indique au Tableau 3.11, les essais selon l'annexe C (option 1) ont été réalisés à trois différentes températures en faisant varier les forces de sollicitation de façon à obtenir une formation diamétrale de 5 ±2µm de l'éprouvette. Par contre les essais selon l'annexe F de la norme NF EN 12697-26 (option 2) ont été réalisés pour une seule température (10 ˚ C) et une fréquence (10 Hz). L'essai pouvant toutefois être réalisé suivant les conditions du Tableau 3.11.

3.2.6 Essai de résistance à la fatigue

L'essai de résistance à la fatigue consiste à solliciter de façon répétée une éprouvette en vue de déterminer sa durée de vie. L'essai est réalisé sur une série d'éprouvettes afin d'établir la loi de fatigue du matériau en traçant la courbe de Wöhler. Cette loi permet de décrire la durée de vie du matériau suivant l'amplitude de sollicitation (Perraton, 2015). Les essais ont été réalisés selon la procédure développée au LCMB en sollicitation imposée de contrôle de déformation sur des éprouvettes cylindriques. Les amplitudes de déformation varient d'une

éprouvette à l'autre. Cependant, tous les essais sont réalisés pour une même température (10 ˚C) et une même fréquence (10 Hz). Les équipements nécessaires à la réalisation d'un essai de fatigue sont les mêmes que ceux utilisés pour la réalisation d'un essai de module complexe en traction – compression.

3.2.6.1 Critères de rupture

Les différentes éprouvettes testées atteignent la fatigue lorsqu'à apparait la macro fissure responsable de la rupture de l'éprouvette. L'objectif de l'essai de fatigue est donc de déterminer le moment précis où apparait cette macro fissure dans l'éprouvette d'enrobé. Ainsi, des critères d'analyse ont été définis afin d'identifier très précisément l'instant de rupture. Les différents critères de rupture utilisés pour l'analyse des résultats des essais de fatigue dans le cadre de cette recherche sont :

- critère classique ($Nf_{50\%}$);
- critère de transition entre les phases II et III ($Nf_{II/III}$) qui comprend les sous critères écarts des extensomètres ($Nf_{\Delta ext}$) et angle de phase maximum ($Nf_{max\phi}$).

Une description de chacun ces différents critères d'analyse est présentée à la section § 1.5.3 de ce travail.

3.2.6.2 Indices de qualité des signaux

Les indices de qualité des signaux de contraintes et des déformations mesurées par les extensomètres sont nécessaires pour juger de la qualité de l'essai. L'indice de qualité (IQ) de chaque signal est calculé par la méthode des moindres carrés en considérant 200 points expérimentaux, soit 2 cycles de sollicitation (Lamothe, 2014). L'équation 3.4 permet le calcul de cet indice.

$$IQ\ (\%) = \left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\left|X_k^m - X_k^c\right|}{X_A}\right) * 100 \tag{3.2}$$

Où

n = Nombre de points analysés (200 points)

X^m = Grandeur mesurée au point d'acquisition

X^c= Grandeur calculée à l'aide de la fonction sinusoïdale au point d'acquisition

X_A= Amplitude du signal

3.2.7 Tenue à l'eau

L'essai de tenue à l'eau, ou stabilité conservée, permet de vérifier la sensibilité de perte de résistance à l'eau des enrobés soumis à un vieillissement accéléré par trempage. Dans le cadre de ce projet, le vieillissement accéléré des éprouvettes incluant un cycle gel – dégel a été réalisé selon la méthode d'essai AASHTO T283 – 03 «Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture – induced damage». Les éprouvettes d'essai ont été fabriquées par compactage à la PCG selon la méthode d'essai LC 26-003 en utilisant un moule de diamètre 100mm. La quantité de matériau nécessaire pour la fabrication des éprouvettes de 100mm de diamètre avec une hauteur de 50mm en ciblant une teneur en vides de 8% après compactage. En cours d'essai, on suit l'évolution de la hauteur, une fois la hauteur de 50 ±0,2mm atteint l'essai est stoppé. L'éprouvette ainsi obtenue possède un pourcentage de vides avoisinant les 8% ciblé.

La norme AASHTO T283 – 03 recommande un minimum de six (6) éprouvettes pour l'essai qui seront séparées en deux lots de trois éprouvettes dont un lot est testé à sec et le second lot est testé après avoir subi un cycle gel-dégel. Les Figures 3.10 a et b montrent respectivement la saturation des éprouvettes dans le vacuum pour le cycle gel-dégel et l'écrasement à la presse ITS d'une éprouvette.

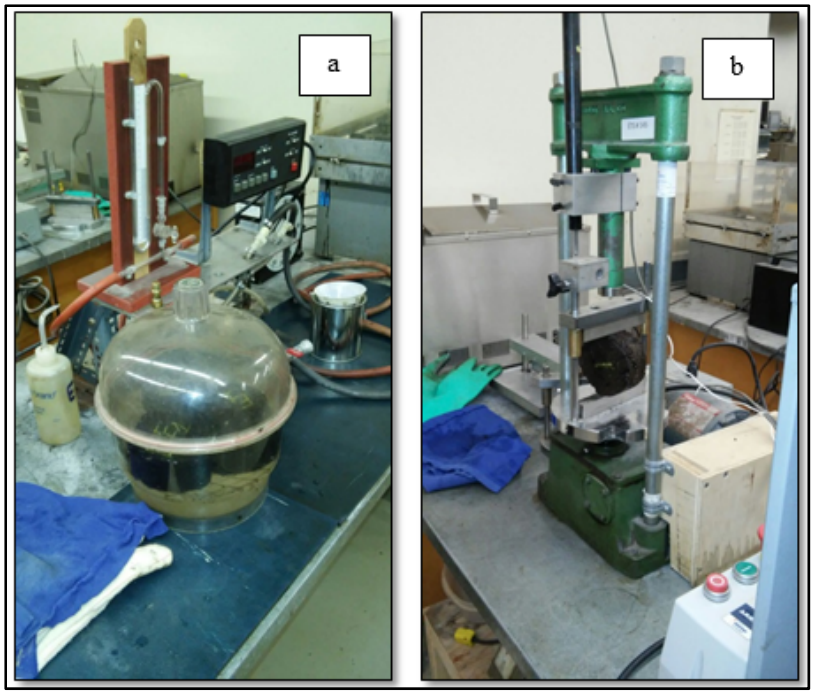


Figure 3.11 Essai de tenue à l'eau a) saturation des éprouvettes pour le cycle gel-dégel b) essai ITS sur une éprouvette

Pour ce projet, six (6) éprouvettes ont été fabriquées pour l'échantillon C2 tel que recommandé par la norme. Cependant pour l'échantillon C3, ne disposant plus de suffisamment de matériaux bitumineux, seules cinq (5) éprouvettes ont été fabriquées. Trois de ces éprouvettes ont subi le vieillissement accéléré au cycle gel-dégel et les deux restantes ont été testées à sec.

Lors de la saturation, certaines des éprouvettes n'ont pas pu atteindre les 70% de degré de saturation comme recommandé par la norme. Malgré plusieurs passages au vacuum, le degré de saturation de ces éprouvettes est resté constant. Ils ont donc subi le cycle gel – dégel avec une saturation inférieure à la recommandation de la norme. Les Tableaux 3.12 et 3.13 présentent les résultats de saturation des différentes éprouvettes testés lors des essais de tenue à l'eau.

Tableau 3.12 Résultats du degré de saturation des éprouvettes de l'échantillon C2

Épr.	A	B'	J'	% de vide	D (mm)	H (mm)	V éch. (cm^3)	% Vi	Va vide (cm^3)	S'
C2-MB1	906,2	910,0	3,8	1,38	99,87	49,53	388,02	6,57	5,34	71,19
C2-MB2	904,3	909,0	4,7	2,17	99,84	49,52	387,71	6,69	8,41	55,87
C2-MB3	904,2	909,6	5,4	2,07	99,89	49,69	389,43	7,11	8,08	66,85

Tableau 3.13 Résultats du degré de saturation des éprouvettes de l'échantillon C3

Épr.	A	B'	J'	% de vide	D (mm)	H (mm)	V éch. (cm^3)	% Vi	Va vide (cm^3)	S'
C3-MB1	913,1	919,8	6,7	2,77	99,89	49,65	389,04	6,77	10,76	62,27
C3-MB2	914,9	923,2	8,3	2,99	99,93	49,71	389,85	6,78	11,66	71,17
C3-MB3	911,6	920,2	8,6	3,03	99,88	49,62	388,81	6,87	11,78	73,00

A : masse sec à l'air ;

B' : masse saturée sec à la surface (sss) à l'air ;

J' : volume d'eau absorbé ;

Va : volume des vides d'air ;

%Vi : pourcentage de vide méthode volumétrique ;

S' : taux de saturation en %.

On remarque dans les tableaux 3.12 et 3.13 que trois éprouvettes n'atteignent pas les 70% de saturation exigés malgré plusieurs passage au vacuum. Cela pourrait être lié aux vides sur les faces des éprouvettes.

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION, DISCUSSION ET ANALYSE DES RÉSULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE

Ce chapitre présente la deuxième phase des travaux de cette maîtrise. Il traite principalement des essais en laboratoire qui ont permis de déterminer les caractéristiques de l'enrobé mise en œuvre lors de la réalisation de la planche d'essai SAQ. Les résultats des essais et l'analyse des résultats des caractéristiques volumétriques des mélanges, dont la densité maximale (d_{mm}), la teneur en bitume (%b), la granulométrie et l'aptitude au compactage à la PCG a permis de déduire la qualité de la production. Sont également présentés dans ce chapitre les résultats des essais thermomécaniques et de durabilité réalisés dans ce projet. Les performances en laboratoire tirées des essais d'orniérage, de module complexe et la fatigue des mélanges ont été discutées, analysées et validées à l'aide des résultats obtenus en laboratoire sur les éprouvettes prélevées directement dans la chaussée.

4.1 Les essais en laboratoire

Les différents essais réalisés sur l'EBHP14 – Verre dans le cadre de ce projet sont listés au Tableau 2-2 du chapitre 2. Les résultats de ces essais sont présentés dans cette section.

4.2 Densité maximale du mélange bitumineux

Le Tableau 4-1 présente les résultats des essais de densité maximale des deux lots d'échantillon. On retrouve dans ce tableau, les numéros des boites testées, le nombre d'essais par boite, les résultats des essais, la moyenne des résultats par boite et l'écart entre deux résultats de la même boite. Aussi, on retrouve dans le Tableau 4.1, l'exigence du MTMDET (D2S) par rapport à l'essai de d_{mm} et l'écart obtenu entre deux essais de la même boite doit être conforme à cette exigence.

Tableau 4.1 Résultats des essais de d_{mm}

Camion #	Boites #	Essais	d_{mm}	d_{mm} moyen	D2S (x ≤0,011)
C2	8	1	2,506	2,504	0,004
		2	2,502		
	9	1	2,495	2,492	0,006
		2	2,489		
	Plaque :PL.A1(2)	1	2,512	2,507	0,011
	Plaque :PL.A2(2)	2	2,501		
	MB1(1)	1	2,499	2,499	0,000
		2	2,499		
	MB2(1)	1	2,510	2,507	0,007
		2	2,504		
	MB3(1)	1	2,497	2,497	0,000
		2	2,497		
	MB4(1)	1	2,502	2,502	0,001
		2	2,501		
C3	6	1	2,513	2,513	0,001
		2	2,512		
	Plaque :PL.B1(2)	1	2,528	2,535	0,013
	Plaque :PL.B2(2)	2	2,541		
	MB1(1)	1	2,516	2,519	0,005
		2	2,521		
	MB2(1)	1	2,521	2,516	0,011
		2	2,510		
	MB3(1)	1	2,518	2,517	0,002
		2	2,516		
	MB4(1)	1	2,526	2,525	0,002
		2	2,524		

(1) fabriqué avec de 6 boites ;

(2) plaque fabriqué avec 3 boites

Les résultats des essais de d_{mm} inscrit dans le Tableau 4-1 montrent des écarts entre deux essais des échantillons variant de 0,000 à 0,013. Selon la méthode d'essai LC 26 – 045, l'intervalle d'acceptation de 2 résultats (D2S) est de 0,011. Nous remarquons que la valeur de l'écart maximum est de 0,013. Cette valeur ne respecte les exigences de la norme. Toutefois,

seuls les résultats des méga boites fabriquées en laboratoire sont retenus pour les analyses et les calculs. La Figure 4.1 présente les résultats des essais de d_{mm} des méga boites retenues et permet une meilleure visualisation des différents écarts. En ordonnée, on a la d_{mm} et en abscisse, les différentes méga boites.

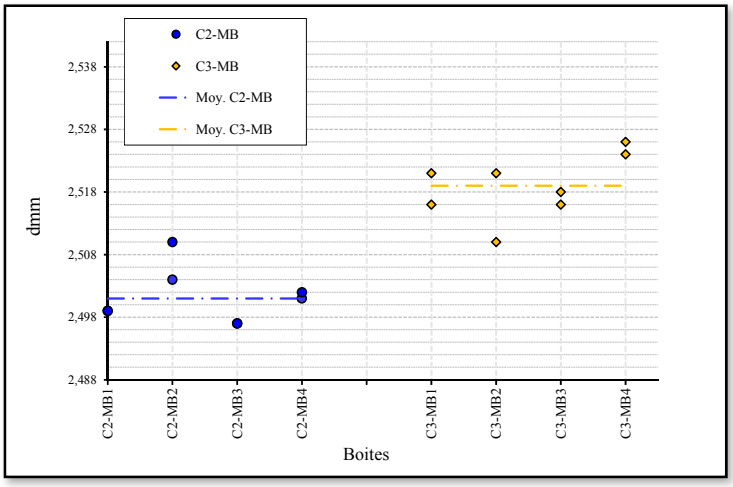


Figure 4.1 Résultats des essais de d_{mm}

La valeur de la densité maximale du mélange (d_{mm}) retenue pour chaque lot d'échantillon est présentée au Tableau 4-2. Nous avons choisi la valeur maximale moyenne de deux essais obtenue pour les échantillons des méga boites et dont l'écart est conforme à la norme. Ce sont ces deux valeurs retenues qui ont été utilisées dans tous les calculs faisant intervenir la densité maximale de l'enrobé.

Tableau 4.2 d_{mm} retenue pour chaque d'échantillon

Camion #	**s**	$\bar{X}$	$\bar{X}_{min}$	$\bar{X}_{max}$	**d_{mm} retenu**	**Écart**
C2	0,004	2,501	2,497	2,507	2,507	0,018
C3	0,005	2,519	2,516	2,525	2,525	

s est l'écart type des résultats de d_{mm} des méga boites, $\bar{X}$ est la moyenne des mêmes résultats, $\bar{X}_{min}$ et $\bar{X}_{max}$ sont les limites des valeurs moyennes des deux résultats de la même méga boite.

Les critères d'acceptabilité des résultats de d_{mm} sont présentés à la Figure 4.2. La valeur de l'écart entre les deux lots d'échantillon est de 0,018. Cette valeur est supérieure à 0,011 donc ne respecte pas les exigences de la norme. Ce qui signifie que les essais n'ont soit pas été réalisés avec rigueur ou que les échantillons ne proviennent pas d'un même mélange.

Tableau 4
Critères d'acceptabilité

1		2	3
Conditions d'essai		**Écart type (IS)**	**Intervalle d'acceptation de 2 résultats (D2S)**
Sans le mode opératoire de l'article 8.4 c)[1]	Répétabilité (un seul opérateur)	0,0040	0,011
	Reproductibilité (plusieurs laboratoires)	0,0064	0,019
Avec le mode opératoire de l'article 8.4 c)[2]	Répétabilité (un seul opérateur)	0,0064	0,018
	Reproductibilité (plusieurs laboratoires)	0,0193	0,055

1. Ces chiffres sont fondés sur des essais exécutés en triple sur 5 matériaux, dans 5 laboratoires.
2. Ces chiffres sont fondés sur des essais exécutés en double sur 7 matériaux, dans 20 laboratoires.

Figure 4.2 Critères d'acceptabilité pour la d_{mm}
Tirée de la norme LC 26 045

4.3 Teneur en bitume des mélanges

La teneur en bitume cible de formulation de l'EBHP 14 – Verre est de 4,10% de la masse du mélange. Lors de la caractérisation du mélange produit en usine nous avons vérifié la teneur en bitume de chaque lot de matériaux échantillonné lors la réalisation de la planche d'essai SAQ. Les teneurs en bitumes ont été déterminés par la méthode LC 26 – 006 « Détermination de la teneur en bitume par ignition » au LCMB et par la méthode LC 26 – 100 « Détermination de la teneur en bitume » au laboratoire de DJL. Les résultats des deux méthodes d'essai sont inscrits dans le Tableau 4-3. En annexe VI, on retrouve en détail les résultats des essais d'extraction réalisés au laboratoire DJL.

Tableau 4.3 Résultats des teneurs en bitume (b_{cible} = 4,10%, Fcb = -0,39)

Essais	Laboratoires	Éch.	Boites #	% bitume	Moyenne	Écart
Four à ignition	LCMB	C2	B8	4,07	4,10	0,07
			B9	4,14		
			PL.B1	3,92	4,02	0,13
			PL.B2	4,11		
			MB1	4,10	4,11	0,04
			MB2	4,15		
			MB3	4,06		
			MB4	4,12		
		C3	B6	3,89	-	-
			PL.C1	3,64	3,70	0,06
			PL.C2	3,76		
			MB1	3,69	3,83	0,10
			MB2	3,85		
			MB3	3,86		
			MB4	3,93		
Extraction	DJL Jarry	C2	MB1/DJL – A	3,91	4,11	0,40
			MB4/DJL – A	4,31		
	DJL St-Patrick		MB2/DJL – B	4,10	4,11	0,02
			MB3/DJL – B	4,12		
	DJL Jarry	C3	MB1/DJL – A	3,44	3,53	0,17
			MB4/DJL – A	3,61		
	DJL St-Patrick		MB2/DJL – B	3,97	3,99	0,03
			MB3/DJL – B	4,00		

Du Tableau 4.3, on constate des écarts entre les différents résultats de teneur en bitume des deux lots d'échantillon. La teneur en bitume des échantillons du camion 2 est de 4,11% en moyenne. Pour le camion 3, la teneur en bitume moyenne des échantillons est de 3,83%

4.3.1 Résultats et discussion de la teneur en bitume selon la méthode au four à ignition (LCMB)

Les résultats des essais de teneur en bitume pour la méthode d'essai du four à ignition (LCMB) sont représentés à la figure 4.3.

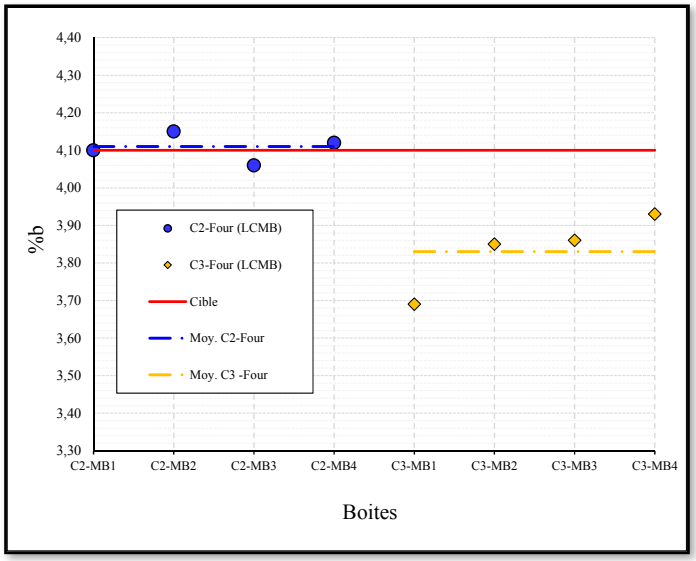


Figure 4.3 Résultats teneur en bitume des méga boites par la méthode du four à ignition (LCMB)

On constate à partir de la Figure 4.3 des écarts entre les échantillons testés. L'écart entre les résultats des méga boites du camion C2 est de 0,04%. Cet écart est de 0,10% pour les méga boites du camion C3. L'intervalle d'acceptation de 2 résultats (D2S) selon la méthode d'essai LC 26 – 006 « Détermination de la teneur en bitume par ignition » est de 0,196%. Les écarts respectent cette exigence.

On constate également qu'il existe un écart entre les deux camions. La ligne rouge de la Figure 4.3 représente la valeur de la teneur en bitume ciblée à la formulation. Les échantillons du camion C2 atteignent cette cible. Par contre, la teneur en bitume des échantillons du camion C3 sont inférieure à la cible. Les deux camions n'ont donc pas la même teneur en bitume. L'écart entre ces deux camions est de 0,28%.

4.3.2 Résultats et discussion de la teneur en bitume par la méthode d'extraction (Laboratoire DJL)

Les résultats des essais de teneur en bitume pour la méthode d'essai par extraction (DJL) sont représentés à la figure 4.4.

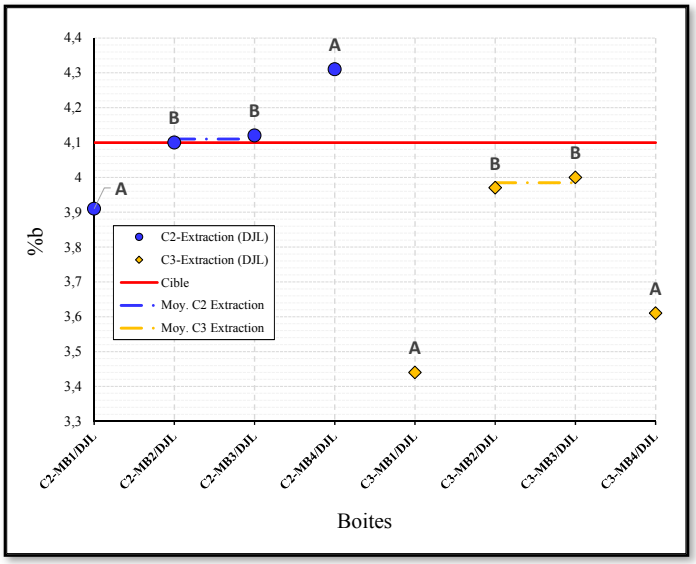


Figure 4.4 Résultats teneur en bitume des méga boites par la méthode d'extraction (DJL)

Par la méthode par extraction (DJL), on note des teneurs en bitume de 4,11% pour les échantillons C2 et 3,99% pour les échantillons C3. Les écarts entre les résultats des essais étant de 0,02 et 0,40% pour le camion C2. Pour les échantillons C3, les écarts sont de 0,03 et 0,17%. L'intervalle d'acceptation de 2 résultats (D2S) selon les méthodes d'essai LC 26 – 100 « Détermination de la teneur en bitume » est de 0,25% (un opérateur) pour cette méthode. Ainsi, l'écart de 0,40 de la méthode par extraction du laboratoire DJL Jarry ne sera pas exploité dans l'analyse des résultats. Bien que cet écart soit considérable, on obtient le même résultat que le résultat du laboratoire DJL St-Patrick et le résultat de la méthode par ignition.

En prenant en compte uniquement les résultats du laboratoire DJL St – Patrick (représentés à la Fig.4.4 par les points B – B) dans l'analyse, on obtient en moyenne pour la méthode par extraction 4,11% et 3,99% de teneur en bitume pour respectivement les échantillons C2 et C3. Donc un écart de 0,12% entre les deux camions.

4.3.3 Discussion des résultats des essais de teneur en bitume

Globalement, on constate qu'il n'y a pas un écart significatif entre les résultats des deux méthodes d'essai. La teneur en bitume pour l'échantillon C2 est la même pour les deux méthodes d'essai. Par contre, pour l'échantillon C3 la moyenne des résultats suivant la méthode par extraction donne un résultat légèrement supérieur au résultat du four à ignition. Ces résultats sont un peu contradictoires de ce qui est relevé dans la littérature. Selon Piérard, Vansteenkiste et Vanelstraete (2010), la teneur en liant mesurée par la méthode d'extraction est dans tous les cas de figure inférieure à la quantité de liant utilisée pour la production du mélange et quel que soit le type de solvant utilisé. On observerait une diminution relative d'environ 5% par rapport à la teneur de liant initiale pour les mélanges à base de PmB-SBS. Dans notre cas, en considérant que les teneurs initiales des échantillons C2 et C3 soient de 4,11% et 3,83%, la méthode d'extraction donne alors la même teneur en bitume pour l'échantillon C2 et une teneur supérieure dans le cas de l'échantillon C3. On pourrait tout de même avoir une explication logique à de tels résultats pour l'extraction. En effet, l'EBHP14 – Verre est constitué de gros granulats de pierre et de verre. On peut considérer que la méthode par extraction pourrait dans ce cas récupérer plus facilement la majorité du bitume enrobant les granulats, mais pas la partie de bitume absorbé par les granulats. Quant au verre, l'extraction devrait plus facilement récupérer le bitume enrobant les particules de verre, car l'affinité bitume – verre n'est pas de bonne qualité et l'absorption quasi nulle. Finalement, le fait qu'on ait une teneur égale ou supérieure à la teneur initiale pour la méthode par extraction pour le mélange bitumineux serait donc dû au fait qu'une partie du filler (fines) reste piégé dans le bitume extrait lorsque celui – ci est modifié au polymère (Piérard, 2011). La méthode LC 26 100 ne prévoyant pas de facteurs de correction pour ce cas de figure, la teneur en bitume obtenue par cette méthode est alors surestimée. D'autre part, nous constatons à partir de ces résultats qu'il y a un écart de 0,28% et de 0,12% entre les teneurs en bitume des échantillons C2 et C3 pour respectivement l'ignition et l'extraction.

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

Les résultats de l'essai de l'aptitude au compactage à la PCG présentés au Tableau 4-4 sont les résultats des essais réalisés sur les méga boites fabriquées en laboratoire dans le cadre de ce projet. Tel que présenté au Tableau 4-4, un essai de PCG standard est réalisé avec les matériaux des méga boites en ciblant au départ un volume des vides de 2,5%. Le choix d'un pourcentage de vides de 2,5% permet de valider l'aptitude au compactage à la PCG des deux mélanges quant aux exigences du MTQ pour la formulation des enrobés bitumineux. Les résultats de la PCG pour les deux mélanges sont illustrés à la Figure 4.5. Cette figure présente les résultats pour les PCG standards (STD) et les PCG de hauteur 150mm réalisées pour confectionner les éprouvettes pour les essais de module complexe (E*).

Au Tableau 4-4, il est présenté les nombres de girations (Ng) nécessaires à chaque essai pour atteindre les différents volumes de vides ciblés (2,5% et 4%). En ciblant 2,5% de vides pour la PCG standard, on espérait avoir un Ng de 200 pour les éprouvettes des deux lots d'échantillons afin d'être conforme aux exigences du MTQ.

Tableau 4.4 Résultats de la PCG

Méga boite	Ng (Vi=4%)	Ng (Vi=2,5%)
C2-MB1	13	18
C2-MB2	25	38
C2-MB3	19	34
C2-MB4	20	36
C3-MB1	76	200(1)
C3-MB2	95	138(1)
C3-MB3	82	200(1)
C3-MB4	85	200(1)

(1) pourcentage de vide cible est de 3,2%

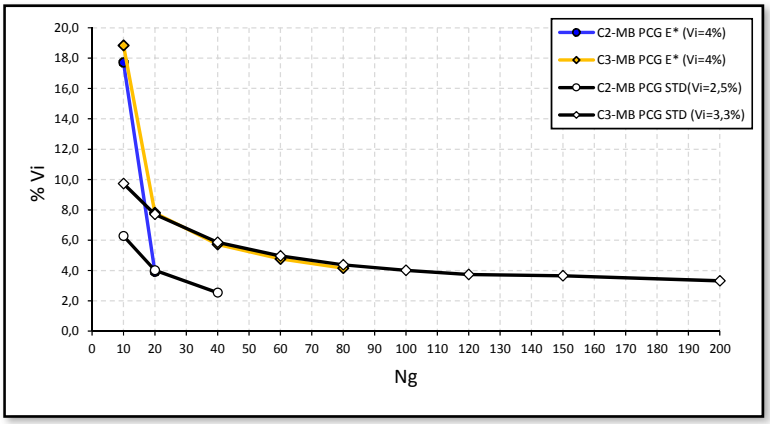


Figure 4.5 Résultats des PCG des méga boites C2 et C3

La Figure 4.6 montre l'évolution des nombres de girations par échantillon testé pour atteindre les pourcentages de vide ciblés ainsi que les nombres de girations moyens pour chacun des deux mélanges C2 et C3.

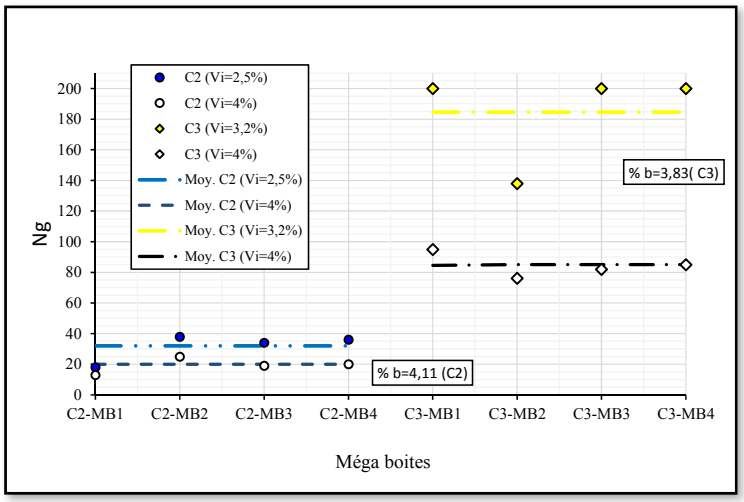


Figure 4.6 Résultats de la PCG

Le pourcentage de vides visé pour les éprouvettes de hauteur 115mm (PCG standard) du lot d'échantillon C3 était de 2,5%. Au cours de l'essai, la première éprouvette C3-MB1 testée

avait, à 200 girations, un pourcentage de vide de 3,2%. D'où la nouvelle valeur cible de 3,2% de vide pour le reste des éprouvettes de ce lot d'échantillon.

Nous avons ciblé les mêmes pourcentages de vides pour les éprouvettes des échantillons C2 et C3 à la PCG, afin d'obtenir des éprouvettes avec les mêmes caractéristiques volumétrique. Ce qui permettait dans un second temps de déterminer les écarts entre les deux camions en considérant les nombres moyens de girations des méga boites de chaque camion pour un pourcentage de 4% de vides. Le Tableau 4-5 présente ces valeurs moyennes obtenues pour les deux échantillons C2 et C3.

Tableau 4.5 Nombre de girations des échantillons C2 et C3

Critères	**C2**	**C3**	**Écart**
Teneur en vides ciblée	4%	4%	N/A
% de bitume	4,11	3,83	0,28
Nombre de giration	20	85	65

Après le Tableau 4.5, le nombre de girations une éprouvette provenant du camion C2 aurait 20 girations à la PCG pour 4% de vides. Par contre pour le même pourcentage de vides, une éprouvette du camion C3 aura 85 girations. L'écart obtenu entre les deux échantillons est alors de 65 girations. Cet écart est très élevé de notre point de vue. Mais cela a sa raison d'être, car l'échantillon C2 dont la teneur en bitume est de 4,11 %, est plus riche en bitume. Soit 6,81 % de bitume de plus que l'échantillon C3. Le surplus de bitume serait donc en grande partie responsable de cet écart. Nous constatons à partir du Tableaux 4.5 et de la Figures 4.5 que le bitume favorise l'ouvrabilité de l'EBHP14 – Verre en réduisant ainsi le nombre de girations requis pour atteindre la teneur en vides ciblée de 4%. D'autre part, ces résultats nous permettent de présager une possible réduction de la teneur en bitume de

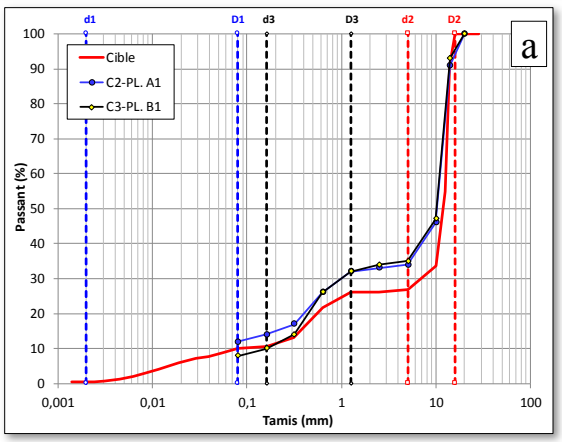
l'EBHP14 – Verre tout en conservant une très bonne compactibilité de l'enrobé, car les résultats obtenus pour l'échantillon C3 respectent les exigences à la PCG du MTQ.

4.5 Analyse granulométrique

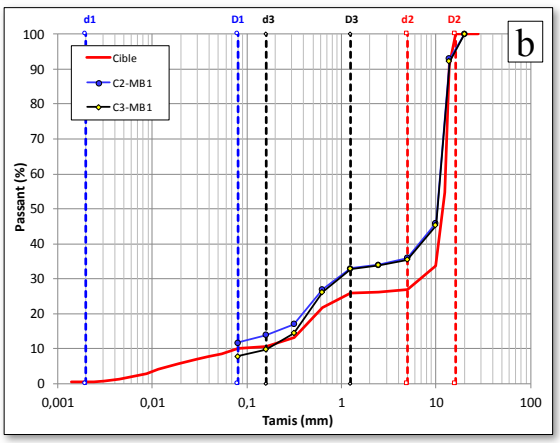
Cette section présente les résultats des essais d'analyse granulométrique réalisés au LCMB sur les résidus du four à ignition et les résultats des résidus d'extraction du laboratoire DJL.

4.5.1 Granulométrie des mélanges

Les différents résultats des essais d'analyse granulométrique réalisés au LCMB et au laboratoire DJL sont présentés aux Figures 4.7 à 4.9. Les essais d'analyse granulométrique au LCMB ont été réalisés sur des résidus d'ignition des méga boites et sur les plaques fabriquées pour les essais d'orniérage. Les Figures 4.7a et 4.7b présentent les courbes granulométriques des plaques ayant servies à la réalisation des essais d'orniérage et des méga boites fabriquées en laboratoire des échantillons C2 et C3. Rappelons que les plaques ont été fabriquées par combinaison de 3 boites et que les méga boites ont été fabriquées à partir de 6 boites d'échantillons et ce pour chacun des camions échantillonnés (C2 et C3).



a) Plaques C2 et C3



b) Méga boites C2 et C3

Figure 4.7 Courbes granulométriques des résidus du four à ignition

Des courbes de ces deux figures, nous observons dans un premier temps des courbes quasi identiques pour les plaques et les méga boites. Deuxièmement, on remarque un écart entre la granulométrie de la production et la granulométrie retenue à la formulation. Dans un troisième temps, il existe un écart au sein même de la production. En effet, la courbe granulométrie de l'échantillon C2 diffère de celle de l'échantillon C3.

La Figure 4.8 présente les résultats des AG réalisés au laboratoire DJL sur les échantillons des méga boites fabriquées au LCMB. Les essais au laboratoire DJL sont réalisés sur des résidus d'extraction.

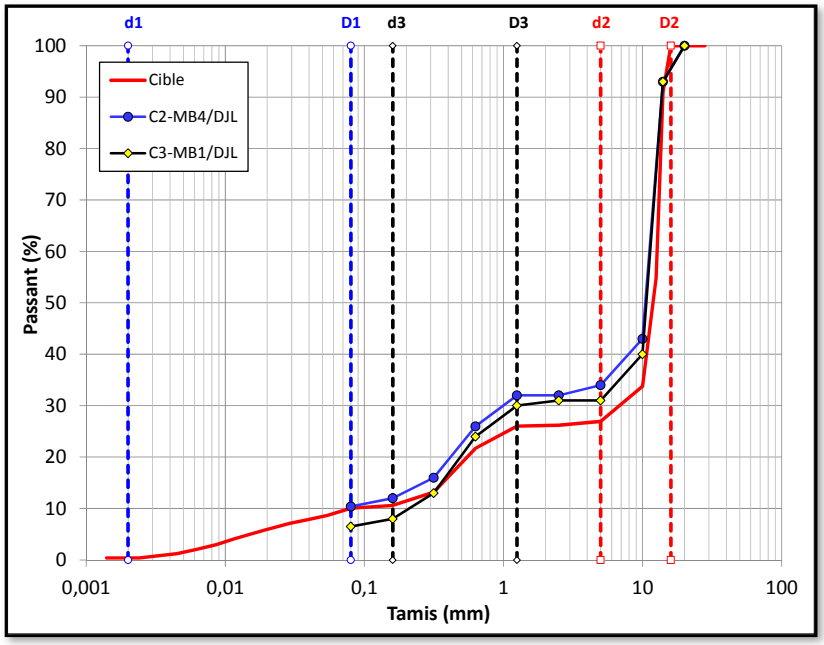


Figure 4.8 Courbes granulométriques des méga boites C2 et C3 déterminées au laboratoire DJL à partir des résidus d'extraction

Les essais d'AG réalisés au laboratoire DJL donnent de résultats similaires aux résultats des essais du LCMB. Toutefois, la fraction 10 – 14mm des résultats de DJL est plus proche de la cible. Les passants au tamis 0,08mm sont pratiquement identiques à la cible pour l'échantillon C2. Par contre pour l'échantillon C3, le pourcentage de passant 0,08mm est

inférieur à la cible. Dans le cas des essais au LCMB, les passants au même tamis sont supérieurs et inférieurs à la cible respectivement pour les échantillons C2 et C3.

Un constat important qu'il convient de signaler au passage, est que les écarts sur le tamis 0,08mm entre les deux échantillons pour chaque méthode d'essai sont en moyenne de 3,4% pour l'AG des résidus d'extraction (DJL) et de 3,9% pour l'AG des résidus du four à ignition (LCMB). L'écart de la fraction 10 – 14mm des deux échantillons pour les résidus d'ignition par rapport à la cible est peut-être dû à un effet du passage dans le four à ignition sur cette fraction. En effet, nous avons remarqué au cours de l'essai d'AG que certaines particules de cette fraction se brisaient en deux. Donc, il se pourrait qu'après avoir subi une température de 540 ˚C, certaines particules grossières soient fragilisées et supportent peu les chocs liés à l'AG. De plus, la méthode de calcination a tendance à augmenter la teneur en fines. Par contre, après l'extraction du bitume d'un enrobé, il est constaté que la fraction fine diminuait. Selon Piérard (2011), une partie des fines reste piégée dans le bitume extrait.

Pour la fraction intermédiaire, on remarque dans les deux cas d'analyse que les courbes s'écartent de la cible. Les allures semblent être les mêmes pour les essais au LCMB. Par contre, pour les résultats de DJL, on observe un écart entre les deux échantillons pour cette fraction.

Lors de la formulation de l'enrobé EBHP14 – Verre, certains tamis ont été retenus pour contrôler les différentes fractions du mélange granulaire. Au vu des écarts observés dans les résultats globaux, une vérification des proportions cibles sur ces tamis s'est avérée nécessaire.

4.5.2 Vérification des cibles aux tamis de contrôle

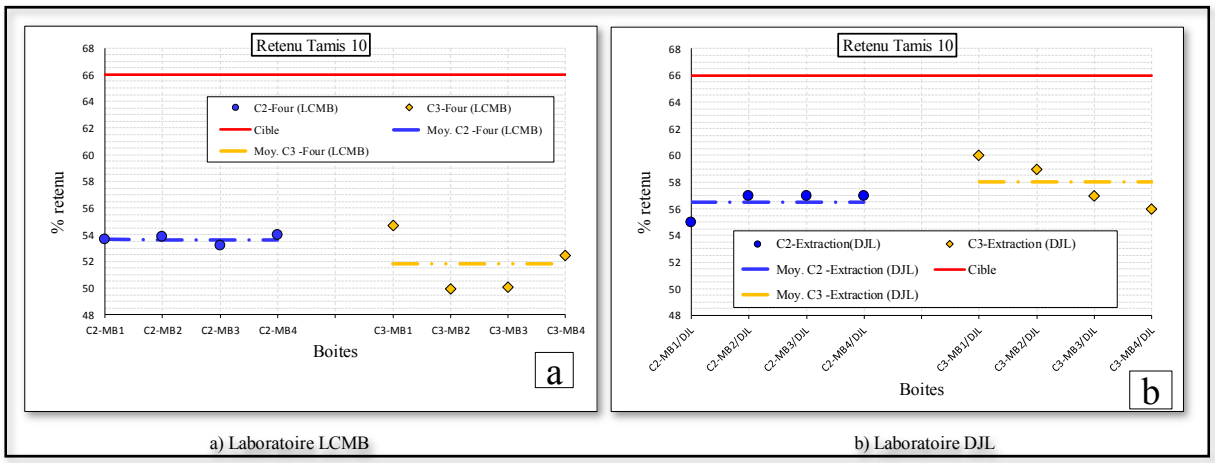
Lors de la formulation de l'EBHP14 – Verre, les tamis 10mm, 5mm et 0,16mm avaient été retenus pour le contrôle des proportions des différentes classes granulaires du mélange formulé. Ces trois tamis permettent d'identifier les trois classes constituant le mélange

granulaire à savoir : le gros granulat, la fraction intermédiaire (sable C) et le filler. Le contrôle des proportions sur ces trois tamis est fait de la façon suivante. On contrôle :

- la proportion retenue sur le tamis 10mm ;
- la proportion passant le tamis 10mm et retenue au tamis 5mm ;
- la proportion passant le tamis 5mm et retenue au tamis 0,16mm et
- la proportion passant au tamis 0,16mm.

4.5.2.1 Proportion retenue sur le tamis de 10mm

On vérifie ainsi la conformité de la production à l'aide des valeurs cibles de formulation du mélange. Les résultats des essais d'AG sur les différents échantillons testés au cours de cette recherche sont consignés au Tableau – A VII – 1 en annexe VII. Les Figures 4.9 à 4.12 présentent les résultats de contrôle de la granulométrie de l'EBHP14 – Verre produit en usine d'enrobage pour la réalisation de la planche d'essai SAQ. Les Figures 4.9a et 4.9b présentent les résultats des retenus au tamis 10mm des essais effectués au LCMB et au laboratoire DJL.



a) Laboratoire LCMB b) Laboratoire DJL

Figure 4.9 Retenus au tamis 10mm pour les échantillons C2 et C3

Les valeurs moyennes des AG ont été déterminées en ne considérant que les résultats des méga boites. Les moyennes des retenus au tamis 10mm de l'échantillon C2 sont respectivement pour les essais réalisés au LCMB (Fig.4.9a) et au laboratoire DJL (Fig.4.9b)

de 53,6% et de 56,5%. L'AG de l'échantillon C3 à respectivement des moyennes retenues au tamis 10mm de 51,8% et 58% au LCMB et DJL respectivement. La cible sur ce tamis étant de 66%, il manque 18,8% de gros dans les échantillons C2 et 21,5% de gros dans les échantillons C3 en ce qui concerne les essais au LCMB. En ce qui a trait au laboratoire DJL, il manque 14,4% de gros pour les échantillons C2 et 12,1% de gros pour l'échantillon C3. Le Tableau 4-6 présente la synthèse des écarts observés entre les deux lots d'échantillons et la cible sur ce tamis de contrôle et les écarts entre les méthodes d'essai.

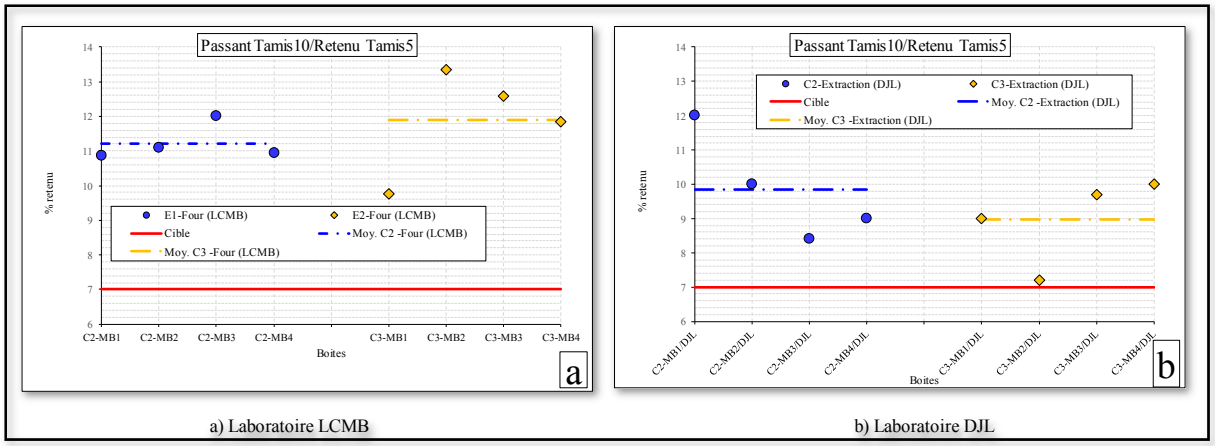
Tableau 4.6 Synthèse des écarts relatifs observés entre la cible et les échantillons pour les retenus au tamis 10mm

Échantillons	**Four à ignition (LCMB)**	**Extraction (DJL)**	**Écarts méthode d'essais**
C2-MB	18,8%	14,4%	31%
C3-MB	21,5%	12,1%	78%

On constate que les écarts sur ce tamis de contrôle sont plus faibles pour les essais d'extraction au laboratoire DJL. Il n'en demeure pas moins que l'écart entre la fraction retenue au tamis de 10mm entre la cible et l'enrobé confectionné en centrale est loin d'être négligeable.

4.5.2.2 Proportion passant le tamis 10mm et retenue au tamis 5mm

Les résultats de contrôle des passants tamis 10mm – retenu tamis 5mm sont présentés aux Figure 4.10a et 4.10b.



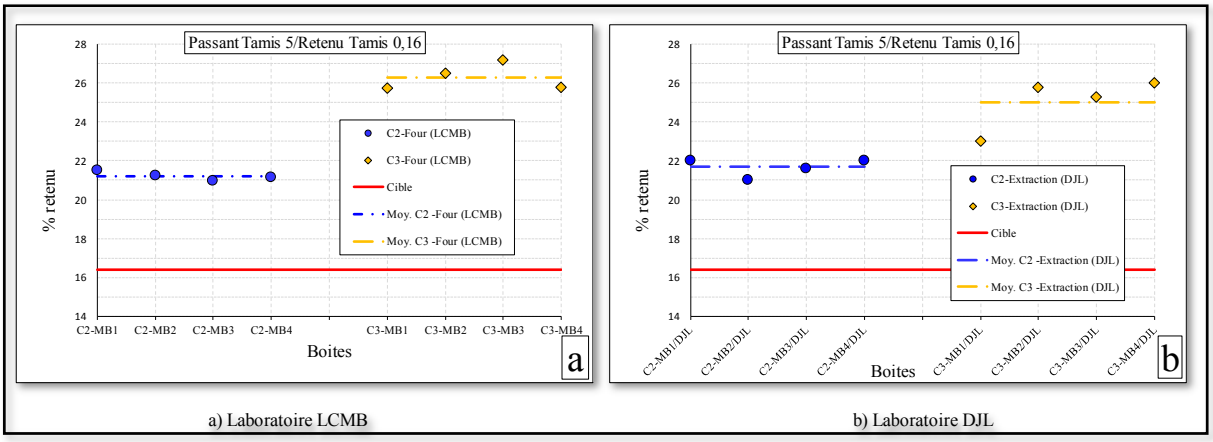
a) Laboratoire LCMB b) Laboratoire DJL

Figure 4.10 Passant tamis 10mm/Retenu tamis 5mm des échantillons C2 et C3

Pour le contrôle des proportions sur ce tamis 5mm, l'échantillon E1 (C2) a une moyenne de 11,2% au LCMB (Four - Fig.4.10a) et de 10,0% au laboratoire DJL (Extraction - Fig.4.10b). L'échantillon C3 a environ une moyenne de 11,9% au LCMB et 9,0% au laboratoire DJL. On se retrouve avec des surplus de 60% et 70% pour respectivement C2 et C3 au contrôle de cette fraction au LCMB (Fig.4.10a), la cible étant de 7,0%. Et une fois encore, les écarts les plus faibles sont pour les résultats du laboratoire DJL (Fig.4.10b). L'écart entre les deux échantillons est de 10%.

4.5.2.3 Proportion passant le tamis 5mm et retenue au tamis 0,16mm

La Figure 4.11 présente le contrôle de la fraction passant le tamis 5mm et retenu tamis 0,16mm.



a) Laboratoire LCMB b) Laboratoire DJL

Figure 4.11 Passant tamis 5mm/Retenu tamis 0,16mm des échantillons C2 et C3

La cible pour cette fraction est de 16,4%. La moyenne de l'échantillon C2 est de 21,2% au LCMB (Four) et 21,7% à DJL (extraction). Cette fraction dans l'échantillon C3 est de 26,3% au LCMB (Four) et 25,0% à DJL (Extraction). Pour cette fraction, les résultats au LCMB semblent un peu plus proches de ceux obtenus au laboratoire DJL. Les essais réalisés au LCMB donnent pour C2 un surplus de 29,3% et un surplus de 60,4% pour l'échantillon C3. Ce qui donne un écart de 31,1% entre les deux échantillons pour cette fraction.

4.5.2.4 Proportion passant au tamis 0,16mm

Le résultat des passants le tamis 0,16mm sont présentés aux Figures 4.12a et 4.12b. La valeur cible de cette fraction est de 10,6%. Les passants au tamis 0,16mm pour l'échantillon C2 au LCMB (Four - Fig.4.12a) est de 14% et 12% au laboratoire DJL (Extraction - Fig.4.12b). Pour l'échantillon C3, 10% passent au tamis de contrôle 0,16mm au LCMB (Fig.4.12a) et 8% au laboratoire DJL (Fig.4.12b). On observe ainsi un surplus de 32,1% pour l'échantillon C2 et un manque de 5,7% pour l'échantillon C3 pour cette fraction au LCMB (Four). On note ainsi un écart de 37,8% entre les deux échantillons pour les passants au tamis 0,16mm au LCMB (Four).

Les écarts au laboratoire DJL (Extraction) sont de 13,2% de surplus pour l'échantillon C2 et un manque de 24,5% pour l'échantillon C3. L'écart entre les deux échantillons dans ce cas est de 37,7%

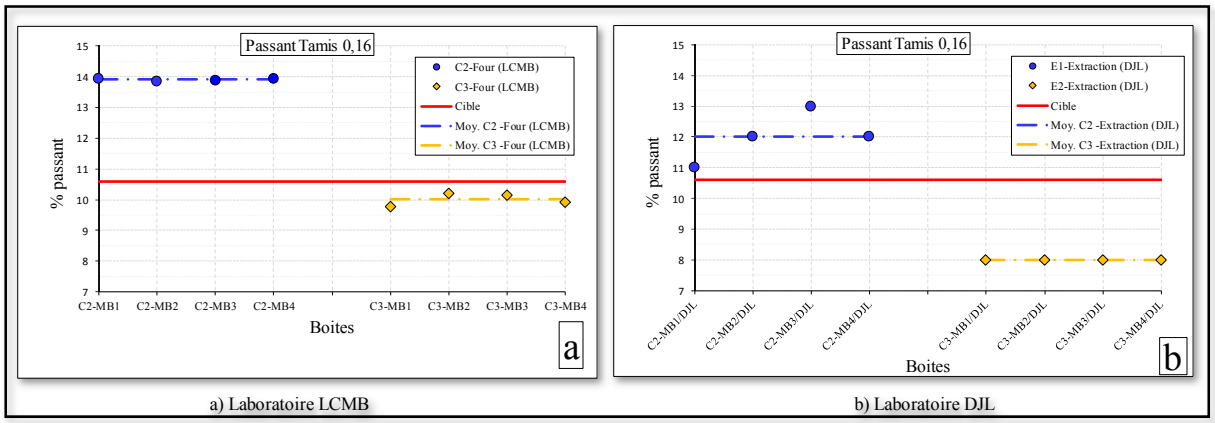


Figure 4.12 Passant tamis 0,16mm des échantillons C2 et C3

Il est important de souligner une fois encore que les essais d'analyse granulométrique ont été réalisés au LCMB sur des résidus d'ignition et sur des résidus d'extraction au laboratoire de DJL. On observe dans les deux cas d'analyse sur les différents tamis de contrôle des écarts dans la production. Peut-être que les granularités des différentes classes granulaires n'ont pas été respectées à la production. Mais aussi, il existe des écarts assez significatifs entre les deux laboratoires. Et cela peut être dû aux méthodes de détermination des teneurs en bitume qui ont données les résidus testés.

Pour la fraction du gros (10 – 14mm), on observe des écarts par rapport à la cible de 2,9% pour C2 et de 6,8% pour C3 entre les deux laboratoires tels que présentés au Tableau 4-6. Donc un écart de 3,9% entre C2 et C3.

D'une part, les deux échantillons n'ont pas les mêmes proportions pour la fraction grossière. D'autre part, il se pourrait que la méthode de calcination au four à ignition ait un effet sur la fraction grossière, et engendrerait des particules plus petites. Cela pourrait expliquer les

surplus obtenus dans les fractions intermédiaires. Quant à la fraction de filler, on constate que l'échantillon C2 a un surplus de 3,4% au LCMB. Cette valeur est seulement de 1,4% au laboratoire DJL. L'échantillon C3 a moins de filler que prévu dans l'analyse des deux laboratoires.

4.5.3 Correction des cibles aux tamis de contrôle

L'analyse des résultats des essais d'AG a permis de mettre en évidence les écarts entre les différentes fractions granulaires de la production et la formule de l'enrobé EBPH 14 – Verre. Ces écarts témoignent des difficultés rencontrées à la production de ce mélange en central d'enrobage. De fait, une correction des valeurs ciblées sur les tamis de contrôle retenu à la formulation de l'enrobé est donc nécessaire afin de déceler les éventuelles erreurs survenues lors la production pour ainsi permettre une meilleure prédiction du comportement du mélange produit en usine. Il convient de rappeler que la granulométrie de l'enrobé EBHP 14 – Verre est constitué de trois calibres distincts : la fraction de pierre calcaire 10 – 14mm (GROS), la fraction de sable C, qui est du verre recyclé (INT), et la fraction du micronisé encore appeler filler de verre recyclé (FIN). Au vu des écarts observés, la détermination des nouvelles cibles pour les tamis de contrôle a été effectuée sur la base d'hypothèses en considération de la cible initiale et les résultats du LCMB. Deux cas d'hypothèses ont été retenus et sont présentés ci-dessous.

Cas I

On considère qu'il y a eu un mauvais dosage uniquement de la fraction du GROS dans la production. Connaissant la granulométrie de la formule et du GROS, on peut calculer la granulométrie du combiné des deux autres fractions (INT/FIN). Si on constate dans la production un écart sur un tamis de contrôle donné, dont seule la fraction contrôlée a une incidence, on peut alors vérifier si l'erreur est liée au seul mauvais dosage de cette fraction dans le mélange. En considérant la nouvelle proportion de la fraction du gros établi suivant l'écart observé au tamis de contrôle, on peut alors comparer la granularité de la production à

celle d'une nouvelle cible. Le tableau 4-7 présente les résultats des calculs effectués dans le cadre de cette hypothèse pour trouver les nouvelles valeurs cibles des tamis de contrôle.

Tableau 4.7 Calcul de nouvelle cible cas1

Tamis (mm)	**cible**	**10-14**	**Sable C**	**Filler**	**Combiné**	**Production**		**Nouvelle Cible C2**	**Nouvelle Cible C3**
		G 75,3%	I 15,7%	F 9%	64% I / 36% F	Moy. C2	Moy. C3	62,9%G + 37,1% I/F	61,1%G + 38,9%I/F
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100
14	91	88	100	100	100	93	93	93	93
10	34	12	100	100	100	47	48	45	46
5	27	3	100	100	100	35	36	39	41
0,16	10,6	2	0,4	100	37	14	10	15	16
0,08	10,1	1,4	0,0	100	36,0	12,0	8,0	14,2	14,9
Retenu Tamis 10	66	88	0	0	0	53	52	55	54
Passant Tamis 10 /Retenu Tamis 5	7	9	0	0	0	12	12	6	6
Passant Tamis 5 /Retenu Tamis 0,16	16,4	1	99,6	0	63,0	21,0	26,0	24,0	25,0
Passant Tamis 0,16	10,6	2	0,4	100	37,0	14,0	10,0	15,2	15,5
Total	100	100	100	100	100	100	100	100,0	100

De ce tableau, on observe des écarts entre la production et les nouvelles cibles des tamis de contrôle. Il semble qu'il a un extra de 6% de la fraction 5/10 dans la production. Pour l'échantillon C3, on observe un manque de 5,5% du passant au tamis 0,160mm par rapport à la nouvelle cible. Ce manque n'est que de 1,2% pour C2. On constate de fait que les échantillons C2 et C3 n'ont pas la même formule. Ou peut-être que le sable C n'avait pas la bonne granulométrique.

Cas II

Dans un autre cas de figure, considérons que seule la proportion de GROS utilisée pour la production de l'EBHP14 – Verre est erronée et serait à l'origine de l'écart entre production et formule. Autrement dit, cela aurait entrainé un non-respect des proportions 75,3% du GROS, 15,7% du sable C et 9% du micronisé lors de la production. On peut dans ce cas essayer de recalculer les proportions réelles de la production pour chaque fraction en considérant l'écart observé sur la fraction du GROS de la production et la formulation initiale. Il faut alors ôter cet écart de la proportion initiale du GROS dans un premier temps. Les 13% dans les calculs représentent la moyenne de pierres en manque sur la fraction du gros dans les deux échantillons. Par la suite, il suffit de ramener les proportions à 100%. Le calcul de ces nouvelles proportions pour chaque fraction est fait de la façon suivante :

- pour la fraction du GROS

$$G\% = \left(\frac{75{,}3-13}{100-13}\right) x\ 100 = 71{,}61 \approx 72\%$$

- pour la fraction INT

$$I\% = \left(\frac{15{,}7}{100-13}\right) x\ 100 = 18{,}04 \approx 18\%$$

- pour la fraction FIN

$$F\% = \left(\frac{9}{100-13}\right) x\ 100 = 10{,}34 \approx 10\%$$

À partir de ces nouvelles proportions, on calcule le nouveau combiné qui sert de nouvelle cible. Les résultats de calculs avec ces proportions figurent dans le Tableau 4-8.

Tableau 4.8 Correction des cibles cas 2

Tamis (mm)	**Combiné cible**	**10-14**	**Sable C**	**Filler**	**Production**		**Nouvelle Cible**
		GROS (72%)	INT (18%)	FIN (10%)	Moy. C2	Moy. C3	
20	100	100	100	100	100	100	100
14	91	88	100	100	93	93	91
10	34	12	100	100	47	48	37
5	27,0	3,0	100	100	35,0	36,0	30
0,16	10,6	2,0	0,4	100	14,0	10,0	11,5
0,08	10,1	1,4	0	100	12,0	8,0	11,0
Retenu Tamis 10	66,0	---	---	---	53,0	52,0	63,0
Passant Tamis 10 /Retenu Tamis 5	7,0	---	---	---	12,0	12,0	7,0
Passant Tamis 5 /Retenu Tamis 0,16	16,4	---	---	---	21,0	26,0	18,5
Passant Tamis 0,16	10,6	---	---	---	14,0	10,0	11,5
Total	100	---	---	---	100	100	100

Pour ce cas, on retrouve un extra de 5% dans la fraction 5/10 et 10% de pierre en moins dans la fraction 10/14 dans la production. La fraction du GROS n'a peut-être pas la bonne granulométrie. Mais aussi, les deux mélanges n'ont pas la même formule.

Après tous ces calculs, ces deux hypothèses ne nous permettent pas de statuer sur ce qui s'est passé lors de la production pour expliquer que la production s'écarte autant de la formule cible. Cependant, dans les deux cas, on remarque un extra sur la fraction 5/10. Cet extra témoigne d'une probable contamination de la formule initiale par une fraction intermédiaire autre que le sable C.

Nous choisissons donc de déterminer la nouvelle cible sur la base unique de la production. Pour ce faire, il faut donc au préalable déterminer la granularité réelle du GROS dans la

production. Mais avant, on considère que les fractions INT (sable C) et FIN (micronisé) ont tous les deux la bonne granulométrie. Par la suite, on calcule la granulométrie du GROS en considérant le combiné INT/FIN du Tableau 4-7 et les granulométries de la production. Le Tableau 4-9 présente les résultats de cette démarche de calcul.

Tableau 4.9 Calcul des cibles

Tamis	**Production**		**Combiné (I/F)**	**GROS C2**	**GROS C3**	**Cibles**	
	C2	C3	24,7%	75,3%	75,3%	C2	C3
20	100	100	100	100	100	100	100
14	93	93	100	93	93	93	93
10	47	48	100	47	48	45	46
5	35	36	100	35	36	32	33
0,16	14	10	37	5	0	13	9
0,08	11,9	8,0	36,0	3,1	0	11,2	8,9
Retenu Tamis 10	53	52	-	-	-	55	54
Passant Tamis 10 /Retenu Tamis 5	12	12	-	-	-	13	13
Passant Tamis 5 /Retenu Tamis 0,16	21	26	-	-	-	19	24
Passant Tamis 0,16	14	10	-	-	-	13	9
Total	100	100	-	-	-	100	100

Le fait d'obtenir deux nouvelles cibles différentes l'une de l'autre témoigne bien qu'on est en présence de deux mélanges distincts pour cette production.

4.5.4 Analyse des écarts entre les proportions de la production et les cibles des tamis de contrôle

Le Tableau 4.10 présente la synthèse des écarts relatifs estimés entre la production et les cibles des tamis de contrôle. On retrouve également dans le Tableau 4.10 les proportions (AG) obtenues pour chacun des deux camions C2 et C3 sur les tamis de contrôle pour les laboratoires LCMB et DJL. Les écarts relatifs ont été calculés en prenant pour références les valeurs cibles.

Tableau 4.10 Synthèse des écarts relatifs estimés entre la production et les cibles des tamis de contrôle

	Cible (C)	**C2**				**C3**			
		Four (F)		**Extraction (E)**		**Four (F)**		**Extraction (E)**	
% bitume	3,80	4,11		4,11		3,83		3,99	
Classe		%Passant	Écart **(F - C)**	%Passant	Écart **(E - C)**	%Passant	Écart **(F - C)**	%Passant	Écart **(E - C)**
Passant 20mm/retenu 10mm (%) [$\bar{d}$(mm) = 14,1]	66	53,0	-13	56,3	-9,5	52,0	-14,0	58,0	-8,0
Écart relatif (1) (%)	0	-20		-14		-21		-12	
Passant 10mm/retenu 5mm (%)[$\bar{d}$(mm) = 7,07]	7	12,0	+4,2	10	+3,0	12,0	+5,0	9,0	+2,0
Écart relatif (1) (%)	0	+71		+43		+71		+29	
Passant 5mm/retenu 0,16mm (%)[$\bar{d}$(mm) = 0,89]	16,4	21,0	+4,6	21,7	+5,3	26,0	+9,6	25,0	+8,6
Écart relatif (1) (%)	0	+28		+32		+59		+52	
Passant 0,16mm (%)[$\bar{d}$(mm) = 0,04]	10,6	14,0	+3,4	12,0	+1,4	10,0	-0,6	8,0	-2,6
Écart relatif (1) (%)	0	+32		+13		-6		-25	
Total (%)		111		74		103		44	

(1) Exprime le rapport entre l'écart du résultat de l'essai à la cible et la cible

Le Tableau 4.10 est fort intéressant. On distingue avec plus de clarté à partir des diamètres moyens ($\bar{d}$), les fractions où les granulats sont manquant et celles où les granulats sont en surplus. Entre autre, le Tableau 4.10 permet aussi de voir que les résultats de l'essai d'AG par la méthode du four (LCMB) à ignition présente les meilleurs résultats.

Les conclusions qui ressortent du Tableau 4.10 pour les essais au four (LCMB) sont un manque de pierre dans la fraction du gros granulat d'environ 20% pour les deux camions C2 et C3. Un surplus dans la fraction intermédiaire de pierre d'environ 71% pour les deux camions C2 et C3. Pour le sable C (verre), on obtient un surplus de 28% pour le camion C2 et un surplus de 59% pour le camion C3. Le filler (micronisé) dans le camion C2 est en excès de 32% et en manque 6% dans le camion C3.

4.6 Analyse de la qualité de la production

Les EBHP sont des enrobés très performant, mais à condition que leur production soit constante et de qualité (Meunier, 2013). Les performances escomptées pour l'EBHP14 – Verre sont liées à la qualité de la production et aux respects des proportions cibles de chacun des constituants. Rappelons qu'un des principaux objectifs de cette recherche est d'évaluer l'homogénéité du mélange mise en œuvre lors de la réalisation de la planche d'essai SAQ et la justesse de la formulation produite en égard aux cibles préétablies. Afin d'évaluer la qualité de cette production, nous avons choisi d'analyser les résultats de certains des essais de caractérisation réalisés au LCMB sur les mélanges échantillonnés sur le site de la SAQ et ce, en déterminant : 1) les écarts entre les deux échantillons obtenus des deux camions et 2) les écarts des proportions réelles aux cibles projetées de certains constituants. Le Tableau 4-11 présent les différents résultats de ces essais ainsi que les écarts observés entre les deux échantillons.

Tableau 4.11 Sommaire des écarts entre les échantillons C2 et C3

Essais	Cible	C2	C3	Écarts relatifs (%)		
				En regard aux camions [1]	À la cible	
					C2	C3
Densité maximale (dmm)	5,527	2,507	2,525	-0,71	-0,79	-0,08
% de bitume	3,80	4,11	3,83	7,3	8,16	0,79
Nombre de giration (Vi = 4%)	95	20	85	-76,5	-78,9	-10,5
AG (% passant tamis 80µm)	10,1	11,9	8,0	48,8	17,8	-20,8

[1] Camion C3 en référence

Le Tableau 4.11 montre qu'il existe des écarts importants entre les deux échantillons et de surcroit avec la cible. L'écart le plus grand se situe au niveau de l'aptitude au compactage des deux échantillons. L'échantillon C2 se révèle être trop maniable ce qui peut entrainer un grand risque d'instabilité à l'orniérage pour ce mélange. L'échantillon C3 est lui plus dense que C2 et très proche de la teneur en bitume visée (3,80%). En définitive, on se retrouve avec deux mélanges bien distincts et peu représentatif de l'enrobé EBHP 14 ciblé.

Il est important de souligner que cette non-homogénéité de la production, tel que déduite des différents écarts mesurés entre les deux échantillons des deux camions échantillonnés, est avant tout liée aux difficultés d'incorporation des particules fines du verre recyclé (le micronisé) dans le mélange en centrale d'enrobage. En effet, la centrale n'étant pas équipé pour la production d'enrobé incorporant des particules de verre recyclé, il a fallu être créatif pour réussir à incorporer le verre dans le mélange. De fait, le verre de classe intermédiaire et le micronisé ont été ajoutés à froid aux autres granulats préalablement chauffés et le tout malaxé à sec pour permettre au verre d'être chauffé par conduction avant l'ajout de bitume. Toutefois, l'ajout du micronisé (filler de verre) même à froid s'est avéré problématique du fait que le micronisé s'écoulait très difficilement et restait collé aux parois du silo à fines.

Finalement, le micronisé a été directement introduit dans le malaxeur pour faciliter les opérations. La Figure 4.13 permet de visualiser la procédure de production de l'EBHP14 – Verre en centrale d'enrobage. Il faut souligner que cette façon de faire est contre-productive puisque la cadence de production obtenue de ces opérations s'avère totalement incompatible avec les cadences de productions habituelles des enrobés en centrale discontinue.

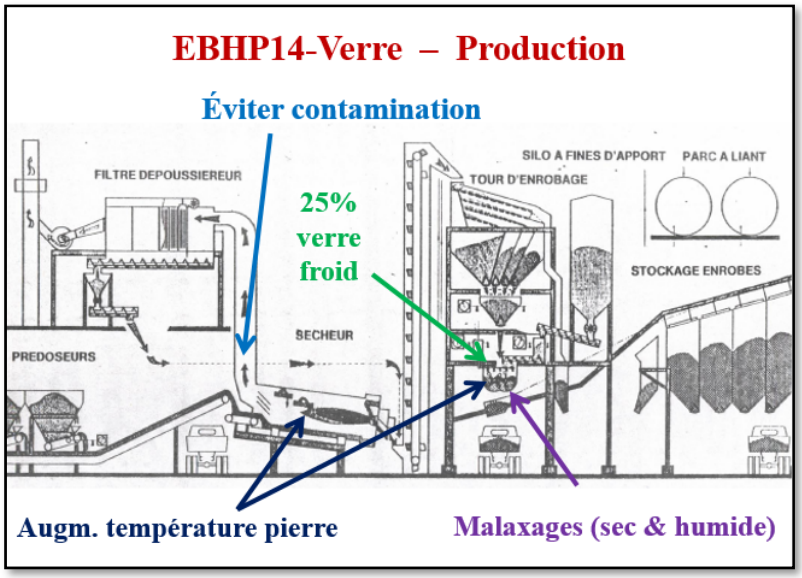


Figure 4.13 Production d'EBHP14-Verre en centrale

Un point important et qu'il convient de faire ressortir dans ce travail est qu'après la gâchée d'essai réalisée en centrale d'enrobage (2 gâchées de 4 000 kg par gâchée) dans les jours avant la production des enrobés pour les planches de convenance et d'essai, le paramètre de formulation %b, qui représente la teneur en bitume a été modifiée. La teneur cible initiale de 4,10% a été réduite à 3,80%. Cela pourrait expliquer l'écart observé entre la granulométrie cible et les granulométries des mélanges. En effet, la modification d'un paramètre de formulation peut entrainer la modification des autres paramètres de formulation (Baaj, 2002). Toutefois, cela ne peut expliquer tout de même l'écart entre les granulométries des deux échantillons eux-mêmes. De plus, il est difficile d'expliquer la raison pour laquelle on se retrouve à avoir deux mélanges avec les deux différentes teneurs en bitume (4,11% pour C2 et 3,83% pour C3). Quelle serait alors la granulométrie et teneur en bitume du camion 1 (C1)

qui n'a pas été échantillonné ? Le Tableau 4.12 présente les différentes productions de l'enrobé EBHP14-Verre en usine.

Tableau 4.12 Les différent enrobés EBHP14-verre produits en centrale

Étapes de production	Nombre de gâchée	Tonnage	Teneur en bitume ciblée	Date
Gâchée d'essai	2	8	4,10	2015 – 11 – 05
Planche de convenance	4	15	3,80	2015 – 11 – 06
Planche d'essai SAQ	15	60	3,80	2015 – 11 – 12

Pour avoir une idée réelle de l'impact des fluctuations quant aux proportions des constituants suite à la production de l'EBHP 14 avec verre, il va falloir étudier le comportement mécanique de chaque mélange en déterminant les propriétés mécaniques de ces deux mélanges. Toutefois, on peut déjà dire qu'il faut trouver une meilleure solution d'incorporation du verre recyclé dans l'enrobé en usine d'enrobage et ce, particulièrement en ce qui a trait aux fines (micronisé). Pour le micronisé, il faudrait s'assurer que les dosages prévus soient bien respectés, car la fraction de filler a une influence importante sur les performances des enrobés bitumineux.

4.7 Résistance à l'orniérage

4.7.1 Résultats et discussion

La résistance à l'orniérage est une caractéristique importante dans la détermination des performances des enrobés bitumineux. L'essai à l'orniéreur est réalisé sur les échantillons C2 et C3 du mélange produit en usine selon la méthode d'essai LC 26 – 410. Deux plaques ont été fabriquées pour chacun des échantillons. La limite tolérée après 30 000 cycles par la méthode LC 4202 du MTQ pour la résistance à l'orniérage des plaques d'enrobé bitumineux

d'épaisseur de 100mm est de 10%. La Figure 4.14 présente le pourcentage d'orniérage de chaque plaque à 30 000 cycles en fonction du pourcentage de passant au tamis 80µm. Il faut souligner que les plaques d'un même mélange n'ont pas été testées simultanément. En effet, lors de la réalisation du premier essai d'orniérage, une plaque par mélange a été placée dans l'orniéreur. À une date ultérieure, le deuxième essai a été réalisé avec toujours une plaque de chacun des deux mélange. Cette façon de faire peut en partie expliquer les écarts entre les plaques d'un échantillon donné.

Suivant les résultats présentés à la Figure 4.14, on observe que les plaques avec le pourcentage de passant au tamis 80µm plus grand ornièrent au-delà de la limite tolérée par la MTMDET. Cette limite est représentée à la Figure 4.14 par la ligne rouge. L'écart entre les déformations à 30 000 cycles des plaques du camion C2 est de 7,2%. Cet écart est peut-être lié au fait que les deux plaques n'ont pas été testées à la même date.

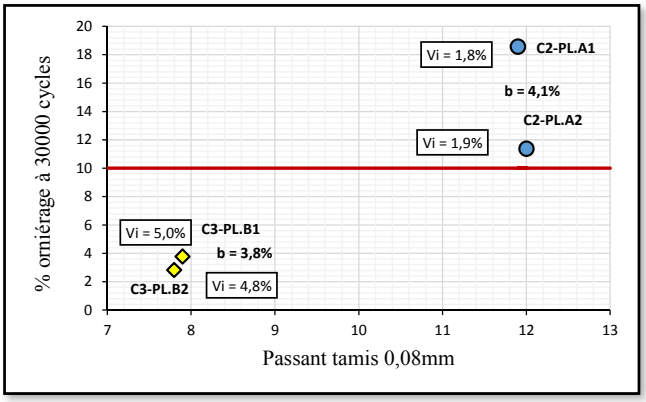


Figure 4.14 Pourcentage d'orniérage en fonction des fines

La teneur en bitume (b%) et le pourcentage de vides (Vi%) des plaques sont deux données importantes pour l'analyse des résultats de l'essai. Le Tableau 4-13 et les Figures 4.15 et 4.16 présentent les résultats des essais de résistance à l'orniérage des différentes plaques de l'EBHP 14 – Verre.

Tableau 4.13 Résultats des essais d'orniérage des échantillons C2 et C3 (60˚C et 1Hz)

Éch.	Plaques	Date d'essai	b (%)	Vi (%)	Nombre de cycles					
					1 000	3 000	10 000	30 000	60 000	100 000
C2	PL.A1	2016-02-15	3,92	1,8	6,9%	9,4%	14,0%	18,6%	---	---
	PL.A2	2016-05-10	4,11	1,9	5,5%	6,8%	8,9%	11,4%	13,4%	14,9%
C3	PL.B1	2016-02-15	3,64	5,0	2,0%	2,6%	3,4%	3,8%	---	---
	PL.B2	2016-05-10	3,76	4,8	1,5%	2,0%	2,4%	2,8%	3,4%	3,7%

Nous ne présentons pas les résultats des déformations permanentes à 60 000 et 100 000 cycles pour les plaques C2-PL.A1 et C3-PL.B1 parce que les essais ont été arrêtés à 30 000 cycles de sollicitations pour ces deux plaques. Les plaques C2-PL.A2 et C3-PL.B2 des échantillons C2 et C3 sont eux sollicitées jusqu'aux 100 000 cycles. La Figure 4.15 présente l'évolution des déformations en fonction du nombre de cycles de sollicitation.

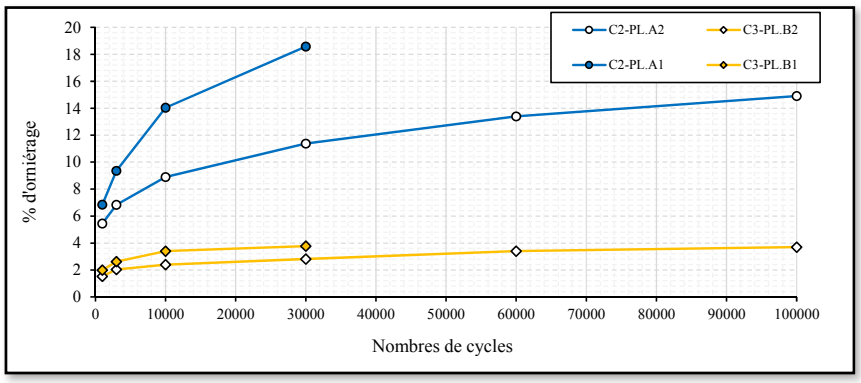


Figure 4.15 Évolution des déformations en fonction du nombre de cycles de sollicitation

Les résultats des essais d'orniérage sont aussi présentés à la Figure 4.16. Les déformations dans cette figure sont représentées en fonction du logarithme du nombre de cycles de

sollicitation. Ce type de représentation permet d'avoir une idée de l'évolution des déformations pour un nombre infini de cycles de chargement.

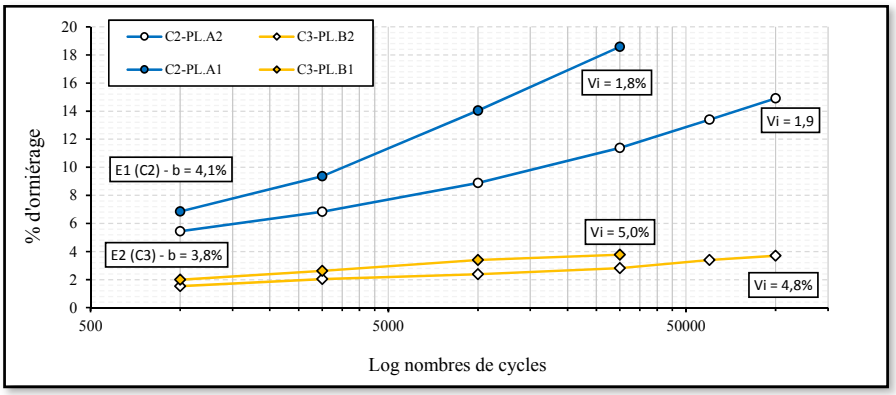


Figure 4.16 Évolution des ornières en fonction du log du nombre de cycles

L'allure des courbes de la Figure 4.16 montre qu'au-delà de 100 000 cycles, l'échantillon C2 va continuer de se déformer. Par contre, la déformation de l'échantillon C3 entre les cycles 60 000 et 100 000 tend déjà à se stabiliser.

4.7.2 Analyse des résultats d'orniérage

À 30 000 cycles, les plaques du lot d'échantillon C2 ornièrent en moyenne de 15,0%. Par contre, les plaques de l'échantillon C3 sont à une moyenne de 3,3% de déformation permanente. Les plaques de l'échantillon C2 ne respectent pas les exigences de la norme du MTQ. La moyenne de déformation permanente de l'échantillon C2 est très élevée. L'écart de déformation observé entre les deux échantillons est de 11,7%.

Après l'analyse des différents paramètres des plaques des deux échantillons, l'instabilité de l'échantillon C2 peut dans un premier temps être liée à une teneur en bitume plus élevée que celle de l'échantillon C3. Dans un second temps, on remarque que le pourcentage de vides des plaques C2 est inférieur à 2% alors que les plaques C3 se retrouvent avec environ 5% de vides.

Finalement, l'analyse de la granulométrie des plaques réalisée sur des résidus d'ignition bien après les essais à l'orniéreur révèle que le l'échantillon C2 contient plus de particules fines que l'échantillon C3. Le pourcentage de bitume et la teneur en fines plus élevés de l'échantillon C2 ont conduit à une teneur en vides des plaques de cet échantillon beaucoup plus faible que celles confectionnées avec l'échantillon C3 pour une même énergie de compactage. Il a été montré que l'incorporation du verre dans les enrobés bitumineux tend à diminuer leurs résistances à la déformation permanente (Lachance Tremblay, 2014). Cependant, une bonne fraction du verre dans l'EBPH 14, la classe intermédiaire (Sable C) joue seulement le rôle d'élément de remplissage et ne participe pas dans la transmission des efforts. Il permet de remplir les vides laissés entre les particules grossières et elle n'est censée avoir aucun impact significatif sur les performances du mélange à l'orniérage. Certes, il en est toute autrement pour le filler de verre. Notons que la grande stabilité de l'EBHP réside dans l'importance des contacts entre les grosses particules (10/14). Or si le dosage en bitume et en filler se retrouve en excès, il en ressort un effet d'interférence qui induit le desserrement des gros dans le squelette granulaire. Les résultats de l'échantillon C3 nous conduisent à conclure que lorsque les dosages des constituants sont conformes, les performances de l'EBHP14 – Verre à l'orniérage sont excellentes.

4.8 Détermination des modules complexes (MC) et modules de rigidité de l'EBHP 14 – Verre

Deux types d'essais de module ont été réalisés au cours de ce projet. Les essais de traction-compression ont permis de déterminer les modules complexes des éprouvettes fabriquées en laboratoire. Les éprouvettes prélevées sur chantier ont été testées en traction indirecte pour déterminer leur module de rigidité.

4.8.1 Présentation des éprouvettes testées

Un essai de module complexe a été réalisé pour chaque échantillon à l'aide de la presse MTS 810 sur des éprouvettes cylindriques. Les éprouvettes ont été prélevées par carottage des briquettes compactées à la PCG et des carottes prélevées sur chantier. Le Tableau 4-14

présente les caractéristiques des différentes éprouvettes testées dans le cadre de ce projet pour la détermination des modules complexes et modules de rigidité de l'EBHP14 – Verre. Les pourcentages de vides des différentes éprouvettes ont été calculés par la méthode volumétrique. La d_{mm} du matériau du camion 1 (C1) n'ayant pas été déterminé en laboratoire, le calcul du pourcentage de vides de cette éprouvette a été effectué en utilisant la moyenne des d_{mm} trouvées pour les échantillons des camions 2 et 3.

Tableau 4.14 Caractéristiques des éprouvettes de module complexe (MC) et module de rigidité

Éprouvette	**Hauteur (mm)**	**Diamètre (mm)**	**Masse (g)**	**Densité brute**	**d_{mm}**	**% vides**	**% vides PCG**
Éprouvettes fabriquées en laboratoire							
C2-MB1	126,08	74,13	1342,73	2,460	2,507	1,9	4,0
C3-MB1	140,51	74,05	1503,2	2,477	2,525	1,7	4,0
Carottes in situ							
C1	49,23	100,87	969,40	2,457	2,516	2,4	---
C2	52,94	100,84	1024,20	2,415	2,507	3,7	---
C3	47,92	100,87	923,15	2,404	2,525	4,8	---

Il existe au LCMB, pour les essais de module complexe, des procédures pour la réalisation de l'essai. Ces procédures facilitent l'utilisation des presses hydrauliques et permettent aux étudiants de vérifier en cours d'essai la qualité des signaux, de traiter et d'analyser les résultats de l'essai. Les résultats d'essai sont par la suite modélisés à l'aide d'un modèle rhéologique, en l'occurrence le modèle 2S2P1D. Seul les résultats des essais de détermination du module complexe par traction – compression ont été modélisés à l'aide du modèle 2S2P1D dans la cadre de cette étude.

4.8.2 Courbes dans le plan Cole – Cole

Les résultats de module complexe dans le plan Cole – Cole permet de représenter la partie imaginaire du module complexe en ordonnée et la partie réelle en abscisse. La Figure 4.16 montre la représentation du module de l'EBHP14-Verre dans le plan Cole-Cole pour les deux camions échantillonnés (C2 et C3).

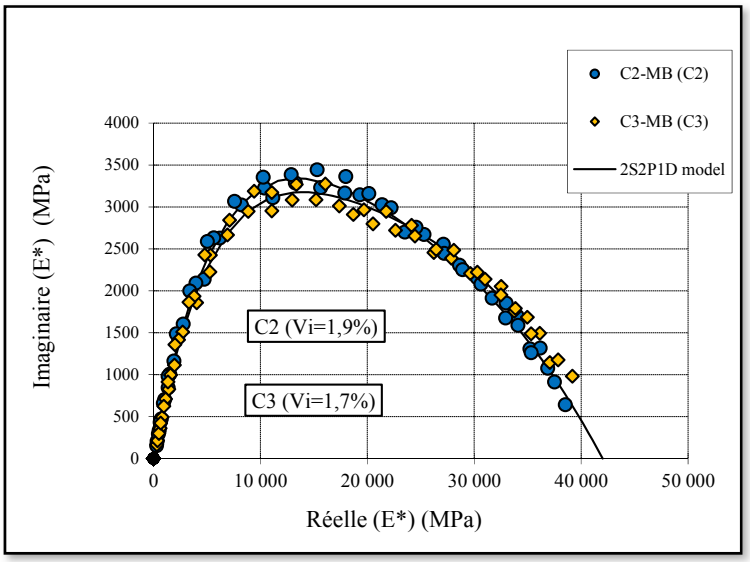


Figure 4.17 Représentation du module complexe de l'EBHP14-Verre dans le plan Cole-Cole

La Figure 4.16 montre qu'il n'existe pas un écart significatif entre les modules complexes des deux échantillons. De plus, les deux échantillons respectent en partie le principe d'équivalence temps – température dans le plan Cole-Cole. Toutefois, lorsque les essais de MC de deux éprouvettes ne sont pas réalisés aux mêmes températures d'essai, il n'est pas possible de faire une comparaison directe entre les résultats bruts. Dans ce cas, les résultats sont modélisés pour fin de comparaison entre les deux résultats (Perraton et al., 2016). Sur les résultats de chaque essai présenté en annexe II, il est possible de visualiser les différentes températures d'essai. Les températures d'essai diffèrent pour ces deux éprouvettes.

4.8.3 Courbes dans l'espace de Black

Les résultats de module complexe de l'EBHP14-Verre dans l'espace de Black sont présentés à la Figure 4.17 pour les deux camions d'échantillonnés (C2 et C3).

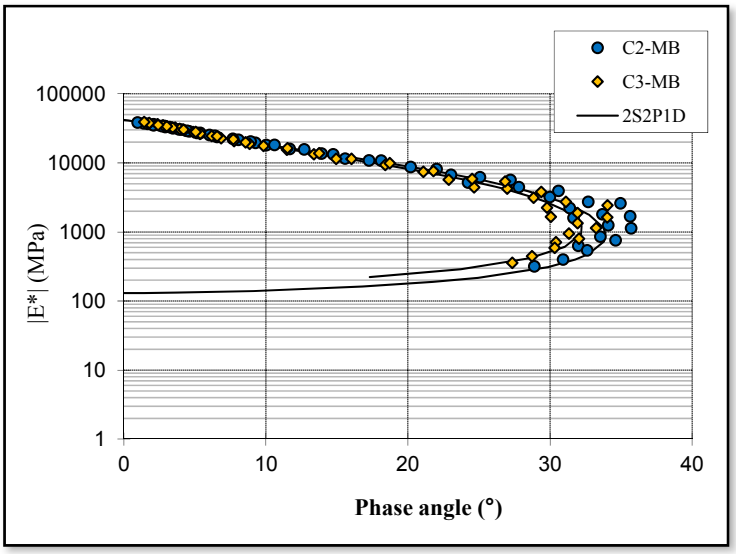


Figure 4.18 Représentation du module de l'EBHP14-Verre dans l'espace de Black

Les points expérimentaux dans cette figure ne décrivent pas une courbe unique. Les points des hautes températures dessinent des formes qui s'apparentent à des « virgules ». Donc le principe d'équivalence temps – température semble ne pas être respecté pour ce domaine de température. Il faut noter que les enrobés contenant des bitumes polymères ou des bitumes purs à fort taux de paraffines n'ont pas de courbe unique dans l'espace de Black (Di Benedetto et Corté, 2005). Tout comme dans le plan Cole – Cole, on n'observe pas d'écart significatif entre les résultats des deux échantillons. Mais, on peut remarquer tout de même que pour une raideur donnée que l'angle de phase de l'échantillon C2 est légèrement supérieur à celui de l'échantillon C3 dans le domaine des hautes températures.

4.8.4 Variation des facteurs de translation a_T et Tau

Les Figures 4.18 a et b présentent respectivement la variation des facteurs a_T et Tau des éprouvettes des échantillons C2 et C3 en fonction de la température. En superposant les résultats des deux éprouvettes, on observe des écarts entre ces différents facteurs. Pour les facteurs a_T, on remarque que les points des hautes températures, soit à partir de -10° C, se superposent et sont très proches du modèle WLF pour la fonction de translation a_T. Dans le domaine des basses températures, les coefficients de translation se décalent légèrement des valeurs du modèle WLF. La variation des Tau est très semblable à la variation des facteurs a_T pour les deux éprouvettes. Le comportement des deux éprouvettes diffère légèrement dans les basses températures.

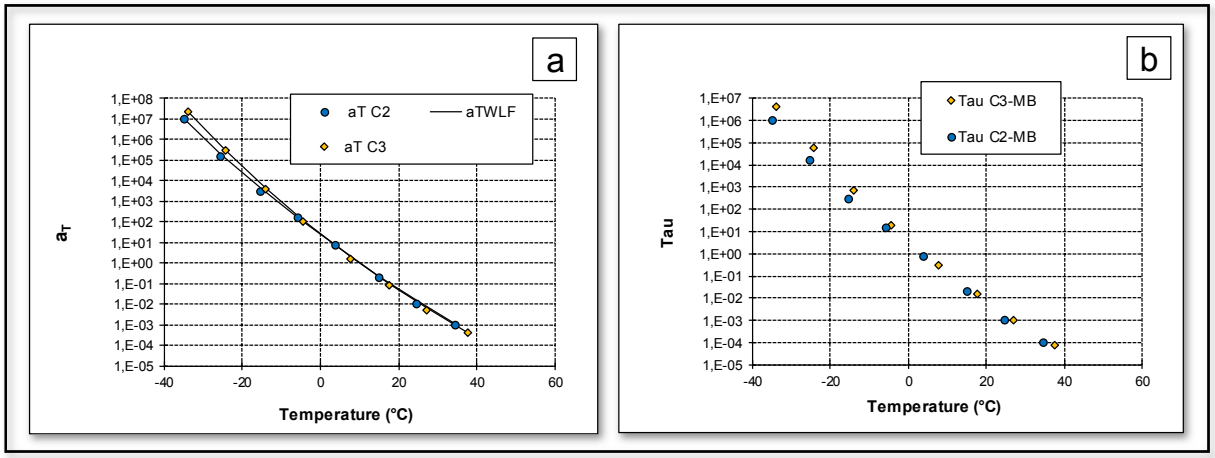


Figure 4.19 Variation des facteurs a_T (a) et Tau (b) des éprouvettes échantillons C2 et C3

4.8.5 Paramètres du modèle 2S2P1D

Dans le cadre de ce projet, l'analyse des résultats des essais de module complexe a été effectuée à l'aide du modèle rhéologique 2S2P1D. Une fonction « solveur » de l'outil Excel développée au LCMB permet de mettre en œuvre le modèle 2S2P1D en définissant des paramètres qui permettent le calage des résultats de l'essai au modèle rhéologique. Les

paramètres définis dans le cadre de ce projet pour les deux échantillons testés sont présentés au Tableau 4-15.

Tableau 4.15 Paramètres de calage du modèle 2S2P1D

$T_0 =$ 10°C	E^*							C_1	C_2
	E_{00} MPa	E_0 MPa	k	h	δ	τ_{0E} (s)	β		
C2-MB	200	42000	0,15	0,46	2,2	0,10	750	36,1	276,0
C3-MB	250	43000	0,15	0,46	2,2	0,19	750	32,9	240,9

Les paramètres k, h, δ et β représentent le mastic du mélange bitumineux et sont donc les mêmes pour les deux éprouvettes. Définir un de ces paramètres différents pour les deux échantillons signifie que les deux échantillons ont deux bitumes distincts. Mais pour une meilleure observation des écarts dans la modélisation, ces paramètres sont identiques pour les deux éprouvettes. Une fois tous les paramètres déterminés, l'ajustement des résultats de l'essai au modèle rhéologique est fait et les différentes représentations des résultats du module complexe sont alors bien calées au modèle rhéologique.

4.8.6 Différences entre les résultats expérimentaux et les valeurs simulées du modèle 2S2P1D

Lors de la réalisation des essais de détermination des modules complexes des deux mélanges de l'EBHP14 – Verre, les températures d'essai n'ont pas été les mêmes en cours d'essai pour les deux éprouvettes testées. Il n'est donc pas possible de déterminer directement dans ces conditions les écarts entre les résultats expérimentaux de ces deux éprouvettes. Toutefois, il est possible de comparer les différents résultats expérimentaux de chaque éprouvette avec les valeurs d'une référence. La référence choisie pour ces deux éprouvettes est les valeurs du modèle 2S2P1D du camion C3. Les Figures 4.20a et 4.20b présentent dans un espace semi-

logarithmique, les écarts entre les normes du module complexe, les angles de phase des échantillons de l'EBHP14 – Verre et la référence.

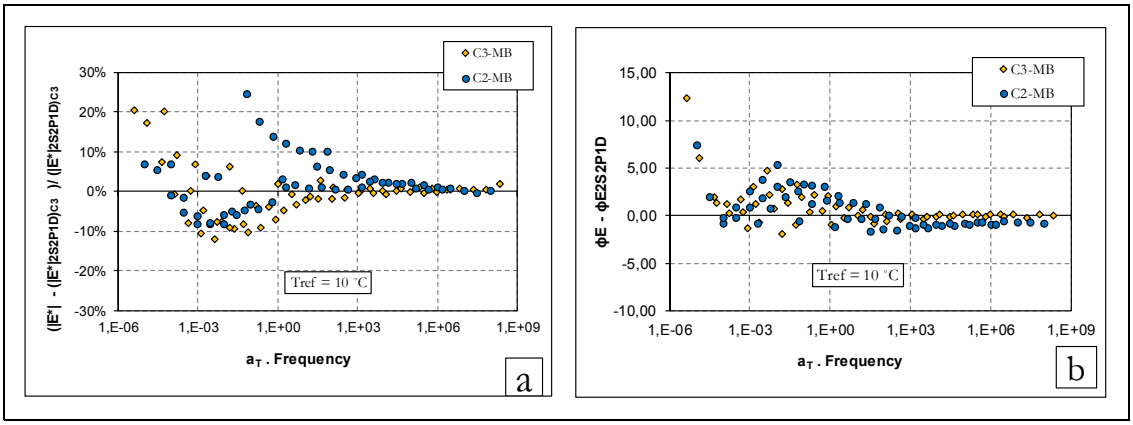


Figure 4.20 a) Écarts entre les valeurs expérimentales de |E*| et les valeurs de |E*| 2S2P1D de C3 b) Écart entre les angles de phase expérimentaux et angles de phase du modèle 2S2P1D de C3

De la Figure 4.20a, on remarque que les deux courbes sont pratiquement superposées dans les basses et hautes fréquences. Toutefois, dans les moyennes fréquences, on observe un écart dans le comportement des deux mélanges. Le mélange du camion C2 se comporte différemment dans le domaine des moyennes fréquences par rapport au camion C3.

Les écarts entre les angles de phase de chacun des deux échantillons et les valeurs du modèle 2S2P1D du camion C3 ont été aussi modélisés afin de permettre une comparaison entre les deux échantillons. La Figure 4.20b présente les écarts entre les angles de phase des résultats expérimentaux des deux échantillons (C2 et C3) et ceux du modèle 2S2P1D du camion C3.

Il n'existe pas d'écarts significatifs entre les angles de phase de ces deux mélanges. En basse fréquence, les résultats sont superposés. Dans les hautes fréquences, les écart sont très faible. Mais, on remarque tout de même que le mélange du camion C2 a des valeurs d'angle de phase légèrement inférieures à celles du camion C3.

La Figure 4.21 présente les écarts entre les facteurs de translation expérimentaux des mélanges des deux camions (C2 et C3) et les facteurs WLF du modèle 2S2P1D du camion C3. La Figure 4.21 montre des écarts important entre les coefficients de translation des deux mélanges. Les écarts varient de -54 à 213%. En basse température, l'écart maximal est de -54%. Dans les moyennes températures, on observe un écart maximal de 213% et dans les hautes températures, l'écart est de 174%.

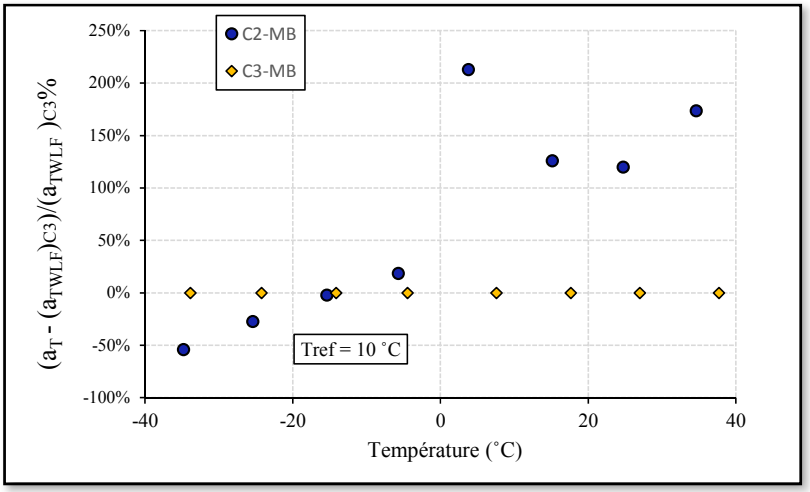


Figure 4.21 Écarts entre les a_T expérimentaux des camions C2 et C3 et les a_T de simulation du modèle WLF du camion C3

4.8.7 Valeurs des modules des essais de laboratoire (E*), des essais en traction indirecte sur les carottes d'enrobé et de l'essai in situ au FWD

Le Tableau 4.16 présente les résultats des différents essais de module de rigidité réalisés sur l'EBHP14 – verre. Le résultat de l'essai in situ au FWD est tiré du rapport de maîtrise de Kpossou (2016). Les résultats détaillés des essais de module de rigidité par traction indirecte en laboratoire sont présentés en annexe II et III. Afin de comparer les résultats des différents essais de laboratoire, l'équation (3.1) tirée de Olard, Noël et Loup (2006) a été utilisée pour le calcul d'une fréquence de sollicitation équivalente quant aux éprouvettes testées en traction indirecte option 1 (annexe C). Cette équation permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Le temps de sollicitation considéré pour déterminer la fréquence de sollicitation équivalente pour les essais en traction indirecte est de 124 ±4ms. Ce temps

correspond au temps de montée de la force en cours de sollicitation. Dans le Tableau 4-16, on retrouve les modules de rigidité obtenus des essais de module complexe pour une température de 10˚ C et des fréquences de 10 Hz et 1 Hz (essais en laboratoire). Pour la rigidité in situ au FWD, nous n'avons pas déterminé de fréquence sollicitation pour cet essai et la température d'essai est de 6 ˚ C.

Tableau 4.16 Module de rigidité de l'EBHP14-Verre

Échantillons	|E*| (MPa)	T (˚ C)	Fr (Hz)	Vi %	b %	Essais
Éprouvettes fabriquées en laboratoire (Module complexe)						
C2	14 109	10	10	1,9	4,1	Traction-compression
	9 437		1			
C3	14 843		10	1,7	3,8	
	9 885		1			
Carottes in situ						
C1	9 797	10	10 (1)	2,4	s.o	Traction indirecte
	5 883		1,2 (2)			
C2	10 715		10 (1)	3,7	4,1	
	6 696		1,2 (2)			
C3	8 513		10 (1)	4,8	3,8	
	5 415		1,2 (2)			
Essai in situ – retro calcul						
Site SAQ	5 031	6	---	---		FWD

(1) Fréquence d'essai cyclique sinusoïdale
(2) Fréquence calculée en considérant le temps de chargement suivant l'équation 3.1

Les pourcentages de vides reportés dans le Tableau 4-16 ont été déterminés par la méthode volumétrique. Les valeurs de vides sont très similaires pour les éprouvettes fabriquées en laboratoire. On peut de fait effectuer une comparaison directe des modules de ces deux

éprouvettes pour une température et fréquence choisie. Ainsi, l'écart de |E*| à 10 ˚C et 10 Hz entre les deux échantillons C2 et C3 pour les essais en traction – compression est de 734 MPa. Cet écart n'est pas élevé, mais il montre toutefois que l'échantillon C3 (b = 3,8%) est tout de même plus rigide que l'échantillon C2 (b = 4,1%).

4.9 Analyse des modules de rigidité in situ de l'EBHP 14 – Verre et validation des résultats des essais en laboratoire

Les essais in situ pour la détermination des modules de rigidité de l'EBHP14 – Verre ont été réalisés sur un quai de déchargement de la SAQ dans le cadre du projet de maîtrise de Kpossou (2016). Les modules de l'enrobé ont été calculés par rétrocalcul à partir des bassins de déflexion mesurés au déflectomètre à masse tombante (FWD). Le Tableau 4-17 présente les différentes valeurs de module de l'EBHP14 – Verre obtenu in situ.

Tableau 4.17 Modules in situ de l'EBHP14-Verre
Tiré de Kpossou (2016)

Enrobé de verre							
Modules rétrocalculés_Alizé (MPa)	*Température d'essai (°C)*	*Température d'essai (°F)*	*Température d'ajustement (°C)*	*Température d'ajustement (°F)*	Modules ajustés (MPa)		
					Kim et al.	*Stubstad et al.*	*moy.*
6200	6	42,8	**20**	68	2552	2883	*2717*
4000	6	42,8	**20**	68	1646	1860	*1753*
5050	6	42,8	**20**	68	2078	2348	*2213*
3763	6	42,8	**20**	68	1549	1750	*1649*
5775	6	42,8	**20**	68	2377	2686	*2531*
5525	6	42,8	**20**	68	2274	2569	*2422*
5200	6	42,8	**20**	68	2140	2418	*2279*
4738	6	42,8	**20**	68	1950	2203	*2077*
5031			***MOY. ARITHM. À 20 °C***		**2071**	**2340**	**2205**

Les valeurs du module de rigidité de l'enrobé à 10 ˚C et aux fréquences 10 Hz et 1 Hz déterminées en laboratoire ont été reportées au Tableau 4-17. On remarque que les modules

de rigidité (E*) des éprouvettes fabriquées en laboratoire à partir des échantillons d'enrobé prélevés sur chantier lors de la mise en œuvre de la chaussée du quai de déchargement sont supérieurs aux valeurs de module de rigidité établi en traction indirecte pour les éprouvettes prélevées par carottage dans la chaussée. Selon Olard, Noël et Loup (2006), la valeur de module de rigidité déterminée à l'aide un essai de traction indirecte est toujours supérieure à la valeur de module complexe de l'enrobé pour une même température et fréquence. Ce qui n'est pas le cas pour l'EBHP14-Verre. Néanmoins, les éprouvettes prélevées in situ ont en moyenne une teneur en vides supérieurs à la teneur en vides moyenne des éprouvettes fabriquées en laboratoire. Par ailleurs, les modules déterminés en laboratoire sont dans les deux cas d'essai (traction – compression et traction indirecte) supérieurs aux valeurs estimées à partir des essais in situ (FWD) et ce bien que les modules in situ aient été mesurés à une température plus faible de 6 ˚C. Il est donc nécessaire de souligner que les éprouvettes prélevées sur chantier avaient en moyenne 4,2% de vides (sans prise en compte de l'éprouvette du camion 1). Par contre, pour les éprouvettes fabriquées en laboratoire, les vides étaient en moyenne de 1,9%. Aussi, les essais au FWD ont été réalisés une année avant le prélèvement des carottes in situ et la fabrication des éprouvettes en laboratoire. Toutefois, il n'est pas recommandé de comparer directement les résultats au FWD et les résultats en laboratoire, car les essais qui ont permis de déterminer les rigidités des mélanges ne sont pas de même types.

Les écarts entre les valeurs de modules de l'enrobé en laboratoire et celles de l'enrobé en place peuvent être donc liés en partie à la teneur en vides. D'autre part, il faut souligner au passage que les trois carottes prélevées sur chantier n'avaient pas la même épaisseur. L'épaisseur des carottes était d'environ 100mm, 74mm et 68mm respectivement pour les camions 1, 2 et 3. De plus, les rapports de chantier mentionnent des arrêts du finisseur lors de la mise en œuvre du revêtement lié aux retards de chargement des camions 2 et 3 en centrale, impactant ainsi la compacité par endroit de l'enrobé. Il se pourrait donc que le contact gros – sur – gros tant souhaité pour l'EBHP14 – Verre n'ait pas été effectif dans certains cas. Les difficultés et/ou les problèmes rencontrés lors de mise en œuvre du revêtement pourraient aussi en partie expliquer les écarts observés entre les valeurs de module de l'enrobé en

laboratoire et celles sur chantier. Les valeurs de module complexe obtenu en laboratoire pour les échantillons prélevés sur chantier lors de la réalisation de la chaussée reflètent les performances attendues du mélange à sa formulation. Ces valeurs sont en adéquation avec la valeur de module complexe obtenue par Caron (2015) pour le même type d'enrobé testé dans le cadre de son mémoire de maîtrise et dont la synthèse est présentée au Tableau 1-5. De la valeur du module estimée par rétro-calcul aux valeurs obtenues en laboratoire à partir des éprouvettes prélevées dans le revêtement, on constate une évolution de la rigidité de cet enrobé. Il se pourrait donc que les modules de rigidité in situ atteignent un jour les valeurs obtenues en laboratoire lorsque les pourcentages de vides in situ seront voisins de ceux obtenus pour les éprouvettes fabriquées en laboratoire.

4.10 Résistance à la fatigue

Les essais de fatigue ont été réalisés pour chacun des deux échantillons C2 et C3. Selon les disponibilités des presses hydrauliques MTS, deux presses (MTS 810 et Bionix) ont été utilisées pour la réalisation des essais de fatigue. Plusieurs éprouvettes ont été testées pour chaque échantillon. Sur la base des critères de qualité des résultats d'un essai de fatigue, seules quatre éprouvettes testées ont été retenues pour l'analyse de la résistance en fatigue pour chaque échantillon testé. Pour cette étude, les résultats d'un essai sont considérés comme étant acceptable lorsque la plupart des critères ci-dessous sont respectés.

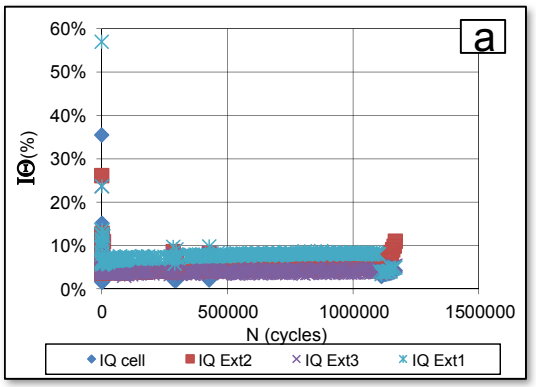
1) les indices de qualité (IQ) pour chacun des signaux doivent être inférieurs à 15% durant l'essai ;
2) l'écart de déformation d'un extensomètre par rapport à la moyenne des trois extensomètres doit rester inférieur à 25% ;
3) un minimum de 60 000 cycles de sollicitation doit être atteint avant rupture ;
4) être en mesure de distinguer la fatigue de l'éprouvette à partir d'un des critères de rupture de fatigue.

4.10.1 Résultats des essais de fatigue

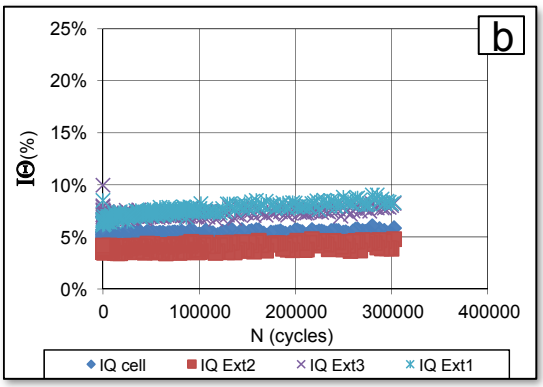
Pour être en mesure de déterminer la loi de fatigue d'un matériau bitumineux, il est nécessaire de réaliser l'essai de fatigue sur plusieurs éprouvettes pour différentes amplitudes de déformation.

4.10.2 Indices de qualité des signaux

Les indices de qualité des signaux témoignent de la qualité des essais de fatigue réalisés. Seuls les résultats d'une éprouvette type représentatifs des autres seront présentés par échantillon. Les autres résultats seront alors présentés en l'annexe V. La Figure 4.22a montre l'évolution des indices IQ de l'éprouvette C2-MB3 de l'échantillon C2 en fonction du nombre de cycles de sollicitation.



a) C2-MB3 (10 °C, 10Hz et 153 µm/m)



b) C3-MB1 (10 °C, 10 Hz et 132 µm/m)

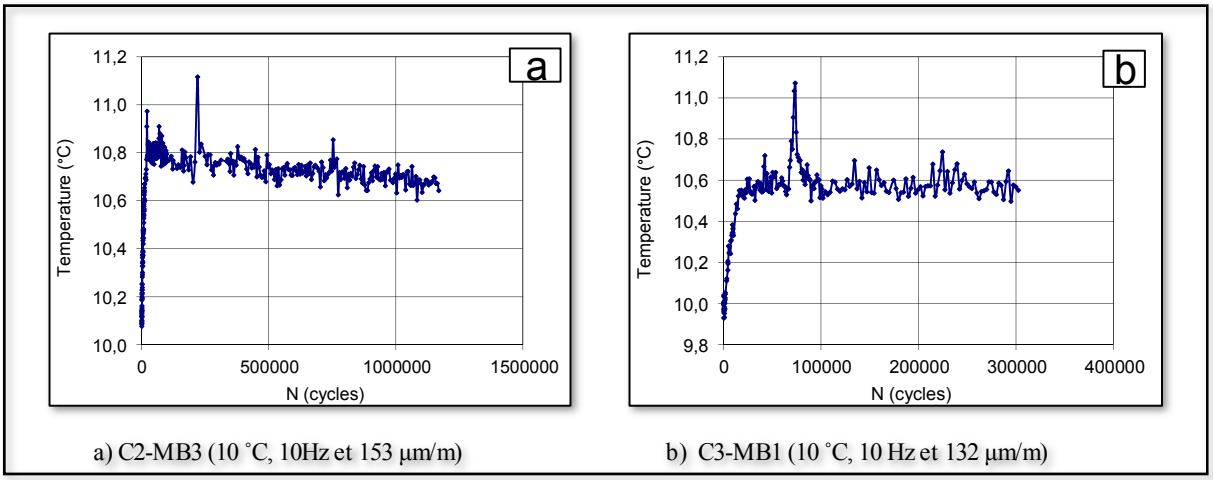
Figure 4.22 Indice de qualité des signaux des éprouvettes

On remarque que les indices IQ de l'éprouvette C2-MB3 restent tous inférieurs à 15% tout au long de l'essai. Donc les résultats de cet essai sont de bonne qualité. La Figure 4.22 b) présente l'évolution des indices IQ de l'éprouvette C3-MB1 de l'échantillon C3. Les indices IQ dans ce cas aussi sont tous inférieurs au 15% toléré tout au long de l'essai. On remarque d'ailleurs que l'évolution des indices IQ pour les deux éprouvettes reste même en dessous de

10% tout au long des deux essais. Le fait d'avoir des indices IQ inférieurs à 10% indique que la presse hydraulique reste stable au cours de l'essai. En d'autres termes, les paramètres de sensibilité (PIDF) de la presse ont été bien ajustés.

4.10.3 Évolution de la température en cours d'essai

Les essais de fatigue ont été réalisés à une température de 10 ˚C. L'enceinte de la presse dans laquelle est installée l'éprouvette pour un essai de fatigue est une chambre de conditionnement qui permet le contrôle de la température, à l'aide d'un ordinateur en cours essai. Dans la procédure de l'essai de fatigue, la consigne de mise en température a une durée de 4 heures. On estime que c'est le temps requis pour que le cœur de l'éprouvette soit à la température d'essai qui est de 10 ± 0,7 ˚C. Le système maintient tout au long de l'essai dans la chambre de la presse cette température. Trois sondes de température placées sur les faces de l'éprouvette permettent de mesurer l'évolution de la température de celle-ci au cours de l'essai. Les Figures 4.23 a) et b) montrent l'évolution de la température au sein des éprouvettes C2-MB3 et C3-MB1 en fonction du nombre de cycles de sollicitation au cours des essais de fatigue.



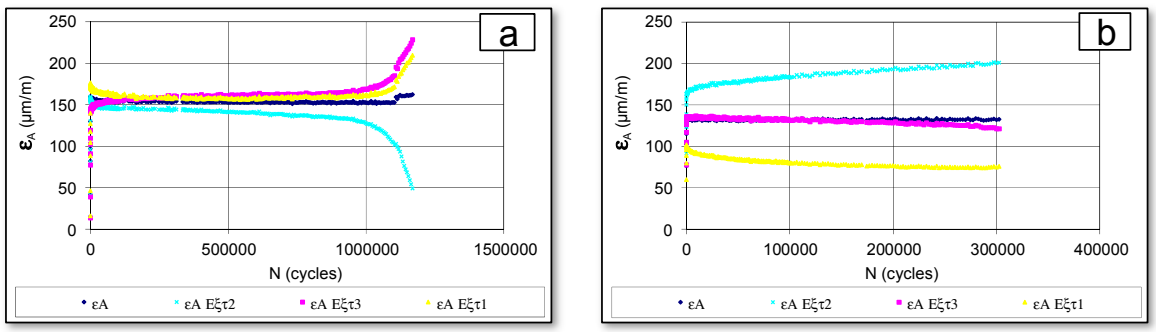
a) C2-MB3 (10 ˚C, 10Hz et 153 µm/m) b) C3-MB1 (10 ˚C, 10 Hz et 132 µm/m)

Figure 4.23 Évolution de la température au sein de l'éprouvette

On remarque un échauffement des éprouvettes par une augmentation rapide de la température au cours des 20 000 premiers cycles de sollicitation. Pour l'éprouvette C2-MB3 de l'échantillon C2 (Fig. 4.23a), l'essai début à 10,1 ˚C et après 21 159 cycles la température en surface de l'éprouvette monte jusqu'à 11 ˚C avant de chuter en dessous de 10,8 ˚C pour se stabiliser autour de 10,7 ˚C à la fin de l'essai. Pour l'éprouvette C3-MB1, on observe un échauffement en début d'essai. Par la suite, la température de l'éprouvette se stabilise au tour de 10,6 ˚C jusqu'à la fin de l'essai (Fig. 4.23b).

4.10.4 Évolution de la déformation

Trois extensomètres montés sur l'éprouvette permettent de mesurer l'amplitude de déformation au cours de l'essai de fatigue. L'amplitude de déformation axiale (ε_{Aax}) de l'éprouvette est égale à la moyenne des déformations mesurées par les différents extensomètres. L'essai est réalisé en déformation imposé. L'amplitude de déformation des extensomètres dans la phase II varie très peu jusqu'à ce que l'éprouvette atteigne la phase III. Les déformations axiales (ε_A) imposées aux éprouvettes en cours d'essai sont mesurées au centre des éprouvettes à l'aide des extensomètres. Ces valeurs centrées mesurées diffèrent d'un extensomètre à l'autre et évoluent au cours de l'essai. La Figure 4.24a présente les déformations centrées de l'éprouvette C2-MB3.



a) C2-MB3 (10 ˚C, 10Hz et 153 µm/m)

b) C3-MB1 (10 ˚C, 10 Hz et 132 µm/m)

Figure 4.24 Évolution des déformations de l'éprouvette

On remarque pour la Fig. 4.24a que les déformations des extensomètres ($\varepsilon_{A\ Ext\#i}$, pour i de 1 à 3) diffèrent peu et leur évolution en cours d'essai est aussi peu marquée à l'exception de l'extensomètre 2 dont l'évolution est quand même assez visible. On remarque aussi un changement brusque dans la déformation de chaque extensomètre et cela pourrait correspondre au passage à la phase III.

La Figure 4.24b présente les déformations de l'éprouvette C3-MB1 en fonction du nombre de cycles de sollicitation. Pour le cas de cette éprouvette, les déformations des différents extensomètres sont bien différentes. Par contre, elles évoluent très peu au cours de l'essai. De plus, on n'observe pas de changement brusque dans l'évolution des déformations. Mais la rupture de l'éprouvette est subvenue tout juste après les 300 000 cycles de sollicitation.

En cours d'essai, on détermine l'écart de déformation ($\Delta\varepsilon_{ext\#i}$, pour i de 1 à 3) de chacun des trois extensomètres par rapport à la moyenne de déformation des trois extensomètres. Cet écart pour chaque extensomètre doit être inférieur ou égal à ± 25% sinon l'éprouvette est considérée comme étant déformée par un champ de contraintes non homogène. Autrement, cette éprouvette serait à ce moment-là dans la phase III de la fatigue. La Figure 4.25 présente l'écart de déformation des trois extensomètres de l'éprouvette C2-MB3 du mélange C2. Seuls les écarts de déformation de l'éprouvette du mélange E1 sont présentés dans ce paragraphe.

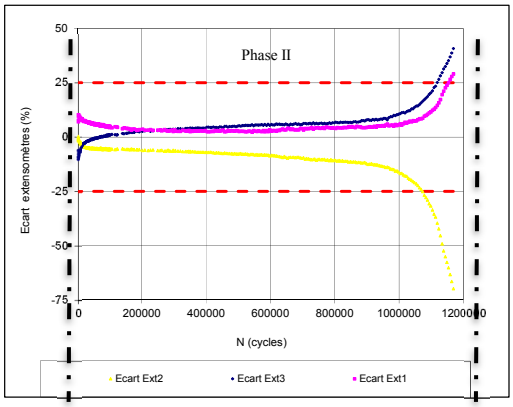
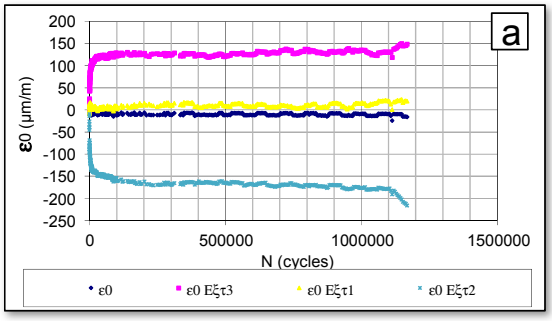


Figure 4.25 Évolution des écarts de déformation des extensomètres en cours d'essai

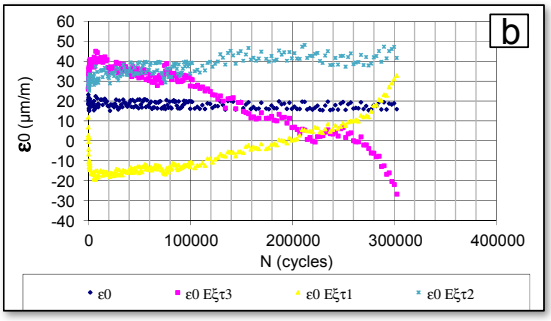
On constate à cette figue que les écarts de déformation des extensomètres n'atteignent pas les ± 25% au même moment. L'écart de déformation de l'extensomètre 2 est le premier à atteindre cette valeur. Les deux extensomètres restants l'atteignent plusieurs milliers de cycles plus tard, mais toujours pas au même moment.

4.10.5 Évolution du centre de déformation

La déformation centrée représente la valeur moyenne du signal de déformation ou la déformation permanente. Selon Baaj (2002), le centre du signal de consigne est maintenu par la presse à une valeur nulle et n'évolue pas en cours d'essai de fatigue. Seules les valeurs moyennes des déformations des trois extensomètres évoluent en cours d'essai. La Figure 4.26a présente l'évolution du centre de déformation de l'éprouvette C2-MB3 de l'échantillon C2 en fonction du nombre de cycles de sollicitation.



a) C2-MB3 (10 °C, 10Hz et 153 µm/m)



b) C3-MB1 (10 °C, 10 Hz et 132 µm/m)

Figure 4.26 Évolution du centre de déformation de l'éprouvette

Pour l'éprouvette C2-MB3, on remarque que le signal du centre de déformation est effectivement maintenu à zéro tout au long de l'essai de fatigue.

La Figure 4.26b présente la courbe d'évolution du centre de déformation de l'éprouvette C3-MB1 de l'échantillon C3. On constate dans ce cas qu'au début de l'essai le centre du signal de consigne n'est pas nul, mais égal à 18. Toutefois, le centre de déformation reste maintenu

à cette valeur durant tout l'essai. Il se peut dans ce cas que la consigne n'ait pas été très bien respectée par la presse. Il faut aussi noter que des quatre éprouvettes retenues pour l'échantillon C3 seule l'éprouvette C3-MB4 a la valeur du centre de déformation presque nulle. Pour les éprouvettes C3-MB2 et C3-MB3, les centres de déformation sont respectivement de – 5 µm/m (compression) et 10 µm/m (traction). Ces éprouvettes ont tout de même été retenues afin que la loi de fatigue pour cet échantillon soit établie.

4.10.6 Évolution de la contrainte

La déformation imposée au cours de l'essai de fatigue engendre au sein de l'éprouvette une contrainte qui évolue avec les cycles de sollicitation. La Figure 4.27 illustre l'évolution de l'amplitude de la contrainte sinusoïdale de sollicitation de l'éprouvette C2-MB3 de l'échantillon C2 testé dans le cadre de ce projet.

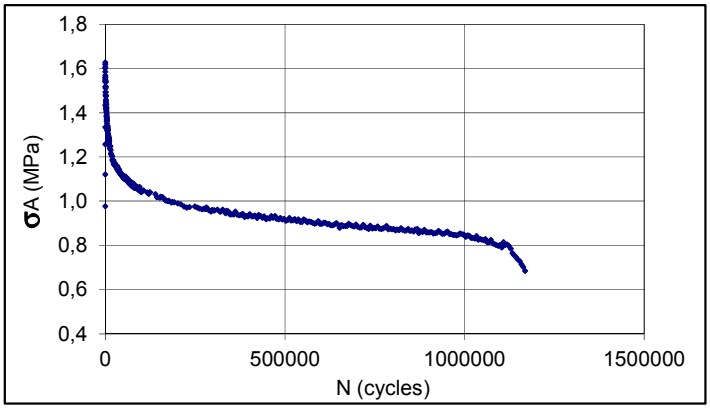
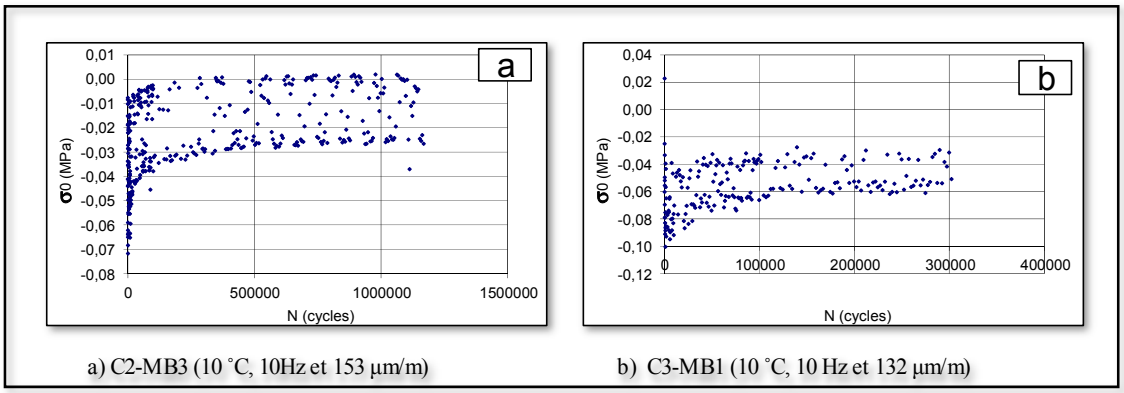


Figure 4.27 Évolution de la contrainte en cours d'essai de l'éprouvette C2-MB3

On remarque une diminution très rapide de la contrainte au début de l'essai, suivi par une diminution beaucoup plus lente sur un grand nombre de cycles de sollicitation et finalement une autre phase de diminution rapide de contrainte. On peut ainsi distinguer les trois phases de l'essai de fatigue. La diminution très rapide de la contrainte en début d'essai caractérise la phase I. La partie de chute lente de la contrainte représente la phase II et juste après on rentre en phase III de l'essai de fatigue. La contrainte centrée (σ_0) qui est la réponse du matériau à

la sollicitation est représentée pour les deux échantillons (C2 et C3) aux Figures 4.28a et 4.28b.



a) C2-MB3 (10 °C, 10Hz et 153 µm/m) b) C3-MB1 (10 °C, 10 Hz et 132 µm/m)

Figure 4.28 Évolution de la contrainte centrée de l'éprouvette

On constate dans les deux cas que σ_0 augmente très rapidement au début de l'essai, mais elles se stabilisent sans atteindre des valeurs de zéro. L'éprouvette C2-MB3 (Fig.4.28a) se rapproche un peu plus du zéro que l'éprouvette C3-MB1 (Fig.4.28b). Selon Baaj (2002), des valeurs proches de zéro signifient que l'éprouvette se relaxe en cours d'essai.

4.10.7 Évolution de l'angle de phase

Le déphasage entre la contrainte de sollicitation et la déformation de l'éprouvette est déterminé en cours d'essai et représenté en fonction du nombre de cycles de sollicitation. Cette représentation permet de suivre l'évolution de l'angle de phase au cours de l'essai. Les Figures 4.29a et 4.29b présentent l'évolution de l'angle de phase des éprouvettes C2-MB3 et C3-MB1.

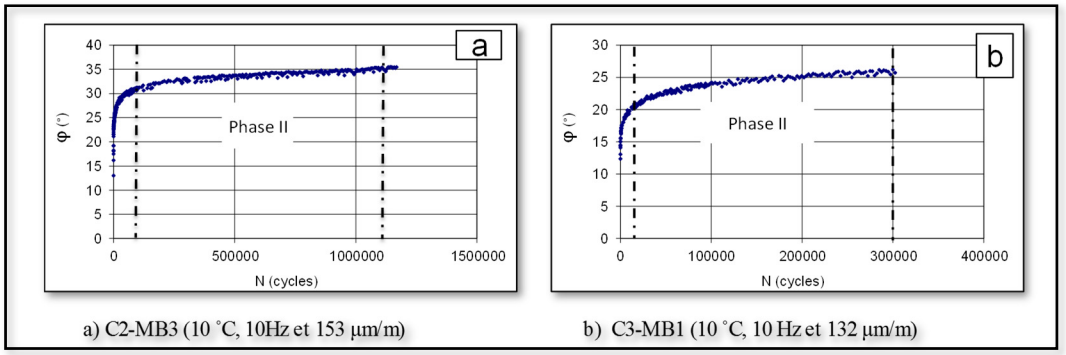


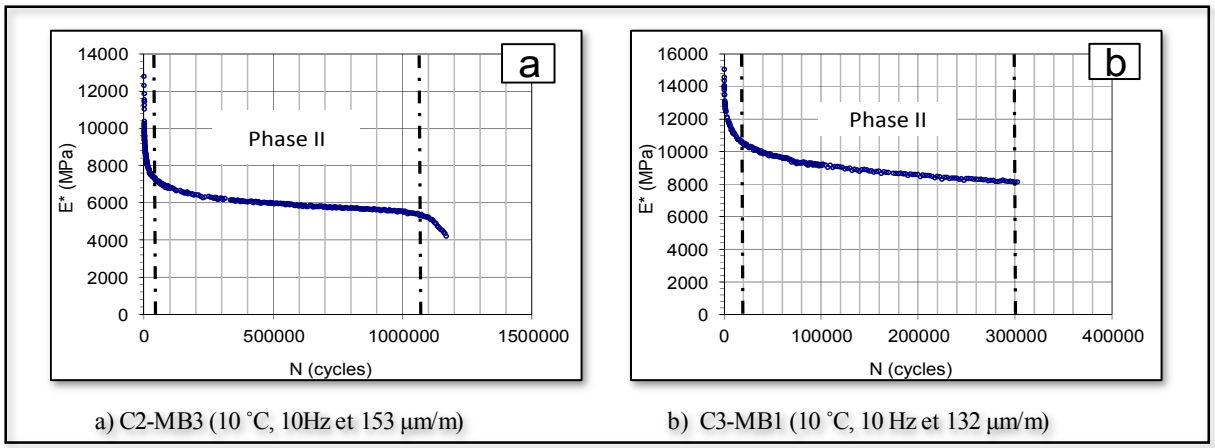
Figure 4.29 Évolution de l'angle de phase de l'éprouvette

On observe une augmentation très rapide de l'angle de phase de cette éprouvette au cours des 80 000 premiers cycles de sollicitation. Cette augmentation est liée à l'échauffement de l'éprouvette, c'est la phase I. Au cours de la phase II, l'augmentation de l'angle de phase est beaucoup plus lente et progressive jusqu'à l'atteinte de la valeur maximale. Par la suite, on observe une légère chute de l'angle de phase pendant une dizaine de milliers de cycles suivis par une légère augmentation de celle-ci. Cela correspond à phase III et l'essai a été par la suite arrêté.

La Figure 4.29b présente l'évolution de l'angle de phase de l'éprouvette C3-MB1. Le comportement de cette éprouvette est assez semblable à celui de l'éprouvette C2-MB3 dans les phases I et II. La différence en phase III est que l'éprouvette C3-MB1 atteint immédiatement la rupture dès le début de la phase III alors que pour l'éprouvette C2-MB3, l'essai a été arrêté sans rupture de l'éprouvette. Aussi, on constate une grande différence au niveau de la valeur maximale de l'angle de phase des deux mélanges. Pour C2, la valeur maximale de l'angle de phase est de 35 ° alors que cette valeur n'est que de 26 ° pour C3. Par ailleurs, l'éprouvette C3-MB1 atteint la rupture à 302 490 cycles de sollicitation pour une déformation imposée de 140 µm/m. Par contre, il n'y a pas de rupture physique pour l'éprouvette C2-MB3 sollicitée à 160 µm/m après 1 143 750 cycles.

4.10.8 Évolution de la norme du module complexe

L'essai de fatigue permet, entre autres, de déterminer le module complexe de l'éprouvette testée pour la température et fréquence d'essai (10 ˚C et 10 Hz) et d'en suivre l'évolution de sa norme en cours d'essai. Les Figures 4.30a et 4.30b présentent l'évolution des normes des modules complexes en fonction du nombre de cycles de sollicitation des éprouvettes des deux échantillons C2 et C3.



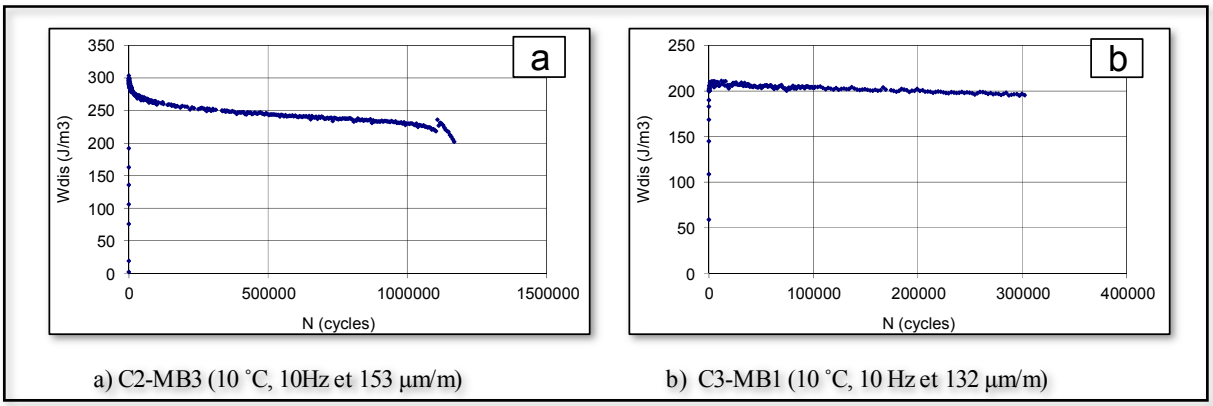
a) C2-MB3 (10 ˚C, 10Hz et 153 µm/m) b) C3-MB1 (10 ˚C, 10 Hz et 132 µm/m)

Figure 4.30 Évolution de la norme du module complexe de l'éprouvette

Les évolutions des normes des modules complexes illustrées sur les deux Figures 4.30a et 4.30b sont très similaires. On remarque une chute très rapide des normes de module complexe en début d'essai. On est dans la phase I de la fatigue et les effets biaisant (échauffement et thixotropie) sont à l'origine de cette évolution de la norme du module complexe. En phase II, on constate une chute très lente et presque linéaire de la norme du module pour chacune des deux éprouvettes. Finalement, la transition entre la phase II et III est marquée par une diminution importante de la norme du module pour l'éprouvette C2-MB3. Pour C3-MB1, la rupture physique intervient en début de la phase III. L'éprouvette C2-MB3 atteint la phase III de la fatigue et l'essai est arrêté quelques milliers de cycles après.

4.10.9 Évolution de l'énergie

L'énergie dissipée dépend de la contrainte, de la déformation et de l'angle de phase. En mode déformation, son évolution au cours de l'essai de fatigue est une fonction décroissante. Les Figures 4.31a et 4.31b illustrent l'évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles de sollicitation des éprouvettes des éprouvettes C2-MB3 et C3-MB1.



a) C2-MB3 (10 °C, 10Hz et 153 µm/m) b) C3-MB1 (10 °C, 10 Hz et 132 µm/m)

Figure 4.31 Évolution de l'énergie dissipée de l'éprouvette

L'énergie dissipée pour les deux éprouvettes décroit en cours d'essai. On observe une évolution quasi linéaire et une chute très lente de l'énergie dissipée pour l'éprouvette C3-MB1. Dans le cas de l'éprouvette C2-MB3, l'énergie dissipée chute rapidement en début d'essai, suivi d'une diminution lente et linéaire dans la phase II et une chute très rapide dans la phase III.

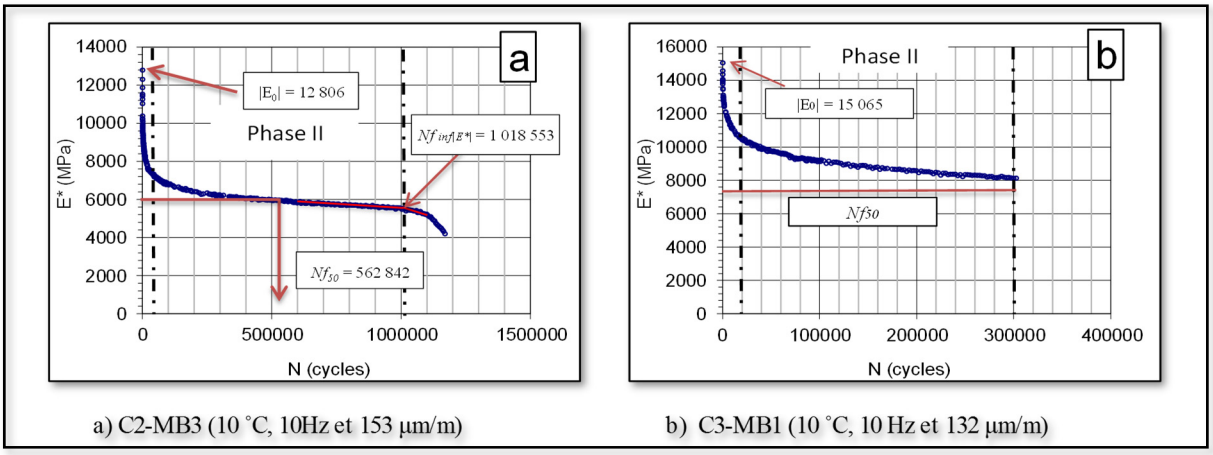
4.10.10 Analyse des résultats des essais de fatigue

L'analyse des résultats des différents essais de fatigue réalisés dans le cadre de ce projet est basée sur l'étude des critères de rupture de fatigue. Ces critères ont permis de valider les différents essais réalisés et de tracer les courbes de fatigue de chaque mélange selon la loi de Wöhler.

4.10.10.1 Durée de vie des éprouvettes de fatigue et critères de rupture

Les critères de rupture de fatigue permettent de déterminer le nombre de cycles correspondant à la fatigue des éprouvettes testées. Les différents critères utilisés dans le cadre de ce projet et présentés au §1.5.3.3 sont les critères classiques (Nf_{50}), celui visant à cerner la transition entre les phases II/III ($Nf_{II/III}$) et un critère basé sur le point d'inflexion de la relation |E*| - N ($Nf_{inf|E^*|}$). La méthode du point d'inflexion ($Nf_{inf|E^*|}$) est utilisée pour l'évolution de la norme du module complexe et pour l'évolution des écarts de déformation des extensomètres. Le critère (Nf_{50}) permet de déterminer le nombre de cycles qui correspond à une perte de 50% du module initial de l'éprouvette. Le module initial de l'enrobe E_0, peut être déterminé à partir du 6e cycle de sollicitation, ou entre 1er et 50e cycles ou encore entre 1er et 300e cycles de l'essai de fatigue. Pour Di Benedetto et Corté (2003) E_0 est mesuré au 100e cycle.

Les Figures 4.32a et 4.32b illustrent la détermination du nombre de cycles correspondant aux critères (Nf_{50}) et ($Nf_{inf|E^*|}$) des éprouvettes C2-MB3 et C3-MB1. Pour l'éprouvette C2-MB3, le nombre de cycles correspondant au critère Nf_{50} est de 562 842 cycles. Suivant le critère $Nf_{inf|E^*|}$, cette valeur est 1 018 533 cycles. Dans le cas de l'éprouvette C3-MB1, les deux critères sont atteints au même moment, car la rupture physique de l'éprouvette est survenue avant que l'essai ne soit arrêté.



a) C2-MB3 (10 °C, 10Hz et 153 µm/m) b) C3-MB1 (10 °C, 10 Hz et 132 µm/m)

Figure 4.32 Détermination du nombre de cycle correspondant aux critères classiques et points d'inflexion de rupture des éprouvettes

4.10.10.2 Critère de transition entre les phases II et III

La transition entre les phases II et III peut être établie à l'aide de deux sous critères, que sont une valeur ± 25% des écarts de déformation entre les extensomètres et la valeur maximale de l'angle de phase. La méthode géométrique des points d'inflexion est aussi utilisée pour identifier le nombre de cycles correspondant à la transition entre les phases II et III. On détermine ainsi les nombres de cycles $Nf_{\Delta\varepsilon ext}$, $Nf_{inf\Delta\varepsilon ext}$ et $Nf_{\varphi max}$ correspondant à la transition entre les phases II et III. Les Figures 4.33a et 4.33b présentent les nombres de cycles correspondant à la transition des phases II et III des éprouvettes C2-MB3 et C3-MB1 pour les critères $Nf_{\Delta\varepsilon ext}$ *et* $Nf_{inf\Delta\varepsilon ext}$.

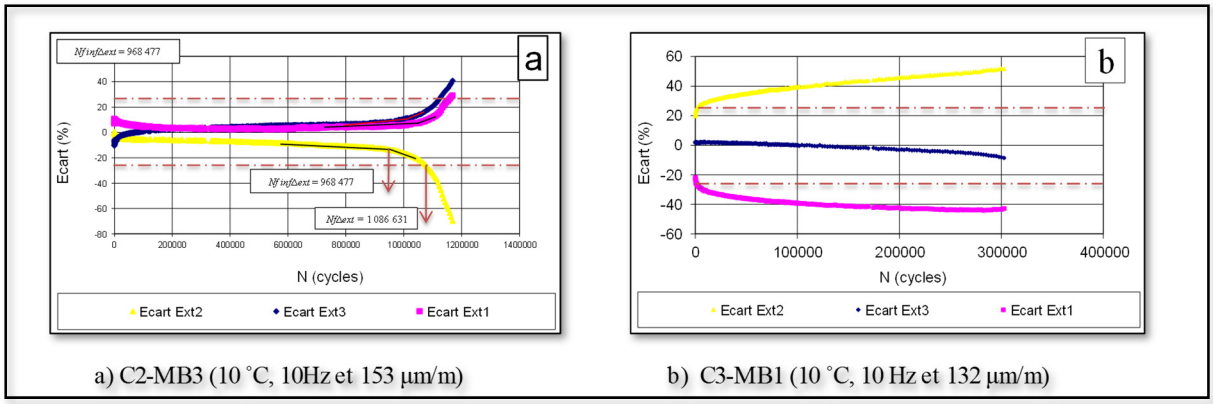


Figure 4.33 Détermination du nombre de cycles correspondant à 25% d'écart de déformation d'un des extensomètres

L'éprouvette C3-MB1 a atteint la rupture. De fait, le *Nf* est le même pour les deux critères. Pour cette éprouvette, on observe dès le début de l'essai de fatigue des écarts de déformation des extensomètres supérieurs à 20%. De plus la rupture physique de l'éprouvette intervient très tôt. Les Figures 4.33a et 4.33b présentent les nombres de cycles correspondant à une valeur maximale de l'angle de phase des éprouvettes des échantillons C2 et C3.

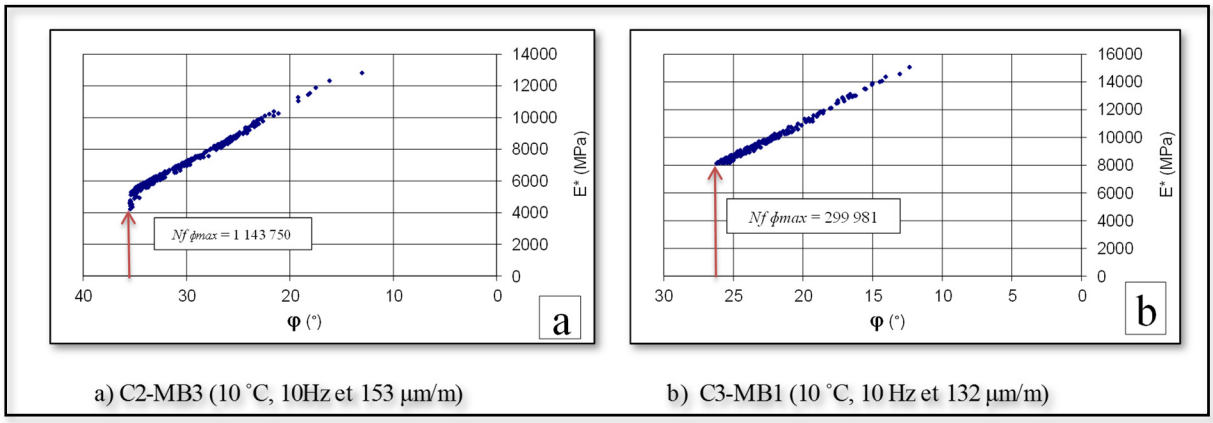


Figure 4.34 Détermination du nombre de cycles correspondant à la valeur maximale de l'angle de phase

Le nombre de cycles $Nf_{II/III}$ correspondant à la transition entre les phases II et III est la moyenne des sous-critères $Nf_{\Delta\varepsilon ext}$ et $Nf_{\varphi max}$. Dans le cas de cette étude, seul le sous-critère $Nf_{\varphi max}$ a été retenu pour identifier le nombre de cycles $Nf_{II/III}$. Car pour certains éprouvettes

testées, l'écarts de nombres entre les deux critères était trop important. Le Tableau 4-18 présente une synthèse des résultats de l'essai de fatigue pour chacune des quatre éprouvettes de chaque échantillon.

Tableau 4.18 Synthèse des essais de fatigue des échantillons C2 et C3

Éch.	Épr.	% vide	T °C	Déf. µdéf	Nombre de cycle par critère de fatigue				Nb. Cycle pt. inflexion	
					Nf_{50}	$Nf_{\phi max}$	$Nf_{\Delta ext}$	$Nf_{II/III}$	$Nf_{inf\|E^*\|}$	$Nf_{inf\Delta\varepsilon ext}$
E1 (C2)	MB1	1,9	10,6	117	1 810 200	2 516 438	2 506 423	2 506 423	2 511 432	2 155 808
	MB2	1,5	10,5	167	32 285	91 742	2 398	91 742	s.o	s.o
	MB3	2,2	10,7	153	219 628	1 143 750	1 068 631	1 143 750	1 018 553	968 477
	MB4	1,7	10,5	139	1 617 048	3 545 051	1 070 942	3 545 051	3 414 850	3 414 850
E2 (C3)	MB1	1,9	10,5	132	302 490	299 981	269	299 981	s.o	s.o
	MB2	1,7	10,2	114	96 823	89 767	114	89 767	s.o	93 801
	MB3	1,8	10,2	122	75 549	75 549	75 549	75 549	s.o	72 526
	MB4	1,4	10,3	94	1 474 511	1 474 511	452 736	1 474 511	1 409 403	903 523

4.10.10.3 Droite de fatigue selon la loi de Wöhler

La droite de fatigue permet de caractériser la durée de vie en fatigue du matériau testé. Elle est établie suite à la réalisation de plusieurs essais de fatigues avec différents niveaux de déformations sur différentes éprouvettes et est la régression linéaire des points obtenus des résultats des éprouvettes testées. Quatre éprouvettes ont été retenues par mélange dans le cadre de ce projet. L'équation 4.1 permet d'exprimer la loi de fatigue.

$$N_f = c_{1,\theta ref}\, \varepsilon_0^{-c_2} \tag{4.1}$$

Où

N_f Représente le nombre de cycles à la rupture ;

ε_0 Représente l'amplitude de la déformation cyclique imposée à une température et à une fréquence donnée ;

$c_{1\Theta ref}$ Désigne le coefficient correspondant à la durée de vie du matériau pour une amplitude de déformation imposée de 1 m/m, à une température et une fréquence données ;

c_2 Désigne le coefficient lié à la pente de la droite de fatigue pour un matériau donné (sans unité).

Le Tableau 4.19 présente les différentes caractéristiques des droites de fatigue et la Figure 4.35 illustre les courbes de fatigue des deux échantillons C2 et C3.

Tableau 4.19 Paramètres des droites de fatigue des mélanges C2 et C3

Éch.	**Nombre d'épr.**	**Critère de rupture**	**c_1**	**c_2**	**Pente b**	**ε_6 (µm/m)**	**R^2**	**b (%)**
C2	4	$Nf_{50\%}$	6,27E-39	11,4	-0,088	134	0,80	4,1
		$Nf_{II/III}$	2,77E-28	8,7	-0,115	143	0,64	
C3	4	$Nf_{50\%}$	3,38E-20	6,4	-0,158	100	0,46	3,8
		$Nf_{II/III}$	1,81E-20	6,4	-0,157	100	0,46	

Le coefficient R^2 varie entre 0 et 1 et permet de juger de la qualité de la régression linéaire. Il est faible pour l'échantillon C3 donc la régression linéaire pour ce mélange est de moins bonne qualité que celle de l'échantillon C2.

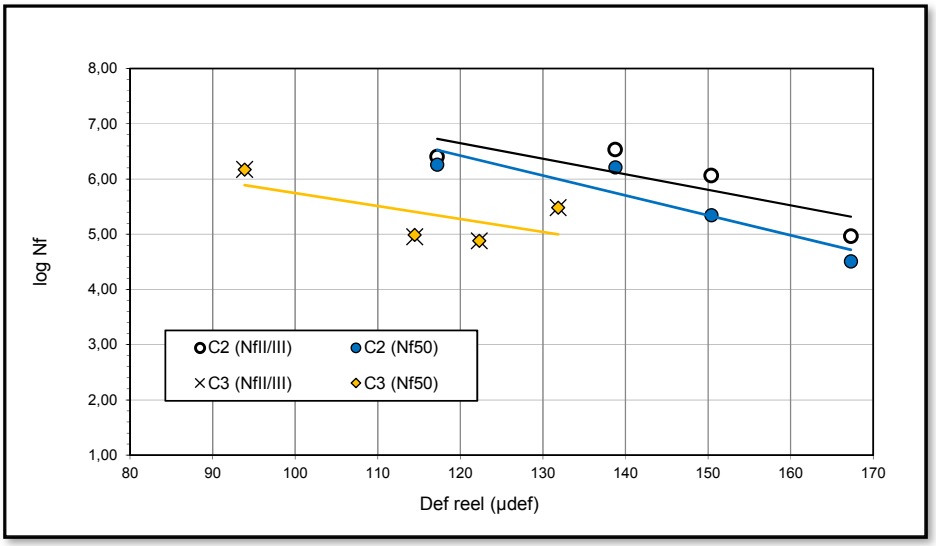


Figure 4.35 Droites de fatigue selon les critères $Nf_{50\%}$ et $Nf_{II/III}$ des éprouvettes C2-MB3 et C3-MB1

Les valeurs de ε_6 selon les $Nf_{50\%}$ et $Nf_{II/III}$ sont pour l'échantillon C3 sont de 105 µm/m. Il n'y a pas d'écart entre les résultats de ces deux critères de rupture pour cet échantillon. Selon Baaj (2002), l'utilisation du critère $Nf_{50\%}$ peut conduire à sous-estimer ou à surestimer la durée de vie en fatigue. Ce qui n'est pas le cas pour cet échantillon. Il faut noter que les différentes éprouvettes testées pour cet échantillon ont toutes rupturé en cours d'essai. D'autre part, l'évolution du centre de déformation de trois (3) des quatre (4) éprouvettes de cet échantillon, testées avec une amplitude de déformation supérieure à 100 µm/m reste différent de zéro. Ces éprouvettes n'auraient pas dû être considérées dans l'analyse. Mais puisque nous ne disposons plus d'éprouvettes pour réaliser d'autres essais, ces éprouvettes ont servi à établir la loi de fatigue de l'échantillon C3. De fait, la valeur de ε_6 retenue pour cet échantillon est de 100 µm/m.

Pour l'échantillon C2, ε_6 est égal à 134 et 143 µm/m selon respectivement les critères $Nf_{50\%}$ et $Nf_{II/III}$. Dans ce cas, on observe un écart entre les résultats des deux critères et la durée de vie est sous-estimée selon le critère $Nf_{50\%}$. En mode déformation, le critère $Nf_{50\%}$ est aléatoire (Lamothe, 2014) donc les durées de vie retenues pour cet échantillon est celle du critère $Nf_{II/III}$.

4.11 Essai de durabilité (Tenue à l'eau)

L'essai de tenue à l'eau a été réalisé pour chacun des deux échantillons selon la méthode d'essai AASHTO T283 – 03. Six éprouvettes ont été confectionnées et testées en deux lots de trois éprouvettes par lot pour l'échantillon C2. Seulement cinq éprouvettes ont pu être confectionnées pour l'échantillon C3. Elles ont été séparées en deux lots dont le premier comporte trois éprouvettes et deux éprouvettes pour le second lot. Le premier lot de trois éprouvettes a été testé après avoir subi le vieillissement accéléré par cycle gel – dégel en condition partiellement saturée. Les Tableaux 4-20 et 4-21 présentent les résultats des essais de tenue à l'eau des deux mélanges testés. On retrouve dans ces tableaux, les caractéristiques des éprouvettes, les valeurs de stabilité TSR, les écarts types et les écarts entre les valeurs de stabilités TSR maximale et minimale de chaque lot d'échantillon testé.

Tableau 4.20 Résultats de l'essai de tenue à l'eau de l'échantillon C2 (%b = 4,1)

Éprouvette	Diamètre	Hauteur	Pmax(N)	σt(KPa)	État	TSR(%)	Écart type	Écart
C2-MB1	99,87	49,53	11543	1485	Humide [1]	80	157,0	312,5
C2-MB2	99,84	49,52	10120	1303				
C2-MB3	99,89	49,69	9146	1173				
Moyenne =				1320				
C2-MB4	99,95	49,88	13867	1771	Sec		115,2	225,1
C2-MB5	99,84	49,52	12005	1546				
C2-MB6	99,90	49,64	12585	1616				
Moyenne =				1644				

[1] Suivant un cycle gel – dégel de 48 heures

Tableau 4.21 Résultats de l'essai de tenue à l'eau de l'échantillon C3 (% b = 3,8)

Éprouvette	Diamètre	Hauteur	Pmax(N)	σt(KPa)	État	TSR (%)	Écart type	Écart
C3-MB1	99,89	49,65	11082	1423	Humide [1]	92	119,7	211,2
C3-MB2	99,93	49,71	9516	1220				
C3-MB3	99,88	49,62	11139	1431				
Moyenne =				1358				
C3-MB4	99,92	49,72	11196	1435	Sec		64,5	91,2
C3-MB5	99,93	49,76	11919	1526				
Moyenne =				1480				

[1] Suivant un cycle gel – dégel de 48 heures

D'après les résultats de ces deux tableaux, les échantillons du camion C3 ont une meilleure stabilité à l'eau que les échantillons C2. Ces résultats pourraient être liés à la teneur en filler plus élevée que la cible pour les échantillons C2. Pour un mélange EBHP-20 sans verre incorporé testé à la tenue à l'eau par Diakité (2014), la stabilité conservée étais de 90%. L'échantillon C2 est moins performant à la tenue à l'eau.

Lorsque l'essai de tenue à l'eau est réalisé selon la norme LC 26 – 001, les exigences de la norme LC 4202 sont de 70% de tenue à l'eau pour les différents types d'enrobé du MTMDET. Les deux échantillons testés selon la norme AASHTO T283 – 03 respectent les exigences de la norme LC 4202. On constate toutefois que la stabilité de l'échantillon C3 est plus importante que celle de l'échantillon C2. L'écart relatif de la tenue à l'eau entre les deux échantillons est de 12,4%.

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION DE L'EBHP 14 – VERRE

Ce chapitre présente l'analyse globale des différents essais réalisés dans le cadre de cette caractérisation ainsi que l'analyse de l'impact de l'incorporation du verre recyclé sur les performances de l'EBHP14.

Les paramètres de formulation teneur en bitume, pourcentage de filler (passant tamis 80 µm), type de bitume et pourcentage de vides des éprouvettes ont été retenus pour analyser les résultats des essais d'aptitude au compactage à la PCG, des essais d'orniérage et les modules de rigidité des différents mélanges bitumineux testés dans le cadre de ce projet. L'analyse est menée de façon à ressortir l'influence de ces paramètres de formulation sur les performances des mélanges bitumineux EBHP 14. Pour le mélange produit en usine, l'accent est mis principalement sur la teneur en bitume, le taux de filler (micronisé) et les vides des éprouvettes afin de déduire l'influence du verre recyclé sur les performances de l'EBHP 14.

5.1 Analyse des résultats

Le tableau 5.1 présente les résultats des différents essais réalisés sur l'enrobé avec verre et l'enrobé sans verre dans le cadre de cette étude et une fiche technique de produit de chacun des deux échantillons prélevés sur le chantier des camions C2 et C3 est présenté à l'annexe I. On retrouve dans ce tableau les résultats des essais de d_{mm}, de %b, d'AG, de PCG, d'orniérage, de module complexe, de fatigue et de tenue à l'eau. Deux paramètres (%b et % passant tamis 80 µm) sont principalement retenus dans l'analyse des résultats des essais PCG, orniérage et module E* et sont représentés à l'aide d'histogramme. Les paramètres types de bitume et teneur en vides des éprouvettes sont aussi pris en compte dans les analyses, mais sans représentation. Les résultats des essais de la référence – Lab du EBHP 14 – Verre du Tableau 5-1 ont été tirés du rapport de stage de M. Fouad Maliki (2015). La référence – Lab EBHP 14 a été fabriqué en laboratoire au cours de ce projet.

Tableau 5.1 Sommaires des résultats des essais des enrobés EBHP 14

Paramètres		EBHP 14	EBPH14-Verre										
		Réf - Lab CT Kakpo	**Réf. Lab JM Caron**	**Réf - Lab stage1 2015**		**Réf - Lab stage2 2015**		**Réf - Lab stage3 2015**		**Camion 2**		**Camion 3**	
Grade de bitume		PG 76 – 28 (THRD) (1)	PG 76 - 28	PG 76 – 34						PG 76 – 28 (THRD) (1)			
% de bitume		4,2	3,7	4,0		4,2		4,4		4,1		3,8	
10-14	%	71,9	72,5	72,0		71,9		71,7		62,3		61,6	
	Source	St-Philippe	St-Philippe	LG						St-Philippe			
Sable C (%)		15,3	15,1 (3)	14,9 (2)		14,9 (2)		14,8 (2)		21,7		26,6	
Micronisé (%)		8,6	8,7	9,1		9,1		9,0		11,9		8,0	
d_{mm}		2,565	2,514	2,527		2,518		2,509		2,507		2,525	
PCG (%Vi) ø 150mm	Hauteur briquette (mm)	150	115	115	170	115	170	115	170	115	150	115	150
	Ng = 10	14,2	14,8	14,0	16,9	12,6	16,4	12,1	16,9	6,3	17,7	9,7	18,8
	Ng = 80	---	6,2	4,8	7,9	3,3	6,6	2,6	7,0	---	---	4,4	4,2
	Ng = 100	---	3,1	3,9	7,1	2,6	5,9	1,9	---	---	---	4,0	---
	Ng = 200	---	1,6	1,9	6,0	1,4		1,2	---	---	---	3,3	---
Ng à Vi= 4%		74	---	95		---		---		20		85	
Nombre de cycles		**Profondeur d'ornière (%)**											
3 000		---	2,1	3,4		2,6		---		6,8	9,4	2,0	2,6
10 000		---	2,5	3,8		---		---		8,9	14,0	2,4	3,4
30 000		---	2,9	4,2		4,0		---		11,4	18,2	2,8	3,8
60 000		---	---	---		4,3		---		13,4	---	3,4	---
100 000		---	3,1	---		4,3		---		14,9	---	3,7	---
Traction – compression		**Module complexe (|E*| (MPa))**											
15° C – 10 Hz		10 605	10 946	10 957		9 050		---		11 568		11 634	
10 ˚ C – 10 Hz		14 110	14 980	14 705		12 803		---		14 109		14 843	
10 ˚ C – 1 Hz		9 639	---	10 024		8 288		---		9 437		9 885	
Traction indirecte		**Module de rigidité (MPa)**											
10 ˚ C – 10 Hz		---	---	---		---		---		10 715		8 513	
10 ˚ C – 1 Hz		---	---	---		---		---		6 696		5 415	
		Fatigue (10° C – 10 Hz)											
ε_6 (µm/m)		---	---	---		---		---		100		143	
		Tenue à l'eau											
TSR (%)		---	---	---		---		---		80		92	

(1) Très haute résistance au désenrobage (THRD)

(2) Sable C : 32% de 16/30 avec 68% de 30/90

(3) Sable C : 34% de 16/30 avec 66% de 30/90

Les Figures 5.1-a, 5.1-b et 5.1-c présentent les résultats des essais PCG, orniérage et module E* en fonction de la teneur en bitume de quatre différents mélanges bitumineux dont les deux camions de la production, une référence avec verre fabriqué en laboratoire et une référence sans verre également fabriqué en laboratoire.

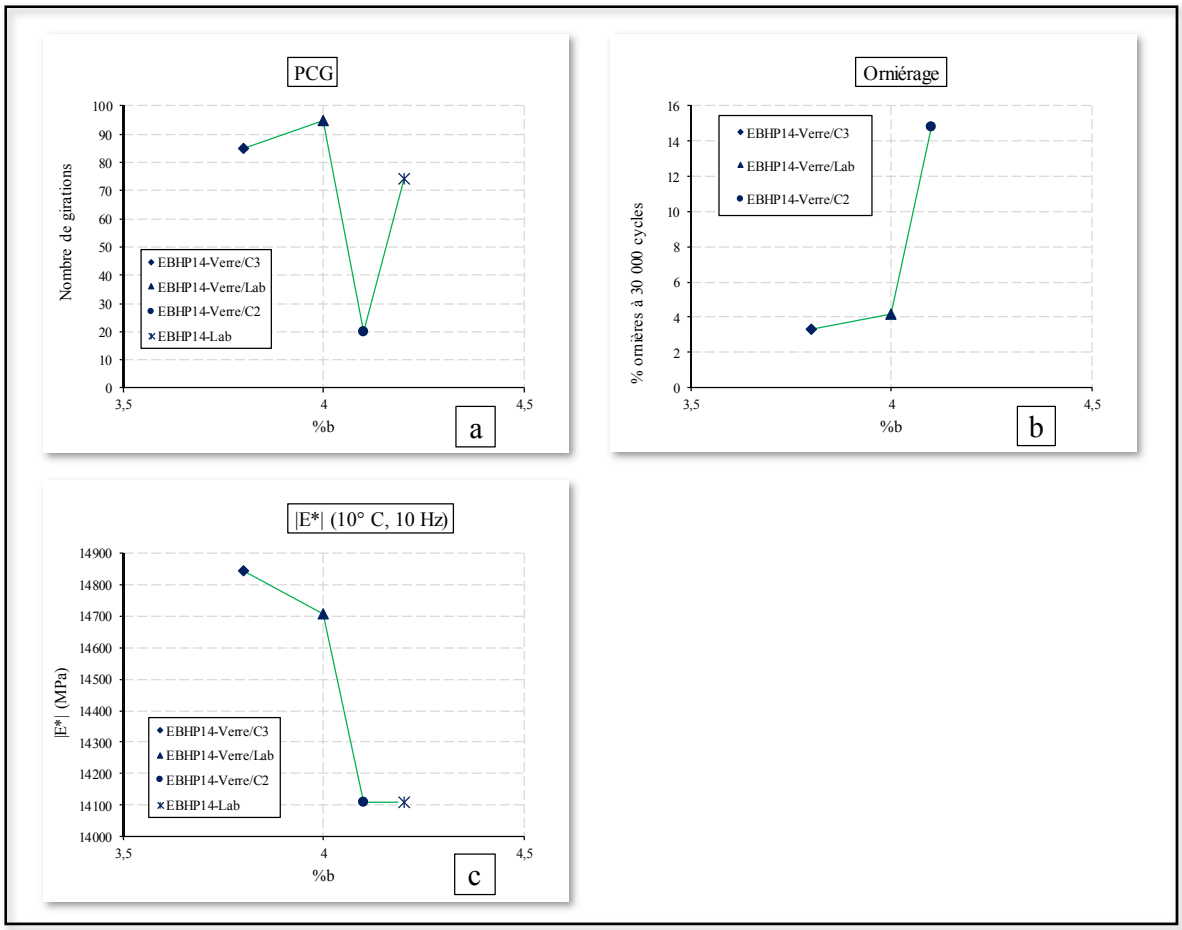


Figure 3.1 Résultats des essais PCG, orniérage et module E*
en fonction du %b

Les Figures 5.2-a, 5.2-b et 5.2-c présentent les résultats des essais PCG, orniérage et module E* en fonction du pourcentage passant au tamis 80 µm des mêmes mélanges bitumineux.

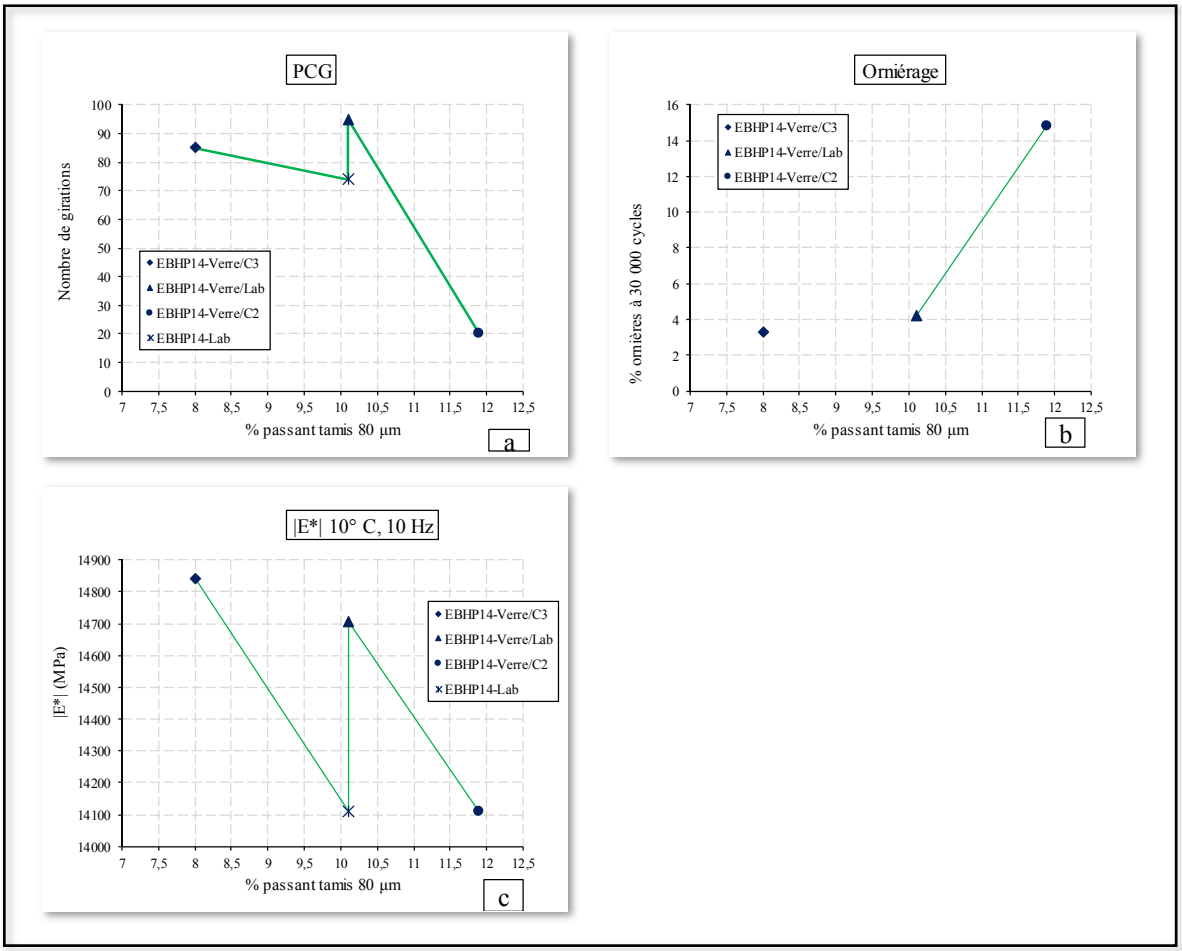


Figure 3.2 Résultats des essais PCG, orniérage et module E*
en fonction du % passant tamis 80 µm

Pour les enrobés avec verre, on a les teneurs en bitume suivantes : 4,1 et 3,8 % pour l'EBHP14-Verre des camions C2 et C3. Une teneur en bitume de 4,0 % pour la référence – Lab (Stage1 2015) (voir Tableau 5.1).

L'échantillon C2 a une teneur de 4,1 et contient plus de filler (passant tamis 80 µm égal à 11,9%). Cet échantillon est beaucoup plus maniable que l'échantillon C3 et la référence – Lab (Stage1 2015). L'écart de giration à la PCG pour une teneur en vides de 4% est de 65 girations entre les échantillons C2 et C3. Entre la référence – Lab (Stage1 2015) et l'échantillon C2, pour la même teneur en vides de 4 % à la PCG, l'écart est de 75 girations.

Ces valeurs sont trop importantes à notre avis et se traduisent par une instabilité de l'échantillon C2 à l'essai d'orniérage.

L'échantillon C3 a la teneur en bitume est de 3,8 %, son passant au tamis 80 µm, de 8,0% inférieur à 10,1 % ciblé sur ce tamis. On constate que l'échantillon C3 n'a seulement que 10 girations de moins que la référence – Lab (Stage1 2015) et ces performances à l'orniérage sont meilleures que celles de l'échantillon C2. À partir des Figures 5.1 et 5.2, on peut déduire que l'aptitude au compactage de l'EBHP14 – Verre est influencé par la teneur en bitume, le pourcentage de filler et aussi par le type de bitume utilisé (Tableau 5.1). Pour ce type d'enrobé, l'échantillon C3 avec un pourcentage en bitume de 3,8% inférieur à la teneur 4% de celui du mélange de référence – Lab (Stage1 2015) a une meilleure ouvrabilité.

Également, on remarque à partir du Tableau 5-1 et des Figures 5.1 et 5.2 que les performances thermomécaniques et de durabilité de l'échantillon C3 sont supérieures aux performances de l'échantillon C2 dans la plupart des cas, excepté pour la fatigue. Bien que les granulométries des deux échantillons ne respectent pas la formule, les performances obtenues en laboratoire à partir des échantillons de la production sont du point de vue des modules complexe et orniérage supérieures aux performances obtenues en laboratoire avec la référence – Lab (Stage1 2015) pour l'échantillon C3. Par contre, C2 ornière beaucoup plus et même au-delà des 10 % toléré par le MTMDET.

Le module complexe de l'EBHP14 – Verre n'est pas influencé par le type de bitume. On observe en moyenne, pour une température de 10 ˚ C et une fréquence de 10 Hz, un écart moyen de 229 MPa entre la production et la référence – Lab (Stage1 2015). La même formule d'EBHP14 – Verre, testée par Caron (2015) avec un type de bitume (PG 76 – 28) plus proche du type de bitume de la production donnait pour la même température et fréquence un module de 14 980 MPa. Cette valeur est légèrement supérieure aux valeurs obtenues pour la production et la référence – Lab (Stage1 2015). Toutefois, la formule testée par Caron (2015) à une teneur en bitume 3,7%.

L'une des observations, et pas la moindre du Tableau 5.1, concerne la rigidité in situ de cet enrobé. Les carottes prélevées in situ ont en moyenne (sans prise en compte du camion 1) un module de 9 614 MPa (10 ˚C et 10 Hz). Il est difficile de faire une comparaison directe entre les modules de rigidité du mélange in situ et les résultats de laboratoire, car les essais de laboratoire et de chantier son bien différent. Mais pour un même matériau, on s'attendait à obtenir des valeurs de module assez proche. On peut toutefois expliquer ces résultats par deux paramètres très importants. Dans un premier temps, les teneurs en vides des éprouvettes fabriquées en laboratoire étaient inférieures aux teneurs en vides des carottes prélevées in situ. L'écart moyen de teneur en vides entre les éprouvettes fabriquées en laboratoire et celles prélevées sur chantier est de 2,5%. Selon Di Benedetto et Corté (2005), la diminution de la teneur en vides dans l'enrobés entraine une augmentation de sa rigidité et une diminution de sa susceptibilité à la température.

Dans un second temps, les difficultés rencontrées lors de la mise en place du mélange en sont pour beaucoup dans les performances in situ de cet enrobé. De plus, on constate que les carottes prélevées dans la chaussée n'ont pas des épaisseurs identiques. L'épaisseur des carottes est d'environ 100mm, 74mm et 68mm respectivement pour les camions 1, 2 et 3. Cela explique les écarts de vides obtenus en laboratoire pour les éprouvettes in situ, de même que les écarts de module de ces éprouvettes. Cette dernière pourrait même expliquer en partie la faible rigidité obtenue avec l'essai au FWD.

5.2 Influence du verre recyclé sur les performances de l'EBHP 14

Le Tableau 5-2 extrait du Tableau 5.1 présente la synthèse des résultats des essais réalisés sur l'EBHP 14 – Lab et quelques résultats des essais des échantillons C2 et C3 des camions 2 et 3. Afin de comparer les mélanges prélevés in situ avec un mélange sans verre recyclé, le mélange EBHP 14 – Lab a été fabriqué au LCMB avec les granulats et le bitume ayant servis pour la production du mélange EBHP14 – verre mis en œuvre lors de la réalisation de la planche d'essai SAQ. Le squelette granulaire a été constitué à partir des masses retenues sur chaque tamis et non par classe granulaire. Ainsi, la granulométrie du mélange respecte de

façon stricte la formule théorique. Au total, 15 kg du mélange bitumineux ont été produits pour permettre la réalisation des essais %b, d_{mm}, PCG, |E*| et fatigue. Le détail des résultats des essais de module complexe et da fatigue sont présentés en annexe VIII.

Tableau 3.1 Synthèse des résultats de l'EBHP 14

Paramètres		**EBHP 14 – Lab**	**EBHP 14 – Verre**	
			C2	**C3**
Type de bitume		PG 76 -28 THRD		
% Bitume		4,2	4,1	3,8
d_{mm}		2,565	2,507	2,525
Ng : PCG (%Vi =4)		74	20	85
% Passant 80µm		10,1	11,9	8,0
|E*| (10 ˚C et 10 Hz)		14 110 MPa	14 109 MPa	14 843 MPa
Résistance à l'orniérage à 30 000 cycles (%)		n.a.	14,8	3,3
Fatigue (cycles)	100 µm/m (ε_6)	s.o	s.o	1 000 000
	143 µm/m (ε_6)	s.o	1 000 000	s.o
	143 µm/m	4 724 417 (1)	s.o	s.o

(1) une seule éprouvette

L'EBHP 14 produit en laboratoire dans le cadre de ce projet et l'échantillon C2 ont des teneurs en bitume assez proches. Le pourcentage de bitume de l'échantillon C2 est légèrement inférieur à celui de l'EBHP 14-Labo. Cependant, on obtient des valeurs de module à 10 ˚C et 10 Hz égales pour ces deux mélanges. On peut à priori déduire que l'incorporation du verre recyclé n'a pas d'influence sur la valeur du module complexe de l'EBHP 14. Toutefois, l'EBHP14 – Labo et l'échantillon C2 prélevé du camion 2 n'ont pas la

même granulométrie. Le pourcentage de passant le tamis 80µm est supérieur pour l'échantillon C2.

L'EBHP 14 – Lab n'a pas été testé à l'orniéreur, mais on peut à partir des résultats de la PCG supposer pour ce mélange des performances à l'orniérage assez similaire à celles de l'échantillon C3. Toutefois, la PCG ne permet que d'avoir une idée du comportement de l'enrobé à l'orniérage et ne peut en aucun cas remplacer cet essai. L'écart au niveau du nombre de girations requis pour atteindre une teneur en vides de 4% entre de l'EBHP 14 – Lab (74 girations) et l'échantillon C3 (85 girations) est de 11 girations. Cet écart entre l'EBHP 14 – Lab (74 girations) et l'échantillon C2 (20 girations) est de 54 girations. On peut en deduire que le verre améliore l'aptitude au compactage de l'EBHP 14.

Pour l'essai d'orniérage, parce qu'une teneur en bitume légèrement supérieure de l'enrobé influencerait très peu les performances de l'EBHP 14 à l'orniérage. On en déduit qu'un pourcentage de filler de verre supérieur à la cible a influencé la performance à l'orniérage de l'EBHP 14. Par contre, lorsque la teneur en filler de verre est inférieure à la cible les performances à l'orniérage sont encore meilleures.

Les performances mécaniques des EBHP 14 sont en majorité assurées par la fraction grossière du squelette granulaire et par le type de bitume utilisé dans le mélange. La fraction intermédiaire dans ce type d'enrobé sert à combler les vides laissés entre les gros granulats. Le filler combiné au bitume donne le mastic qui assure la cohésion entre les granulats et rigidifie le mélange bitumineux. Pour l'EBHP 14, selon Caron (2015), l'utilisation de filler de verre permet d'obtenir un module plus élevé. Cette observation est valable pour l'échantillon C3, mais ne l'est pas pour l'échantillon C2. Toutefois, C3 a une teneur en bitume inférieure à celle de l'EBHP 14 – Lab. Donc la réduction du pourcentage de bitume permet d'augmenter le module de l'EBHP 14 – Verre.

Une seule éprouvette a été testée en fatigue à une déformation imposée de 143 µm/m pour l'EBPH 14 – Lab. Ce qui n'est pas suffisant pour établir la loi de fatigue de ce mélange. Mais l'essai a été réalisé à une déformation égale à la valeur du ε_6 de l'échantillon C2.

Le verre recyclé améliore considérablement l'ouvrabilité de l'EBHP 14. À un tel point que le mélange bitumineux devient instable à l'orniérage lorsque le taux de filler est en excès. Les essais d'orniérage réalisés sur les échantillons C2 et C3 présentés au Tableau 5-1 permettent de soutenir cette affirmation. De plus, les essais de PCG présentés au Tableau 5.2 montrent également une instabilité de l'échantillon C2 par rapport à l'EBHP 14 – Lab. Une diminution de 6,8% du pourcentage de bitume permet d'obtenir une très bonne ouvrabilité de l'enrobé avec verre, une augmentation de la norme du module complexe et meilleure résistance à l'orniérage. Toutefois, la réduction de la teneur en bitume entraine une diminution des performances en fatigue de l'EBHP14 – Verre, mais améliore sa tenue à l'eau. En somme, l'incorporation du verre recyclé dans l'EBHP 14 améliore dans la globalité les performances du mélange bitumineux. De plus, le verre dans l'EBHP 14 en plus de son aspect environnemental pourrait se révéler être une solution économique.

CONCLUSION

Les objectifs de cette recherche sont de vérifier au premier abord l'homogénéité et la qualité de l'EBHP-14 incorporant du verre recyclé produit pour réaliser la planche d'essai de l'entrepôt de la SAQ. Par la suite, il s'agissait de déterminer les performances en laboratoire et in situ de cette production. Enfin, le principal but de ce travail est de déduire de l'étude de cette production la faisabilité de produire en centrale d'enrobage de l'enrobé bitumineux incorporant du verre recyclé. Ainsi, ce travail a été conduit sur la base d'un programme expérimental qui a permis la caractérisation du mélange mise en œuvre pour la réalisation de la planche d'essai SAQ.

Les essais de teneur en bitume, aptitude au compactage à la PCG, densité maximale et analyse granulométrique des échantillons ont servis de critères pour apprécier l'homogénéité de la production. Quant aux performances de cette production, des essais thermomécaniques et de durabilité ont été réalisés sur des éprouvettes fabriquées en laboratoire et sur des éprouvettes prélevées directement dans la chaussée. Les échantillons utilisés en laboratoire pour confectionner les différentes éprouvettes d'essai provenaient des deux camions échantillonnés sur les trois produits.

En somme, l'analyse des échantillons prélevés lors de la réalisation de la chaussée du quai de débarquement de la SAQ révèle que la production ne s'est pas avéré être homogène. Deux, voire trois différents mélanges ont été produits pour réaliser cette planche d'essai. La formule ciblée n'a pas été respectée lors de la production de cet enrobé. Des écarts ont été observés au niveau de la granulométrie et de la teneur en bitume entre la formule et la production, mais aussi entre les deux camions échantillonnés. Le camion 2 a une teneur en bitume de 4,1% qui est supérieure à celle du camion 3 qui est de 3,8%. De plus, le camion 2 contient plus de fines que le camion 3 (11,9% passant au tamis 80µm pour C2 contre 8,0% pour C3). D'où une trop grande maniabilité et instabilité pour le mélange du camion 2.

À l'orniéreur, comme on s'y attendait, le mélange C2 (camion2) est instable avec un pourcentage d'ornière à 30 000 cycles supérieur au 10% toléré par le MTMDET pour ce type d'enrobé. Les performances à l'orniérage du mélange C3 (camion3) sont très bonnes, inférieur à 4% à 30 000 cycles. Les deux mélanges ont en laboratoire des modules complexes à 10 ˚C et 10 Hz très élevés dont les valeurs sont supérieures au 14 000 MPa. Les rigidités obtenues in situ pour la production restent inférieures aux modules obtenus en laboratoire pour les mêmes mélanges. Finalement, les performances obtenues en laboratoire sur les éprouvettes prélevées in situ sont également inférieures à celle de la référence (Réf-lab Stage1 2015) avec un écart de 5 091 MPa en moyenne. Par contre, les échantillons provenant de la production ont malgré les difficultés de production de ce mélange des performances égales aux performances obtenues pour l'EBHP 14 – verre lors de sa formulation. En fatigue, le mélange C2 a les meilleures performances avec un ε_6 égale 143 µm/m. Le ε_6 du mélange C3 est égal 100 µm/m. Pour la tenue à l'eau, la stabilité conservée est de 80% pour le mélange C2 et 92% pour C3. En général, les meilleures performances dans ce programme expérimental ont été obtenues pour le mélange C3 du camion 3.

En ce qui concerne les possibilités de produire des enrobés incorporant du verre recyclé en centrale, cette expérience a montré qu'il sera nécessaire de faire des ajustements au niveau des centrales d'enrobage en prenant en compte les caractéristiques intrinsèques et de fabrication des particules de verre recyclé afin de faciliter son incorporation dans les enrobés et ainsi assurer une production de qualité de même que la sécurité des ouvriers.

RECOMMANDATIONS

À la lumière de cette étude, le constat est que l'incorporation du verre postconsommation dans l'enrobé en centrale d'enrobage se révèle être plus fastidieux que prévu. Les caractéristiques du verre recyclé sous la forme micronisé ne permettent pas une incorporation dans l'enrobé sans un préalable adaptation des centrales d'enrobage. Surtout, il faut trouver une solution pour faciliter l'écoulement du micronisé dans les silos à fines et surtout assurer le chauffage des particules de verre avant leur mélange aux granulats calcaire. Il serait alors judicieux que des études aillent dans ce sens afin de faciliter l'incorporation du verre recyclé dans l'enrobé en centrale et ainsi permettre une production des enrobés – verre de qualité. Mais dans l'immédiat, en se basant sur les travaux de Caron (2015), il serait très approprié de simplement remplacer le filler de verre recyclé (micronisé) par du filler calcaire. L'enrobé perdrait certes en rigidité et la quantité de verre à incorporer chuterait aussi. Mais, un gain important sera réalisé au niveau de la performance en fatigue de l'enrobé. De plus, le filler de verre étant le plus difficile à incorporer, on pourrait s'attendre à une amélioration de la qualité de la production.

Quant à la teneur en bitume à utiliser pour ce mélange bitumineux, après l'analyse des deux mélanges de la production, il serait préférable de conserver la teneur en bitume du mélange C3 du camion 3. Ce mélange donne les meilleures performances. Mais pour améliorer la performance en fatigue dans ce cas sans pour autant entrainer une instabilité du mélange, nous recommandons que la teneur en bitume à utiliser pour la production soit de 3,9 à 4,0%.

ANNEXE I

FICHES TECHNIQUES DE PRODUIT DES MÉLANGES C2 ET C3

LCMB — LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

Fiche Technique de Produit – C3
FTP – EBHP-14 (PG76-28 THRD)
(LCMB)

No. : AQ-900
Date : 13/11/13
Page : 1 de 1
Appr. :

FORMULATION ENROBÉ EBHP-14 (PG76-28)

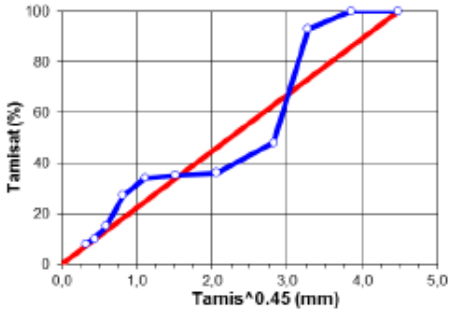
Bitume - PG	76-28 THRD
T_c (°C)	79,7
T_b (°C)	-33,7
$T_{malaxage}$ (°C)	190
$T_{compactage}$ (°C)	160
b (%)	3,83
V_{be} (%)	10,6
FBE (µm)	7,2
d_{sra}	2,525
d_{gb}	2,677

PCG

Giration		Vides (%)	SPEC (LC 26-004)
$N_{initial}$:	10	10,2	≥ 11%
N_{design} :	100	4,1	4 à 7%
N_{final} :	200	3,2	≥ 2%

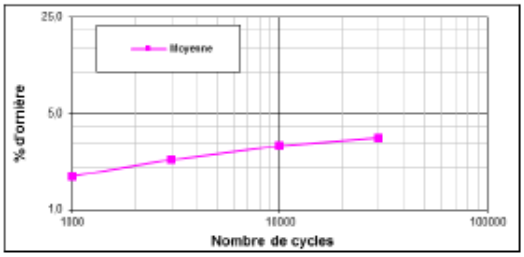
GRANULARITÉ : EBHP-14 (PG76-28 THRD) – C3

GNM - D^{max} (mm) : 20 GM (mm) : 28



RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE

Nom du produit : EBHP-14 (PG76-28 THRD) – C3



Constante ESSO	Valeur
A	
B	
C	
D	
F	

Loi ESSO
$\text{Log}\,\varepsilon = A + B \log \sigma_v + C\,\sigma_h + D(\theta - 30) + F \log(f/10)$
Où
A, B, C, D et F : Constantes de l'équation de l'essai
σ_v : Contrainte verticale de calcul
σ_h : Contrainte horizontale de calcul
θ : Température de calcul
f : fréquence de calcul
Note : les valeurs 30 et 10 sont les valeurs de référence dans la définition de la loi ESSO en laboratoire

RETRAITEMENT EMPÊCHÉ

Nom du produit : EBHP-14 (PG76-28 THRD) – C3

Éprouvette	σ_{max} (kPa)	T^{max} (°C)
R1-A		
R1-D		
R1-E		
Moyenne		

C:\Users\809528\Desktop\Rédaction\Mémoire 2\FTP - E1.docx

Figure-A I-1 Fiche technique de produit de C3 page 1

LCMB

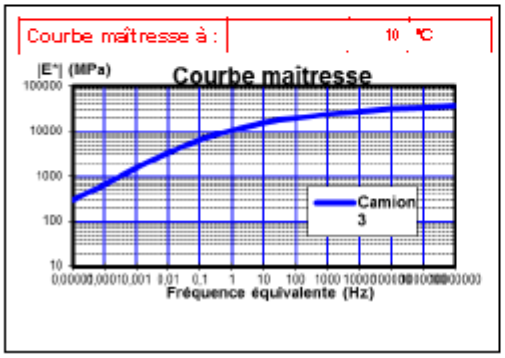
Fiche Technique de Produit – C3
FTP – EBHP-14 (PG76-28 THRD)
(LCMB)

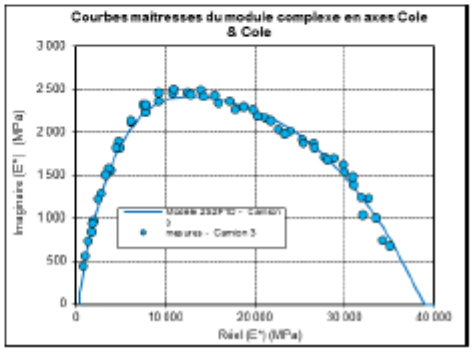
No. : AQ-900
Date : 13/11/13
Page : 1 de 1
Appr. :

MODULE COMPLEXE

Nom du produit : EBHP-14 (PG88-28) – C3 **Paramètres de 2S2P1D**

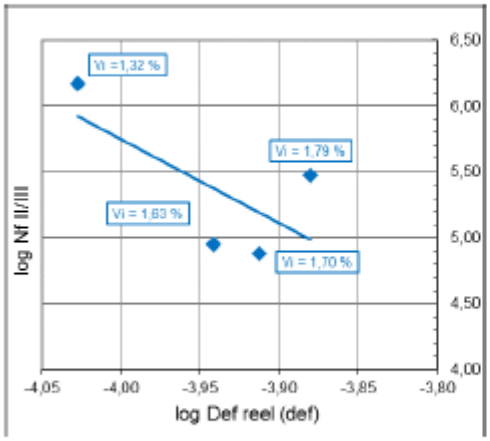
#	$E^* - E_\infty$ (MPa)	$E^* - E_0$ (MPa)	δ	k	h	β	C_1	C_2	τ (E, T_{Ref})	T_{ref}
C3	43000	250	2,180	0,150	0,460	750	33	241	0,19	10





RÉSISTANCE EN FATIGUE

Nom du produit : EBHP-14 (PG76-28 THRD) – C3



		Méthode d'analyse (T/C)		
		Classique	Phase II-III	DGCB
		$N_{Ref,A}$	$N_{Ref,II}$	$N_{Ref,C3}$
Écart type : SN	Mesuré	0,46	0,46	
	OPECC[1]	0,40		
Pente	k_1	6,35	6,37	
Effet de la T °C	k_T-mesuré	n.d.	n.d.	n.d.
	OPECC[1]	2,5		
Ordonnée à l'origine	$C_1^{\theta_{ref}}$	3,38E-20	1,81E-20	
T_{ref} (°C)	θ_{ref}	10		
f_{ref} (Hz)	fr	10		
ε_6 - µm/m		100	100	
b		-0,158	-0,157	

(1) : Valeur tirée de SETRA-LCPC : EME classe 1
(2) : suivant SETRA LCPC avec $\varepsilon_6(\theta) \cdot E(\theta)^m$ = cte , où m = 0,5 C'est-à dire $k_T = m k_1$

C:\Users\809528\Desktop\Rédaction\Mémoire 2\FTP - E2.docx

Figure-A I-2 Fiche technique de produit de C3 page 2

LCMB

Fiche Technique de Produit-C2
FTP – EBHP-14 (PG76-28 THRD)
(LCMB)

No. : AQ-900
Date : 13/11/13
Page : 1 de 1
Appr. :

FORMULATION ENROBÉ EBHP-14 (PG76-28)

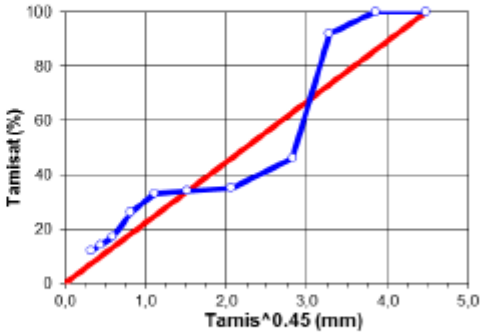
Bitume - PG	76-28 THRD
T_c (°C)	79,7
T_b (°C)	-33,7
$T_{melange}$ (°C)	190
$T_{compactage}$ (°C)	176
b (%)	4,11
V_{be} (%)	11,5
FBE (µm)	6,0
d_{vrm}	2,507
d_{gb}	2,677

PCG

Giration		Vides (%)	SPEC (LC 26-004)
$N_{initial}$:	10	7,0	≥ 11%
N_{design} :	100	---	4 à 7%
N_{final} :	200	---	≥ 2%

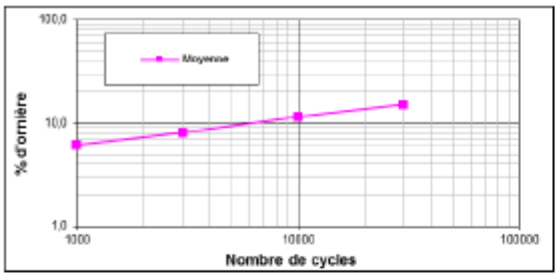
GRANULARITÉ : EBHP-14 (PG76-28 THRD) – C2

GNM - D^{ME} (mm) :	20	GM (mm) :	28



RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE

Nom du produit : EBHP-14 (PG76-28 THRD) – C2



Constante ESSO	Valeur
A	
B	
C	
D	
F	

La ESSO
$\log z = A + B \log \sigma_v + C\, \sigma_h + D(\theta + 30) + F \log(f/10)$
Où
A, B, C, D et F : Constantes de l'équation de l'enrobé
σ_v : Contrainte verticale de calcul
σ_h : Contrainte horizontale de calcul
θ : Température de calcul
f : fréquence de calcul
Note : les valeurs 30 et 10 sont les valeurs de référence dans la définition de la loi ESSO et laboratoire

RETRAITEMENT EMPÊCHÉ

Nom du produit : EBHP-14 (PG88-28) – C2

Éprouvette	σ_{max} (kPa)	T°_{max} (°C)
R1-A		
R1-D		
R1-E		
Moyenne		

C:\Users\809528\Desktop\Rédaction\Mémoire 2\FTP-E1.docx

Figure-A I-3 Fiche technique de produit de C2 page 1

LCMB

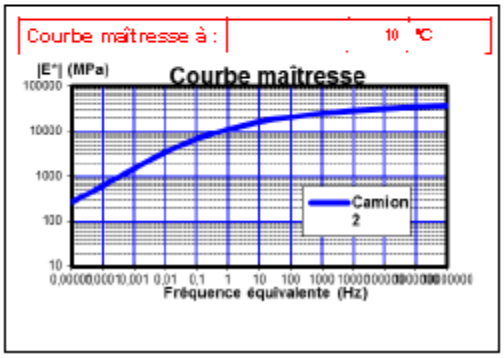
Fiche Technique de Produit-C2
FTP – EBHP-14 (PG76-28 THRD)
(LCMB)

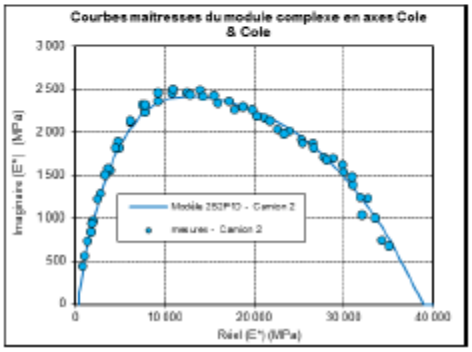
No. : AQ-900
Date : 13/11/13
Page : 1 de 1
Appr. :

MODULE COMPLEXE

Nom du produit : EBHP-14 (PG76-28 THRD) – C2 **Paramètres de 2S2P1D**

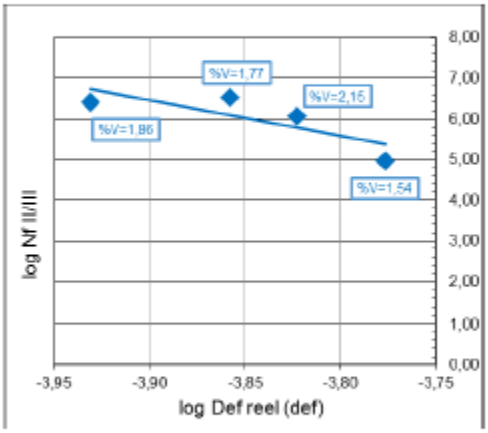
#	$E^* - E_\infty$ (kPa)	$E^* - E_0$ (kPa)	δ	k	h	β	C_1	C_2	τ (E^* T_{ref})	T_{ref}
C2 (EI)	42000	200	2,180	0,150	0,460	750	36	276	0,1	10





RÉSISTANCE EN FATIGUE

Nom du produit : EBHP-14 (PG76-28 THRD) – C2



		Méthode d'analyse (E/C)		
		Classique	Phase II-III	DGCB
		N_{200}	$N_{II/III}$	N_{DGCB}
Écart type : SN	Mesuré	0,80	0,64	
	OPECC[1]	0,40		
Pente	k_1	11,38	8,72	
Effet de la T °C	k_T-mesuré	n.d.	n.d.	n.d.
	OPECC[2]	2,5		
Ordonnée à l'origine	$C_1^{\theta_{ref}}$	6,27E-39	2,77E-28	
T_{ref} (°C)	θ_{ref}	10		
f_{ref} (Hz)	fr	10		
ε_6 - µm/m		134	143	
b		-0,088	-0,115	

[1] : Valeur tirée de SETRA-LCPC : EME classe 1

[2] : suivant SETRA LCPC avec $\varepsilon_6(\theta) \cdot E(\theta)^m$ = cte , où m = 0,5 C'est-à dire $k_1 = mk_2$

C:\Users\809528\Desktop\Rédaction\Mémoire 2\FTP - EI.docx

Figure-A I-4 Fiche technique de produit de C2 page 2

ANNEXE II

RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE DES MÉLANGES C2 ET C3

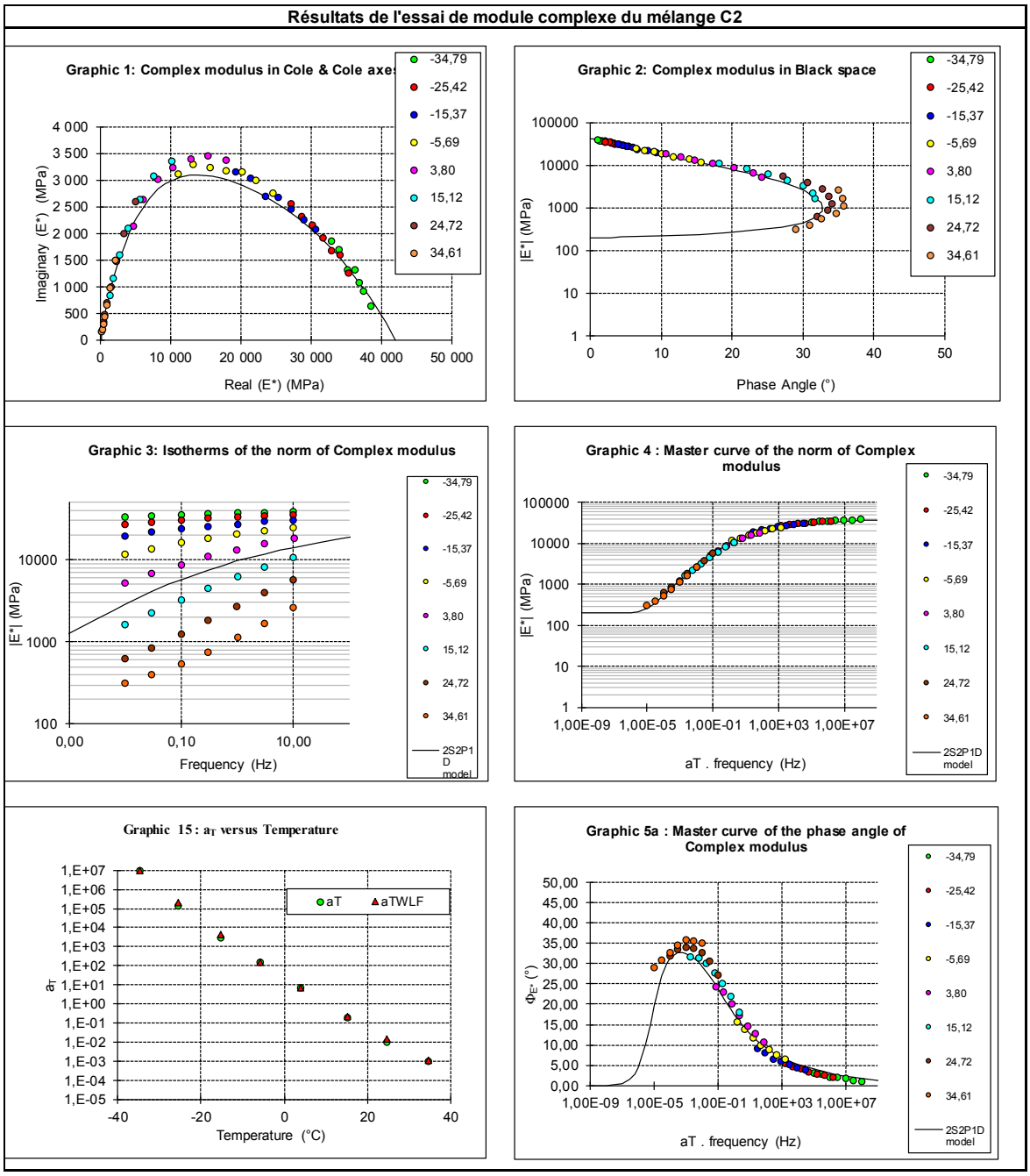


Figure-A II-1 Résultats de module complexe du mélange C2

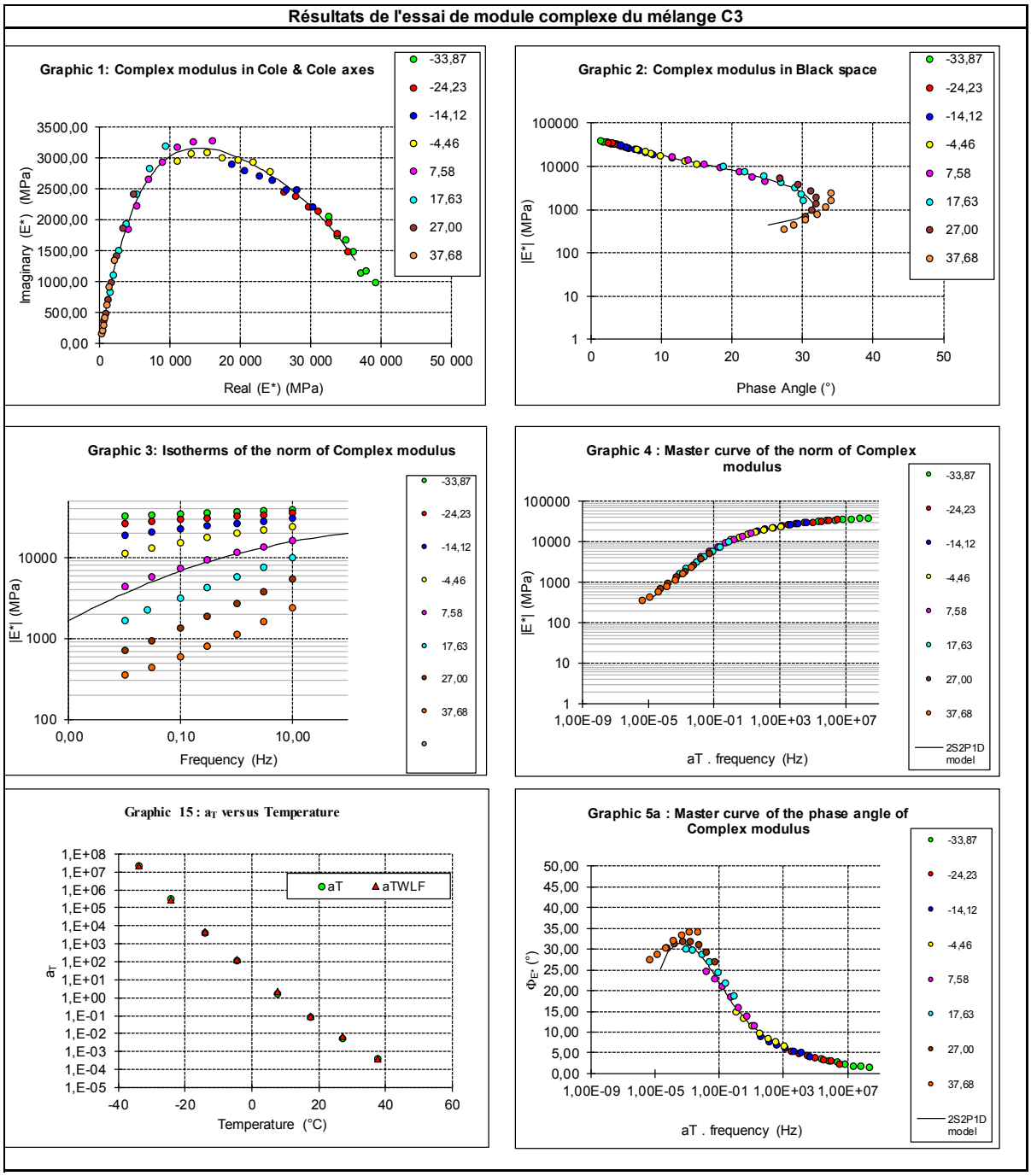


Figure-A II-2 Résultats de module complexe du mélange C3

ANNEXE III

RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE DE RIGIDITÉ OPTION 1

Tableau-A III-1 Module de rigidité du mélange C3 (-10 ˚C essai 1)

Date :	Type d'enrobé : EBHP14-Verre	# échantillon: Camion 3	Force de contact (N): 250
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28	Diamètre (mm) : 47,92	Force de cycle (N) : 8000
	% Vi :	Température (°C) : -10	# répétitions : 11

Plan de sollicitation : 90 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-7868	-7869	-7879	-7872	-7879	-7881	-7887	-7879	-7887	-7883	**-7878**	-7877
2- Période de répétition (sec)	3,09	2,88	2,95	3,07	3,04	3,07	3,05	3,06	2,96	3,06	**3,02**	3,00
3- temps de monté (mSec)	124,1	124,1	122,2	126,0	127,9	120,0	122,2	124,1	123,7	126,0	**124,0**	123,7
Déformation maximale (micron)	5,10	5,76	5,86	5,86	6,72	4,07	5,93	6,17	5,93	6,00	**5,69**	5,73
Ratio de monté	0,59	0,59	0,60	0,58	0,58	0,61	0,58	0,53	0,60	0,59	**0,59**	0,59
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	19951	17685	17394	17379	15164	25064	17209	16519	17209	17003	**18229**	17848
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	19862	17514	17368	17168	14912	25254	16900	15680	17218	16918	**18124**	17713

Tableau-A III-2 Module de rigidité du mélange C3 (-10 ˚C essai 2)

Date :	Type d'enrobé : EBHP10-Verre	# échantillon: Camion 3	Force de contact (N): 250
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28	Diamètre (mm) : 47,92	Force de cycle (N) : 8000
	% Vi :	Température (°C) : -10	# répétitions : 11

Plan de sollicitation : 0 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-7863	-7883	-7887	-7893	-7883	-7886	-7887	-7887	-7888	-7895	**-7885**	-7883
2- Période de répétition (sec)	2,93	3,04	2,86	2,95	3,05	3,03	3,02	3,05	3,00	3,04	**3,00**	2,98
3- temps de monté (mSec)	124,1	124,1	124,1	124,1	120,0	126,4	126,4	126,4	126,0	120,0	**123,9**	123,7
Déformation maximale (micron)	6,03	6,38	6,38	6,10	6,10	6,21	6,27	6,14	6,34	6,17	**6,22**	6,25
Ratio de monté	0,60	0,58	0,60	0,59	0,57	0,57	0,57	0,58	0,60	0,58	**0,58**	0,58
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	16864	15993	16000	16735	16715	16442	16263	16629	16088	16554	**16406**	16335
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	16848	15700	15943	16663	16315	15999	15826	16410	16030	16251	**16175**	16114

Tableau-A III-3 Module de rigidité du mélange C3 (0 ˚C essai 1)

Date :	Type d'enrobé : EBHP14-Verre	# échantillon: Camion 3	Force de contact (N): 100
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28	Épaisseur (mm) : 47,92	Force de cycle (N) : 4000
	% Vi:	Température (°C) : 0	# répétitions : 11

Plan de sollicitation : 0 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-3898	-3920	-3930	-3938	-3937	-3943	-3937	-3938	-3942	-3938	**-3932**	-3930
2- Période de répétition (sec)	3,08	3,05	3,01	3,06	3,02	2,87	2,83	2,96	3,06	3,09	**3,00**	3,02
3- temps de monté (mSec)	124,1	124,1	124,1	127,9	126,0	127,9	127,9	122,2	127,9	122,2	**125,8**	126,0
Déformation maximale (micron)	4,38	5,10	4,90	4,90	4,96	5,07	5,14	5,10	5,14	5,07	**4,96**	4,92
Ratio de monté	0,59	0,59	0,60	0,61	0,61	0,60	0,61	0,57	0,61	0,61	**0,60**	0,61
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	11519	9941	10387	10409	10260	10066	9916	9985	9929	10053	**10276**	10528
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	11456	9840	10407	10459	10348	10101	10018	9783	10007	10103	**10304**	10554

Tableau-A III-4 Module de rigidité du mélange C3 (0 C essai 2)

Date :	Type d'enrobé : EBHP14-Verre	# échantillon: Camion 3	Force de contact (N): 100
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28	Épaisseur (mm) : 47,92	Force de cycle (N) : 4000
	% Vi :	Température (°C) : 0	# répétitions : 11

Plan de sollicitation : 90 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-3915	-3938	-3943	-3950	-3952	-3948	-3943	-3951	-3950	-3956	**-3945**	-3943
2- Période de répétition (sec)	3,12	3,10	3,08	24,66	-15,32	3,29	2,92	3,04	3,01	3,06	**3,40**	3,04
3- temps de monté (mSec)	126,0	126,4	126,0	126,0	121,8	126,0	126,0	126,0	127,9	126,0	**125,8**	126,4
Déformation maximale (micron)	4,45	4,41	4,65	4,34	3,69	4,45	4,41	4,41	4,38	4,34	**4,35**	4,45
Ratio de monté	0,61	0,61	0,56	0,60	0,60	0,61	0,61	0,60	0,60	0,60	**0,60**	0,60
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	11391	11548	10961	11764	13863	11486	11560	11586	11674	11785	**11781**	11474
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	11454	11620	10669	11772	13863	11548	11610	11601	11708	11812	**11784**	11450

Tableau - A III-5 Module de rigidité du mélange C3 (10 ˚C essai 1)

Date : 1701-01	Type d'enrobé : EBHP14-Verre	# échantillon: Camion 3	Force de contact (N): 50
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28	Diamètre (mm) : 47,92	Force de cycle (N) : 1500
	% Vi :	Température (°C) : 10	# répétitions : 11

Plan de sollicitation : 90 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-1445	-1442	-1439	-1447	-1446	-1454	-1443	-1448	-1452	-1448	**-1446**	**-1446**
2- Période de répétition (sec)	3,04	3,08	3,05	3,07	3,05	3,08	3,04	2,87	3,07	3,06	**3,04**	**3,07**
3- temps de monté (mSec)	126,0	122,2	126,0	124,1	124,1	124,1	126,0	126,0	124,1	126,0	**124,7**	**124,86**
Déformation maximale (micron)	3,90	3,93	3,62	3,69	4,21	3,76	4,00	3,86	3,62	3,72	**3,83**	**3,68**
Ratio de monté	0,62	0,59	0,59	0,58	0,51	0,58	0,56	0,57	0,60	0,60	**0,58**	**0,59**
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4799	4746	5143	5074	4448	5005	4669	4851	5189	5030	**4900**	**5088**
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4868	4712	5116	5020	4201	4945	4553	4775	5204	5036	**4851**	**5064**

Tableau-A III-6 Module de rigidité du mélange C3 (10 C essai 2)

Date	Type d'enrobé :	EBHP14-Verre			# échantillon:	Camion 3 (E2)			Force de contact (N):	50		
Entreprise	Type de bitume :	PG 76-28			Diamètre (mm) :	47,92			Force de cycle (N) :	1500		
	% Vi :				Température (°C) :	10			# répétitions :	11		
	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10 essais	5 choix
1- Valeur crête (N)	-1435	-1446	-1448	-1442	-1445	-1448	-1443	-1443	-1448	-1444	**-1444**	**-1445**
2- Période de répétition (sec)	3,06	3,01	2,94	3,02	3,05	3,02	3,04	3,01	2,86	3,02	**3,00**	**3,01**
3- temps de monté (mSec)	124,1	124,1	126,0	126,0	124,1	126,0	120,0	126,0	126,0	126,0	**124,7**	**124,41**
Déformation maximale (micron)	2,76	2,72	4,00	3,34	2,79	3,69	2,96	3,59	3,38	3,24	**3,21**	**3,27**
Ratio de monté	0,61	0,60	0,56	0,59	0,63	0,57	0,55	0,58	0,59	0,61	**0,59**	**0,59**
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	6734	6869	4686	5577	6695	5077	6298	5208	5547	5766	**5917**	**5805**
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	6778	6861	4574	5546	6839	4995	6081	5157	5521	5785	**5887**	**5765**

Tableau-A III-7 Module de rigidité du mélange C2 (-10 C essai 1)

Date	Type d'enrobé :	EBHP14-Verre			# échantillon:	Camion 2			Force de contact (N):	250		
Entreprise Eurovia	Type de bitume :	PG 76-28			Diamètre (mm) :	52,94			Force de cycle (N) :	8000		
	% Vi :				Température (°C) :	-10			# répétitions :	11		
Plan de sollicitation : 0 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10 essais	5 choix
1- Valeur crête (N)	-7870	-7876	-7887	-7884	-7887	-7887	-7895	-7885	-7888	-7887	**-7885**	-7883
2- Période de répétition (sec)	3,05	3,11	3,03	3,04	3,06	3,04	3,05	3,03	3,05	2,85	**3,03**	3,02
3- temps de monté (mSec)	126,0	123,7	126,0	120,0	127,9	120,0	126,0	126,0	121,8	126,0	**124,1**	123,1
Déformation maximale (micron)	3,10	4,72	3,41	3,38	4,52	3,34	3,72	5,31	3,34	3,86	**3,71**	3,98
Ratio de monté	0,64	0,53	0,62	0,62	0,61	0,62	0,58	0,54	0,62	0,59	**0,60**	0,60
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	29708	19531	27063	27330	20452	27621	24835	17394	27627	23922	**25343**	24085
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	30756	18477	27405	27685	20611	27987	24341	16567	28068	23821	**25461**	24184

Tableau-A III-8 Module de rigidité du mélange C2 (-10 C essai 2)

Date	Type d'enrobé : EBHP14-Verre	# échantillon: Camion 2	Force de contact (N): 250	
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28	Diamètre (mm) : 52,94	Force de cycle (N) : 8000	
	% Vi :	Température (°C) : -10	# répétitions : 11	

Plan de sollicitation : 90 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-7803	-7843	-7860	-7868	-7863	-7867	-7872	-7863	-7870	-7881	**-7859**	-7852
2- Période de répétition (sec)	2,87	6,15	3,06	3,04	3,07	3,03	3,05	3,05	3,04	-35,51	**-0,52**	-4,08
3- temps de monté (mSec)	126,0	123,7	120,0	120,0	126,0	123,7	120,0	127,9	122,2	126,0	**123,1**	124,7
Déformation maximale (micron)	4,34	3,45	3,96	3,24	4,03	4,86	3,45	4,03	4,58	4,55	**4,05**	4,29
Ratio de monté	0,60	0,61	0,57	0,57	0,62	0,59	0,60	0,57	0,47	0,41	**0,56**	0,55
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	21039	26643	23219	28434	22832	18954	26743	22830	20103	20284	**23139**	21624
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	21046	26912	22634	27800	23186	18771	26782	22197	18090	17120	**22482**	20782

Tableau-A III-9 Module de rigidité du mélange C2 (0 C essai 1)

Date	Type d'enrobé : EBHP14-Verre	# échantillon: Camion 2	Force de contact (N): 100	
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28	Épaisseur 52,94	Force de cycle (N) : 4500	
	% Vi :	Température (°C) : 0	# répétitions : 11	

Plan de sollicitation : 0 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-4356	-4430	-4436	-4443	-4451	-4453	-4453	-4453	-4455	-4455	**-4438**	**-4443**
2- Période de répétition (sec)	2,96	3,02	3,02	3,01	3,11	2,94	3,06	2,85	3,02	3,09	**3,01**	**3,02**
3- temps de monté (mSec)	126,0	120,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	120,0	126,0	126,0	**125,3**	**124,8**
Déformation maximale (micron)	2,55	3,28	3,07	4,14	3,34	3,90	3,28	3,07	2,72	2,93	**3,24**	**3,46**
Ratio de monté	0,68	0,47	0,54	0,29	0,50	0,35	0,47	0,56	0,64	0,60	**0,51**	**0,45**
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	19995	15840	16931	12579	15589	13387	15924	16997	19156	17804	**16356**	**15308**
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	21288	14308	16096	9753	14353	10944	14333	16455	19807	17812	**15410**	**13783**

Tableau-A III-10 Module de rigidité du mélange C2 (0 C essai 2)

Date	Type d'enrobé :					# échantillon:	Camion 2		Force de contact (N):		100		
Entreprise Eurovia	Type de bitume :					Diamètre (mm) :	52,94		Force de cycle (N) :		4500		
	% Vi :					Température (°C) :	0		# répétitions :		11		
Plan de sollicitation : 90 de gré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré											MOYENNE	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		10 essais	5 choix
1- Valeur crête (N)	-4468	-4474	-4467	-4477	-4471	-4472	-4464	-4469	-4468	-4473		**-4470**	**-4472**
2- Période de répétition (sec)	3,07	3,10	3,04	3,04	3,04	3,07	2,93	3,06	2,87	3,04		**3,03**	**3,06**
3- temps de monté (mSec)	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0		**126,0**	**126,0**
Déformation maximale (micron)	2,21	2,31	2,21	2,48	3,48	2,21	1,55	2,52	2,38	2,93		**2,42**	**2,43**
Ratio de monté	0,70	0,62	0,65	0,62	0,32	0,67	0,81	0,61	0,59	0,48		**0,61**	**0,61**
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	23715	22683	23710	21124	15039	23737	33701	20799	22000	17876		**22621**	**21826**
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	25601	23131	24759	21493	11832	25075	39918	21025	21896	16252		**23328**	**22142**

Tableau-A III-11 Module de rigidité du mélange C2 (10 C essai 1)

Date	Type d'enrobé :			EBHP14-Verre		# échantillon:	Camion 2		Force de contact (N):		50		
Entreprise Eurovia	Type de bitume :			PG 76-28		Epaisseur (mm) :	52,94		Force de cycle (N) :		2000		
	% Vi :					Température (°C) :	10		# répétitions :		11		
Plan de sollicitation : 0 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré											MOYENNE	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		10 essais	5 choix
1- Valeur crête (N)	-2134	-2141	-2142	-2147	-2153	-2146	-2153	-2149	-2148	-2149		**-2146**	**-2145**
2- Période de répétition (sec)	3,06	3,09	2,83	2,97	3,06	3,03	3,02	3,07	3,05	3,04		**3,02**	**2,99**
3- temps de monté (mSec)	127,9	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0		**126,2**	**126,0**
Déformation maximale (micron)	3,41	2,38	3,45	2,79	3,55	2,76	3,59	3,48	3,10	2,48		**3,06**	**3,50**
Ratio de monté	0,60	0,73	0,45	0,66	0,58	0,64	0,38	0,47	0,61	0,72		**0,60**	**0,50**
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	7325	10539	7278	9003	7100	9112	7034	7229	8109	10140		**8404**	**7193**
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	7335	11483	6564	9371	6993	9384	6043	6627	8154	11015		**8483**	**6713**

Tableau-A III-12 Module de rigidité du mélange C2 (10 C essai 2)

PREB 1701-01	Type d'enrobé : EBHP14-Verre					# échantillon: Camion 2					Force de contact (N): 50		
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28					Diamètre (mm) : 52,94					Force de cycle (N) : 2500		
	% Vi :					Température (°C) : 10					# répétitions : 11		
Plan de sollicitation : 90 degré	Valeurs essai Module de rigidité mesuré											MOYENNE	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		10 essais	5 choix
1- Valeur crête (N)	-2134	-2138	-2148	-2148	-2160	-2160	-2158	-2158	-2164	-2157		**-2153**	**-2150**
2- Période de répétition (sec)	3,01	2,85	3,11	3,04	2,99	3,01	3,04	3,04	3,03	3,05		**3,02**	**3,01**
3- temps de monté (mSec)	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	123,7	126,0	120,0	126,0	126,0		**125,7**	**125,5**
Déformation maximale (micron)	4,00	3,90	3,55	2,83	3,45	3,83	4,34	2,96	2,93	3,55		**3,60**	**3,53**
Ratio de monté	0,60	0,60	0,60	0,63	0,60	0,60	0,54	0,60	0,60	0,58		**0,59**	**0,60**
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	6251	6427	7086	8900	7339	6612	5818	8524	8648	7114		**7133**	**6698**
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	6233	6441	7082	9063	7354	6594	5584	8542	8626	7039		**7113**	**6678**

Tableau-A III-13 Module de rigidité du mélange C1 (-10 C essai 1)

PREB 1701-01	Type d'enrobé : EBHP14-Verre					# échantillon: Camion 1					Force de contact (N): 250		
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28					Diamètre (mm) : 49,29					Force de cycle (N) : 8000		
	% Vi					Température (°C) : -10					# répétitions : 11		
	Valeurs essai Module de rigidité mesuré											MOYENNE	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		10 essais	5 choix
1- Valeur crête (N)	-7972	-8095	-8259	-8044	-8006	-7975	-8008	-7965	-8060	-7953		**-8034**	-8057
2- Période de répétition (sec)	3,05	3,04	3,10	3,07	2,87	3,09	3,06	3,09	3,06	3,06		**3,05**	3,06
3- temps de monté (mSec)	130,1	128,3	128,3	121,8	121,8	127,9	127,9	120,3	122,2	122,2		**125,6**	124,0
Déformation maximale (micron)	3,69	4,41	3,83	4,38	3,45	3,59	4,65	3,27	4,45	3,45		**3,99**	3,68
Ratio de monté	0,58	0,39	0,42	0,41	0,46	0,59	0,56	0,47	0,38	0,49		**0,48**	0,51
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	27185	23076	27149	23112	29214	27979	21644	30593	22798	29019		**25686**	27690
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	26831	19125	23061	19530	25720	27704	20972	27129	18742	26375		**23118**	25580

Tableau-A III-14 Module de rigidité du mélange C1 (-10 C essai 2)

PREB 1701-01	Type d'enrobé : EBHP14-Verre					# échantillon: Camion 1				Force de contact (N): 200		
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28					Diamètre (mm) : 67				Force de cycle (N) : 8200		
	% Vi					Température (°C) : -10				# répétitions : 11		
	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-7936	-7941	-7943	-7938	-7950	-7947	-7949	-7945	-7944	-7957	**-7945**	-7945
2- Période de répétition (sec)	3,05	3,05	3,04	2,85	2,96	3,08	3,02	3,06	3,05	3,05	**3,02**	3,04
3- temps de monté (mSec)	126,0	127,9	120,0	120,0	120,3	122,2	120,3	124,1	121,8	120,0	**122,1**	121,7
Déformation maximale (micron)	4,03	3,31	3,62	3,62	3,65	3,83	3,52	3,83	3,48	3,62	**3,63**	3,68
Ratio de monté	0,43	0,54	0,41	0,38	0,44	0,38	0,45	0,38	0,46	0,45	**0,44**	0,42
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	18207	22204	20305	20294	20131	19218	20918	19214	21112	20343	**20304**	20003
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	15720	21135	17228	16791	17587	15793	18345	15812	18758	17863	**17691**	17163

Tableau-A III-15 Module de rigidité du mélange C1 (0 C essai 1)

PREB 1701-01	Type d'enrobé : EBHP14-Verre					# échantillon: C1				Force de contact (N): 100		
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28					Épaisseur (mm) : 49,29				Force de cycle (N) : 4000		
	% Vi					Température (°C) : 0				# répétitions : 11		
	Valeurs essai Module de rigidité mesuré										MOYENNE	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-3906	-3938	-3942	-3950	-3950	-3947	-3956	-3944	-3943	-3950	**-3943**	-3941
2- Période de répétition (sec)	3,04	3,03	2,98	2,85	2,94	3,07	3,04	3,05	3,06	3,05	**3,01**	3,01
3- temps de monté (mSec)	127,9	127,9	127,9	127,9	127,9	128,3	127,9	127,9	129,8	127,9	**128,1**	127,9
Déformation maximale (micron)	4,48	4,86	4,41	4,90	4,34	4,83	4,45	4,48	4,38	4,58	**4,58**	4,56
Ratio de monté	0,61	0,58	0,62	0,57	0,61	0,58	0,61	0,61	0,62	0,60	**0,60**	0,61
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	10962	10192	11237	10149	11440	10287	11189	11069	11328	10838	**10847**	11179
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	11007	10075	11372	9932	11543	10116	11264	11162	11458	10821	**10843**	11270

Tableau-A III-16 Module de rigidité du mélange C1 (0 C essai 2)

PREB 1701-01	Type d'enrobé : EBHP14-Verre					# échantillon: C1				Force de contact (N): 100			
Entreprise Eurovia	Type de bitume : 76-28					Diamètre (mm) : 49,29				Force de cycle (N) : 4000			
	% Vi					Température (°C) : 0				# répétitions : 11			
	Valeurs essai Module de rigidité mesuré											MOYENNE	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		10 essais	5 choix
1- Valeur crête (N)	-3906	-3925	-3931	-3943	-3946	-3943	-3945	-3945	-3951	-3956		**-3939**	-3940
2- Période de répétition (sec)	3,06	3,08	2,93	3,16	2,86	3,06	3,12	3,07	3,04	3,05		**3,04**	3,08
3- temps de monté (mSec)	127,9	127,9	127,9	127,9	138,1	128,3	135,8	126,0	128,3	127,9		**130,0**	127,5
Déformation maximale (micron)	4,10	4,62	4,14	4,41	4,14	4,03	4,21	4,07	4,24	4,14		**4,22**	4,21
Ratio de monté	0,61	0,55	0,61	0,56	0,63	0,61	0,62	0,60	0,59	0,61		**0,60**	0,59
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	11975	10687	11952	11239	11999	12296	11800	12200	11722	12028		**11744**	11768
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	12041	10297	12043	10945	12260	12396	11969	12161	11651	12079		**11742**	11724

Tableau-A III-17 Module de rigidité du mélange C1 (10 C essai 1)

PREB 1701-01	Type d'enrobé : EBHP14-Verre					# échantillon: Camion 1				Force de contact (N): 50			
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28					Epaisseur (mm) : 49,23				Force de cycle (N) : 1500			
	% Vi					Température (°C) : 10				# répétitions : 11			
	Valeurs essai Module de rigidité mesuré											MOYENNE	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		10 essais	5 choix
1- Valeur crête (N)	-1430	-1433	-1438	-1440	-1439	-1442	-1449	-1446	-1445	-1447		**-1441**	**-1440**
2- Période de répétition (sec)	3,07	3,03	3,04	3,05	3,02	3,02	2,97	3,05	3,04	3,00		**3,03**	**3,03**
3- temps de monté (mSec)	124,1	126,0	123,7	126,0	126,0	120,0	126,0	126,0	126,0	126,0		**124,9**	**124,3**
Déformation maximale (micron)	4,21	4,45	4,21	3,41	3,34	4,65	3,59	3,03	3,83	3,31		**3,89**	**3,34**
Ratio de monté	0,59	0,36	0,43	0,64	0,67	0,27	0,61	0,72	0,60	0,66		**0,54**	**0,66**
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4283	4058	4306	5313	5419	3901	5091	6002	4756	5505		**4737**	**5466**
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4257	3508	3880	5457	5637	3176	5120	6475	4757	5723		**4613**	**5682**

Tableau-A III-18 Module de rigidité du mélange C1 (10 C essai 2)

PREB 1701-01	Type d'enrobé : EBHP14-Verre					# échantillon: Camion 1					Force de contact (N): 50		
Entreprise Eurovia	Type de bitume : PG 76-28					Diamètre (mm) : 49,23					Force de cycle (N) : 400		
	% Vi					Température (°C) : 10					# répétitions : 11		
	Valeurs essai Module de rigidité mesuré											**MOYENNE**	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**		**10 essais**	**5 choix**
1- Valeur crête (N)	-1430	-1432	-1434	-1442	-1444	-1443	-1447	-1442	-1448	-1448		**-1441**	**-1440**
2- Période de répétition (sec)	2,90	3,07	3,04	3,08	3,02	2,87	3,05	3,07	3,07	3,02		**3,02**	**3,01**
3- temps de monté (mSec)	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0	126,0		**126,0**	**126,0**
Déformation maximale (micron)	3,17	3,96	2,93	3,24	3,45	3,52	3,24	3,41	3,28	3,83		**3,40**	**3,50**
Ratio de monté	0,73	0,52	0,75	0,72	0,66	0,68	0,77	0,67	0,69	0,58		**0,68**	**0,65**
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	5680	4549	6162	5602	5276	5169	5622	5319	5567	4764		**5377**	**5655**
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	6147	4337	6764	6002	5485	5415	6212	5553	5884	4714		**5662**	**6083**

ANNEXE IV

RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE DE RIGIDITÉ OPTION 2

Tableau-A IV-1 Résultats du module de rigidité du camion 3 à 10 ˚C et 10Hz

N	No de ligne	Température	Freq	|E*|	φ	E_1	E_2
Cycle	**#**	**°C**	**Hz**	**Mpa**	**(°)**	**Mpa**	**Mpa**
		10	10	8513	203	-7831	-3317
108	10812	10	10	8537	201	-7962	-3079
106	10612	10	10	8528	201	-7947	-3095
104	10412	10	10	8541	202	-7943	-3141
102	10212	10	10	8516	201	-7933	-3096
100	10012	10	10	8545	202	-7949	-3137
98	9812	10	10	8516	202	-7913	-3147
96	9612	10	10	8532	202	-7921	-3171
94	9412	10	10	8508	202	-7915	-3120
92	9212	10	10	8498	202	-7899	-3135
90	9012	10	10	8496	201	-7907	-3106
88	8812	10	10	8528	202	-7926	-3147
86	8612	10	10	8520	202	-7918	-3147
84	8412	10	10	8537	202	-7928	-3167
82	8212	10	10	8488	202	-7884	-3144
80	8012	10	10	8540	202	-7943	-3137
78	7812	10	10	8519	201	-7928	-3118
76	7612	10	10	8525	202	-7912	-3173
74	7412	10	10	8538	202	-7921	-3187
72	7212	10	10	8523	202	-7900	-3200
70	7012	10	10	8513	202	-7910	-3147
68	6812	10	10	8511	202	-7895	-3178
66	6612	10	10	8533	202	-7908	-3206
64	6412	10	10	8550	202	-7927	-3204
62	6212	10	10	8505	202	-7884	-3191
60	6012	10	10	8525	202	-7912	-3175
58	5812	10	10	8529	202	-7896	-3227
56	5612	10	10	8488	202	-7860	-3204
54	5412	10	10	8535	202	-7911	-3205
52	5212	10	10	8544	202	-7917	-3212
50	5012	10	10	8498	202	-7859	-3231
48	4812	10	10	8521	202	-7880	-3242
46	4612	10	10	8516	202	-7869	-3256
44	4412	10	10	8518	202	-7879	-3237
42	4212	10	10	8530	202	-7897	-3225
40	4012	10	10	8513	203	-7856	-3280

N	No de ligne	Température	Freq	|E*|	φ	E_1	E_2
Cycle	#	°C	Hz	Mpa	(°)	Mpa	Mpa
38	3812	10	10	8517	203	-7865	-3267
36	3612	10	10	8500	203	-7846	-3268
34	3412	10	10	8511	203	-7850	-3289
32	3212	10	10	8473	203	-7818	-3265
30	3012	10	10	8476	203	-7796	-3326
28	2812	10	10	8474	203	-7795	-3322
26	2612	10	10	8503	203	-7809	-3366
24	2412	10	10	8503	203	-7823	-3332
22	2212	10	10	8493	203	-7791	-3380
20	2012	10	10	8497	203	-7798	-3376
18	1812	10	10	8469	204	-7748	-3419
16	1612	10	10	8485	204	-7757	-3439
14	1412	10	10	8501	204	-7762	-3468
12	1212	10	10	8469	205	-7694	-3540
10	1012	10	10	8516	205	-7722	-3591
8	812	10	10	8484	206	-7656	-3657
6	612	10	10	8550	206	-7672	-3773
4	412	10	10	8525	207	-7594	-3874
2	212	10	10	8628	210	-7483	-4295
1	12	10	10	8365	218	-6599	-5141

Tableau-A IV-2 résultats du module de rigidité du camion 2 à 10 ˚C et 10 Hz

N	No de ligne	Température	Freq	|E*|	φ	E1	E2
Cycle	#	°C	Hz	Mpa	(°)	Mpa	Mpa
		10	10	10715	199	-10129	-3491
109	10812	10	10	10531	198	-9991	-3329
107	10612	10	10	10528	198	-10008	-3268
105	10412	10	10	10491	199	-9943	-3346
103	10212	10	10	10509	199	-9960	-3352
101	10012	10	10	10510	199	-9962	-3350
99	9812	10	10	10513	199	-9961	-3361
97	9612	10	10	10547	199	-9991	-3378
95	9412	10	10	10524	198	-10000	-3281
93	9212	10	10	10585	198	-10043	-3343
91	9012	10	10	10578	198	-10054	-3289
89	8812	10	10	10555	198	-10016	-3329
87	8612	10	10	10605	198	-10065	-3341
85	8412	10	10	10580	199	-10012	-3419
83	8212	10	10	10550	198	-10024	-3291

N	No de ligne	Température	Freq	|E*|	φ	E1	E2
Cycle	#	°C	Hz	Mpa	(°)	Mpa	Mpa
81	8012	10	10	10605	198	-10067	-3335
79	7812	10	10	10581	199	-10027	-3380
77	7612	10	10	10583	199	-10023	-3398
75	7412	10	10	10610	198	-10063	-3363
73	7212	10	10	10636	199	-10069	-3428
71	7012	10	10	10574	198	-10033	-3337
69	6812	10	10	10622	199	-10062	-3402
67	6612	10	10	10556	199	-10003	-3372
65	6412	10	10	10593	199	-10037	-3385
63	6212	10	10	10577	199	-10007	-3427
61	6012	10	10	10590	199	-10026	-3411
59	5812	10	10	10573	199	-10017	-3381
57	5612	10	10	10554	199	-10008	-3351
55	5412	10	10	10567	198	-10022	-3349
53	5212	10	10	10635	199	-10063	-3441
51	5012	10	10	10614	199	-10044	-3432
49	4812	10	10	10629	199	-10058	-3437
47	4612	10	10	10583	199	-10015	-3422
45	4412	10	10	10604	199	-10032	-3434
43	4212	10	10	10696	199	-10123	-3453
41	4012	10	10	10538	199	-9965	-3430
39	3812	10	10	10570	199	-9997	-3432
37	3612	10	10	10658	199	-10082	-3456
35	3412	10	10	10664	199	-10091	-3449
33	3212	10	10	10574	199	-10000	-3434
31	3012	10	10	10655	199	-10051	-3537
29	2812	10	10	10637	199	-10058	-3461
27	2612	10	10	10703	199	-10126	-3468
25	2412	10	10	10687	199	-10096	-3503
23	2212	10	10	10713	199	-10123	-3507
21	2012	10	10	10699	199	-10105	-3515
19	1812	10	10	10734	199	-10137	-3529
17	1612	10	10	10794	199	-10186	-3570
15	1412	10	10	10813	200	-10186	-3628
13	1212	10	10	10815	200	-10192	-3617
11	1012	10	10	10911	200	-10276	-3668
9	812	10	10	10874	200	-10247	-3642
7	612	10	10	11027	200	-10358	-3782
5	412	10	10	11169	200	-10490	-3837
3	212	10	10	11608	201	-10821	-4202
1	12	10	10	13897	204	-12657	-5740

Tableau-A IV-3 Résultats du module de rigidité du camion 1 à 10 ˚C et 10 Hz

N	No de ligne	Température	Freq	|E*|	φ	E1	E2
Cycle	#	°C	Hz	Mpa	(°)	Mpa	Mpa
		10	10	9797	206	-8824	-4236
109	10812	10	10	9648	204	-8830	-3886
107	10612	10	10	9630	204	-8804	-3903
105	10412	10	10	9666	204	-8837	-3916
103	10212	10	10	9651	204	-8822	-3914
101	10012	10	10	9638	204	-8800	-3931
99	9812	10	10	9674	204	-8833	-3945
97	9612	10	10	9616	204	-8788	-3904
95	9412	10	10	9621	204	-8788	-3915
93	9212	10	10	9631	204	-8792	-3931
91	9012	10	10	9587	204	-8749	-3919
89	8812	10	10	9600	204	-8772	-3900
87	8612	10	10	9606	204	-8763	-3935
85	8412	10	10	9624	204	-8786	-3927
83	8212	10	10	9621	204	-8775	-3945
81	8012	10	10	9644	204	-8795	-3957
79	7812	10	10	9662	204	-8798	-3993
77	7612	10	10	9632	204	-8786	-3947
75	7412	10	10	9695	204	-8838	-3984
73	7212	10	10	9667	204	-8807	-3986
71	7012	10	10	9676	205	-8802	-4018
69	6812	10	10	9618	205	-8740	-4015
67	6612	10	10	9611	205	-8745	-3988
65	6412	10	10	9648	205	-8774	-4015
63	6212	10	10	9616	205	-8736	-4020
61	6012	10	10	9647	205	-8773	-4014
59	5812	10	10	9638	205	-8755	-4028
57	5612	10	10	9627	205	-8734	-4049
55	5412	10	10	9680	205	-8791	-4053
53	5212	10	10	9609	205	-8706	-4066
51	5012	10	10	9670	205	-8777	-4059
49	4812	10	10	9631	205	-8722	-4085
47	4612	10	10	9675	205	-8779	-4067
45	4412	10	10	9644	205	-8721	-4115
43	4212	10	10	9597	205	-8682	-4090
41	4012	10	10	9649	205	-8719	-4134
39	3812	10	10	9702	205	-8767	-4157
37	3612	10	10	9670	205	-8728	-4162
35	3412	10	10	9614	206	-8661	-4173
33	3212	10	10	9629	206	-8668	-4192
31	3012	10	10	9655	206	-8698	-4193

N	No de ligne	Température	Freq	|E*|	φ	E1	E2
Cycle	**#**	**°C**	**Hz**	**Mpa**	**(°)**	**Mpa**	**Mpa**
29	2812	10	10	9723	206	-8757	-4225
27	2612	10	10	9665	206	-8699	-4210
25	2412	10	10	9703	206	-8698	-4300
23	2212	10	10	9713	206	-8706	-4307
21	2012	10	10	9762	206	-8750	-4329
19	1812	10	10	9768	207	-8736	-4370
17	1612	10	10	9786	207	-8747	-4389
15	1412	10	10	9806	207	-8741	-4444
13	1212	10	10	9889	207	-8805	-4502
11	1012	10	10	9937	208	-8794	-4629
9	812	10	10	10021	208	-8841	-4717
7	612	10	10	10106	208	-8888	-4811
5	412	10	10	10318	209	-8993	-5058
3	212	10	10	10901	211	-9321	-5653
1	12	10	10	14122	217	-11211	-8588

ANNEXE V

RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE

Tableau-A V-1 Synthèse des résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB1

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

INFORMATION GÉNÉRALES - ESSAI DE FATIGUE

Presse de sollicitation:	Bionix
Date / heure:	2016-05-27
Opérateur:	Francis
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette Nº:	C3-MB1
Diamètre (mm):	74,04
Hauteur (mm):	140
Vi(%):	1,79
Fréquence (Hz):	10
Tº cible (ºC):	10
ε cible (µdef):	140

RÉSULTATS FATIGUE (N_f)

	ref (E*)	ligne ref (E*)	**Cycles**
$N_{f\,25\%}$	11299	183	8 712
$N_{f\,30\%}$	10545	163	19 136
$N_{f\,50\%}$ (6ème cycle)	7532	#N/A	302 490
$N_{f\,50\%}$ (E* cycles 1-50)	7912	#N/A	302 490
$N_{f\,50\%}$ (E* cycles 1-300)	7596	#N/A	302 490

N_{f} II/III (φ)	26,21	2	299 981
N_{f} II/III (écart ext#1 >25%)	25	2798	470
N_{f} II/III (écart ext#2 >25%)	25	2834	1 446
N_{f} II/III (écart ext#3 >25%)	25	3088	302 490

SYNTHÈSE FATIGUE

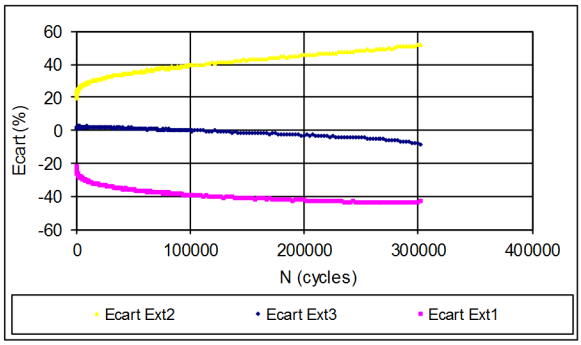
$|E_0|$ (MPa) :	**15065**
$|E_{0/2}|$ (MPa) :	**7532**
Perte de E* finale :	46%

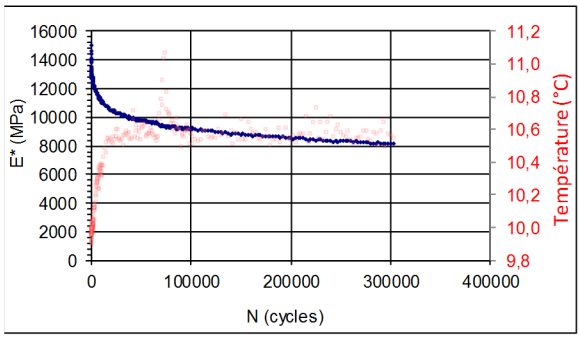
Fréquence (Hz):	10
Tº essai (ºC) :	10,40
ε réel (µdef):	131,84

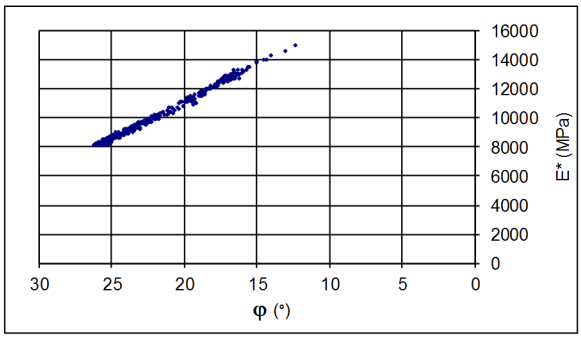
LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

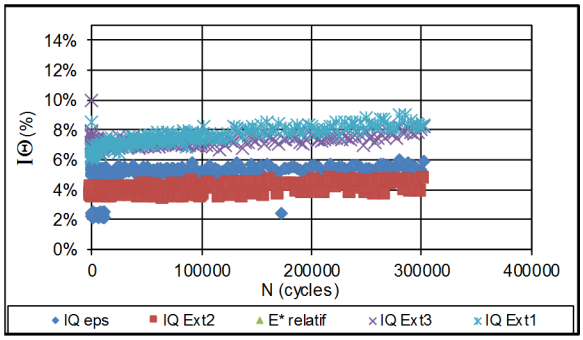
RÉSULTATS GRAPHIQUES - ESSAI DE FATIGUE 1/2

Presse de sollicitation:	Bionix
Date début essai:	27 mai 2016
Opérateur:	Francis
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette N°:	E2-MB1
Diamètre (mm):	74,04
Hauteur (mm):	140,00
Vi(%):	1,79
Fréquence (Hz):	10
T° cible (°C):	10
ε cible (µdef):	140









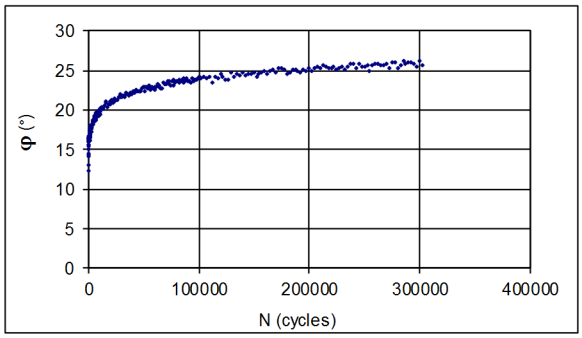


Figure-A V-1 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB1 page 1

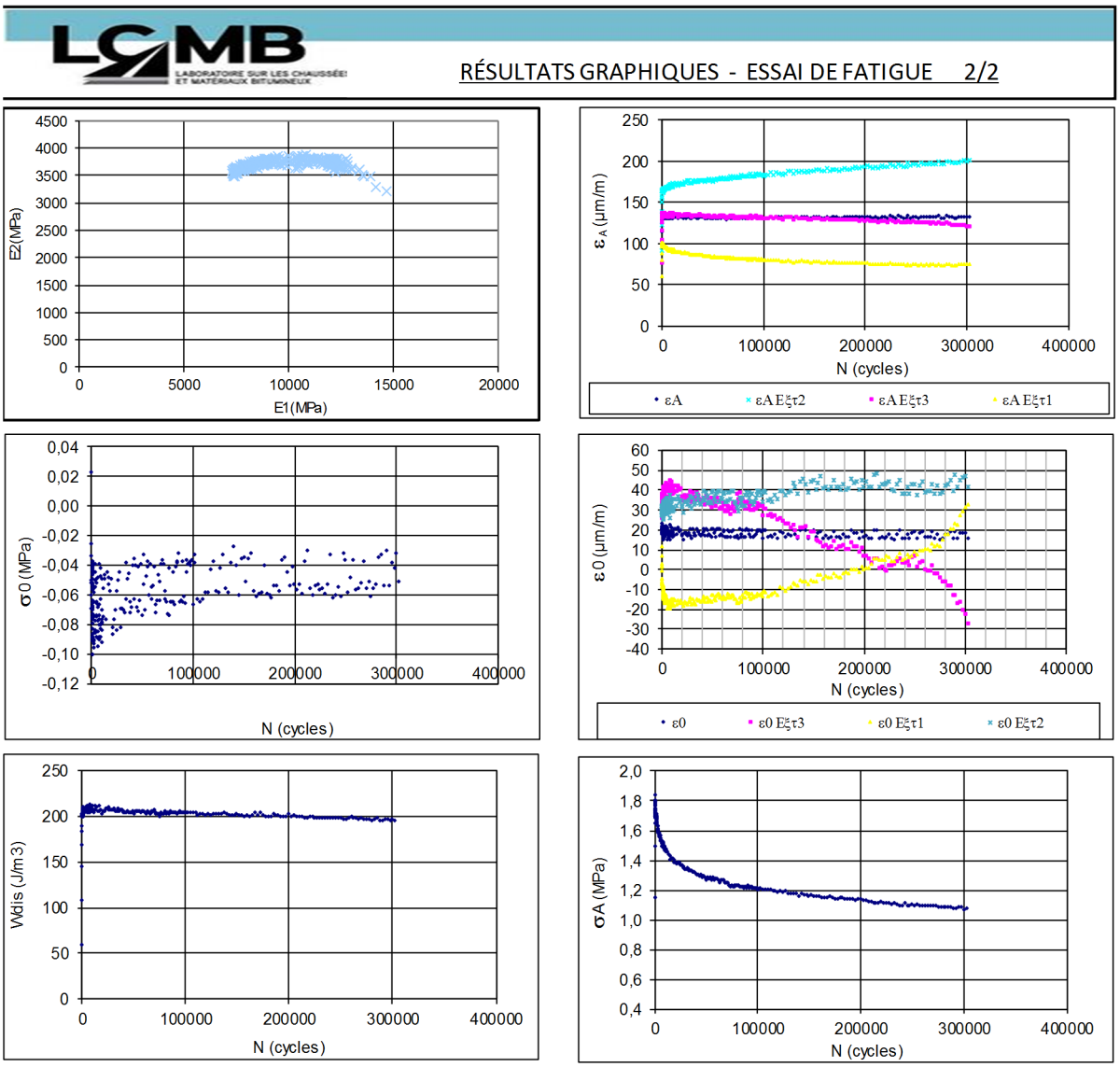


Figure-A V-2 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB1 page 2

Tableau-A V-2 Synthèse des résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB2

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

INFORMATION GÉNÉRALES - ESSAI DE FATIGUE

Presse de sollicitation:	Bionix
Date / heure:	2016-10-24
Opérateur:	Théophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette Nº:	C3-MB2
Diamètre (mm):	74,13
Hauteur (mm):	124,15
Vi(%):	1,83
Fréquence (Hz):	10
Tº cible (ºC):	10
ε cible (µdef):	120

RÉSULTATS FATIGUE (N_f)

	ref (E*)	ligne ref (E*)	**Cycles**
$N_{f\,25\%}$	12567	86	10 479
$N_{f\,30\%}$	11729	66	27 250
$N_{f\,50\%}$ (6ème cycle)	8378	#N/A	96 823
$N_{f\,50\%}$ (E* cycles 1-50)	8686	#N/A	96 823
$N_{f\,50\%}$ (E* cycles 1-300)	8456	#N/A	96 823

N_{f} II/III (φ)	19,81	7	89 767
N_{f} II/III (écart ext#1 >25%)	25	2902	0
N_{f} II/III (écart ext#2 >25%)	25	2909	114
N_{f} II/III (écart ext#3 >25%)	25	2989	10 162

SYNTHÈSE FATIGUE

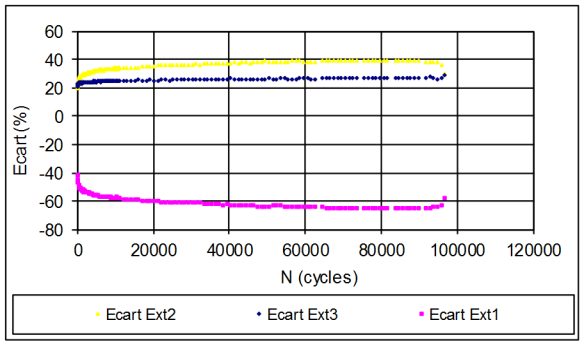
$|E_0|$ (MPa) :	**16756**
$|E_{0/2}|$ (MPa) :	**8378**
Perte de E* finale :	34%

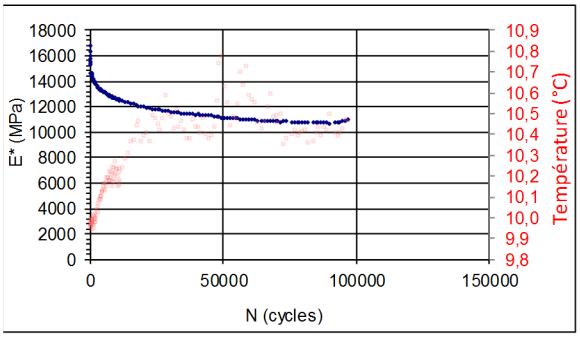
Fréquence (Hz):	10
Tº essai (ºC) :	10,18
ε réel (µdef):	114,48

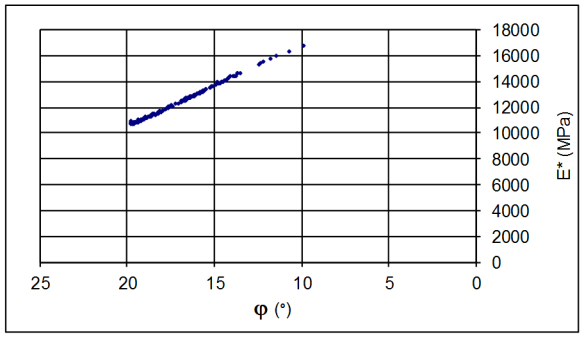
LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

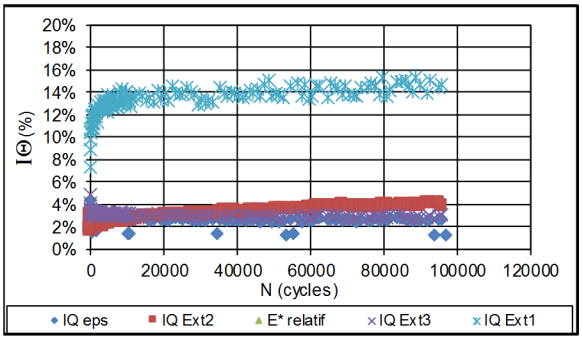
RÉSULTATS GRAPHIQUES - ESSAI DE FATIGUE 1/2

Presse de sollicitation:	Bionix
Date début essai:	24 octobre 2016
Opérateur:	Theopile Kakpo
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette N°:	E2-MB2
Diamètre (mm):	74,13
Hauteur (mm):	124,15
Vi(%):	1,63
Fréquence (Hz):	10
T° cible (°C):	10
ε cible (µdef):	120









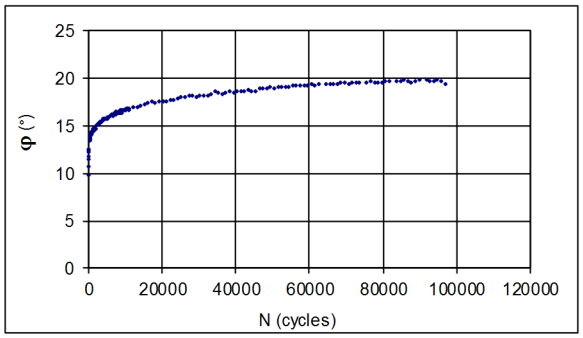


Figure-A V-3 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB2 page 1

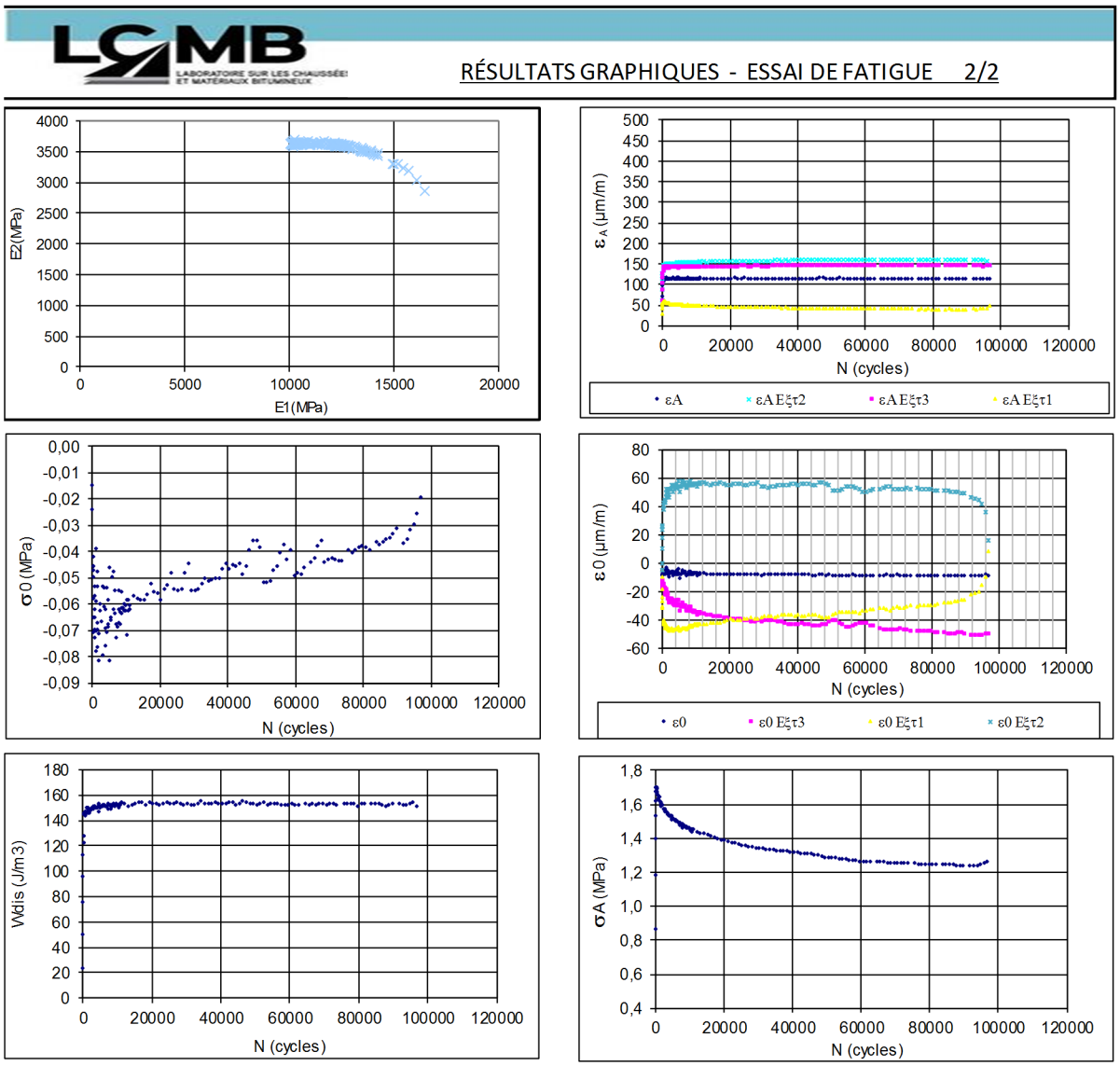


Figure-A V-4 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB2 page 2

Tableau-A V-3 Synthèse des résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB3

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

INFORMATION GÉNÉRALES - ESSAI DE FATIGUE

Presse de sollicitation:	Bionix
Date / heure:	2017-02-08
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette Nº:	C3-MB3
Diamètre (mm):	74,12
Hauteur (mm):	124,68
Vi(%):	1,81
Fréquence (Hz):	10
Tº cible (ºC):	10
ε cible (µdef):	130

RÉSULTATS FATIGUE (N_f)

	ref (E*)	ligne ref (E*)	**Cycles**
$N_{f\,25\%}$	12176	53	8 376
$N_{f\,30\%}$	11364	32	20 132
$Nf_{50\%}$ (6ème cycle)	8117	#N/A	75 549
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-50)	8161	#N/A	75 549
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-300)	8141	#N/A	75 549

$N_{f\,II/III}$ (φ)	21,30	1	75 549
$N_{f\,II/III}$ (écart ext#1 >25%)	25	3088	75 549
$N_{f\,II/III}$ (écart ext#2 >25%)	25	3088	75 549
$N_{f\,II/III}$ (écart ext#3 >25%)	25	3088	75 549

SYNTHÈSE FATIGUE

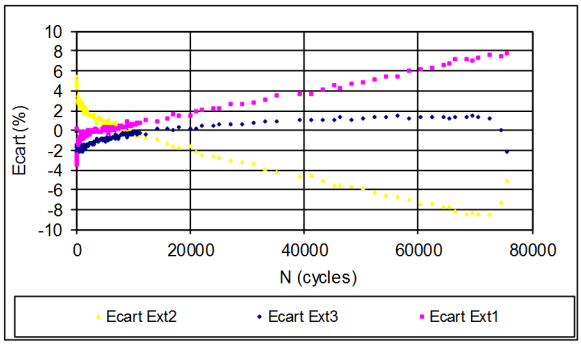
IE_0I (MPa) :	**16234**
$IE_{0/2}I$ (MPa) :	**8117**
Perte de E* finale :	38%

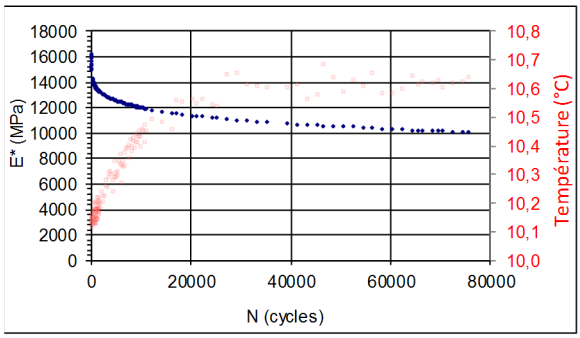
Fréquence (Hz):	10
Tº essai (ºC) :	10,20
ε réel (µdef):	122,29

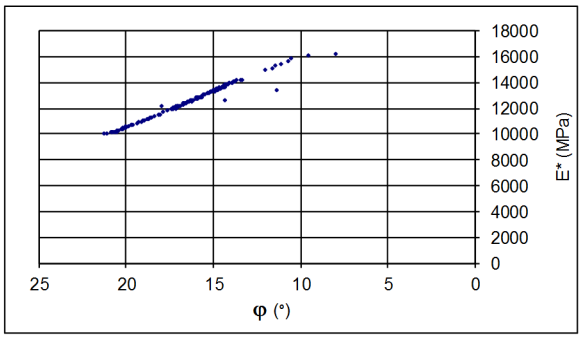
LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

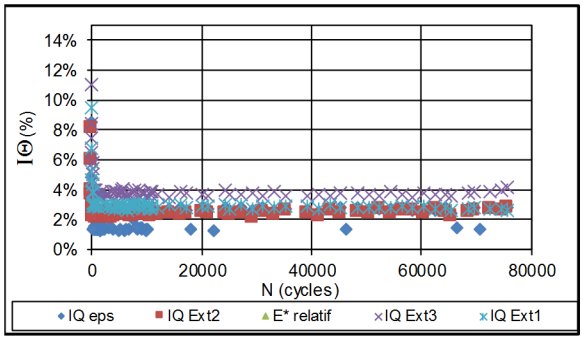
RÉSULTATS GRAPHIQUES - ESSAI DE FATIGUE 1/2

Presse de sollicitation:	Bionix
Date début essai:	8 février 2017
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette N°:	E2-MB3
Diamètre (mm):	74,12
Hauteur (mm):	124,68
Vi(%):	1,81
Fréquence (Hz):	10
T° cible (°C):	10
ε cible (µdef):	130









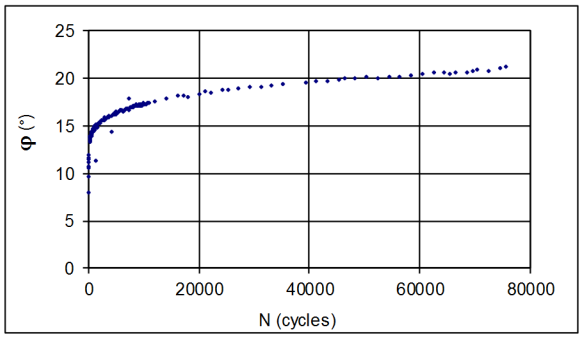


Figure-A V-5 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB3 page 1

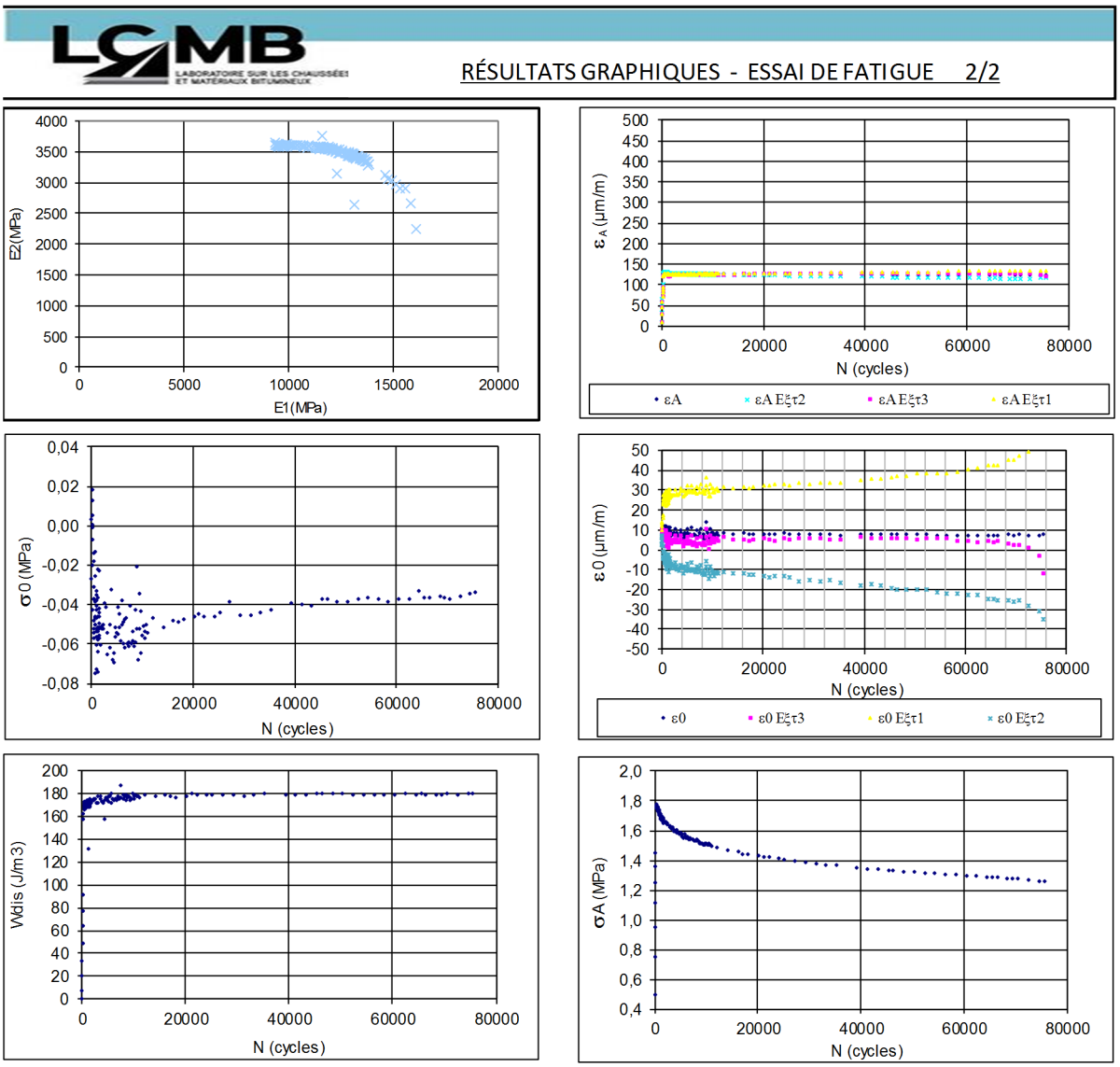


Figure-A V-6 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB3 page 2

Tableau-A V-4 Synthèse des résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB4

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

INFORMATION GÉNÉRALES - ESSAI DE FATIGUE

Presse de sollicitation:	Bionix
Date / heure:	2017-02-06
Opérateur:	Théophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette Nº:	C3-MB4
Diamètre (mm):	74,00
Hauteur (mm):	124,9
Vi(%):	1,44
Fréquence (Hz):	10
Tº cible (ºC):	10
ε cible (µdef):	100

RÉSULTATS FATIGUE (N_f)

	ref (E*)	ligne ref (E*)	**Cycles**
$N_{f\,25\%}$	13395	313	53 378
$N_{f\,30\%}$	12502	259	187 016
$Nf_{\,50\%}$ (6ème cycle)	8930	4	1 474 511
$Nf_{\,50\%}$ (E* cycles 1-50)	9032	4	1 474 511
$Nf_{\,50\%}$ (E* cycles 1-300)	8954	4	1 474 511
N_f II/III (φ)	21,11	4	1 474 511
N_f II/III (écart ext#1 >25%)	25	2905	452 736
N_f II/III (écart ext#2 >25%)	25	2947	693 149
N_f II/III (écart ext#3 >25%)	25	3088	1 494 542

SYNTHÈSE FATIGUE

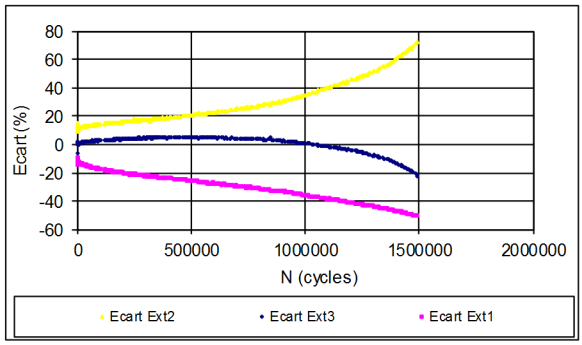
$|E_0|$ (MPa) :	**17860**
$|E_{0/2}|$ (MPa) :	**8930**
Perte de E* finale :	51%

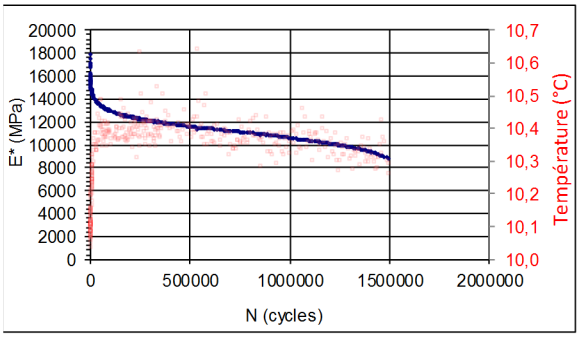
Fréquence (Hz):	10
Tº essai (ºC) :	10,33
ε réel (µdef):	93,88

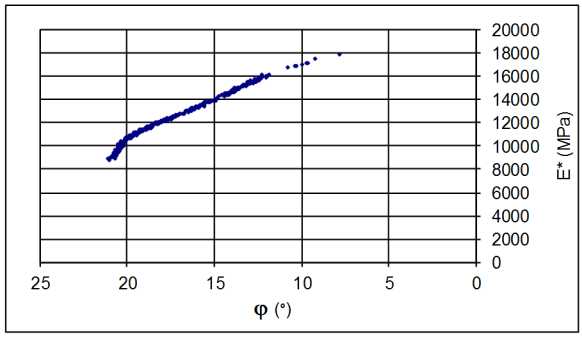
LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

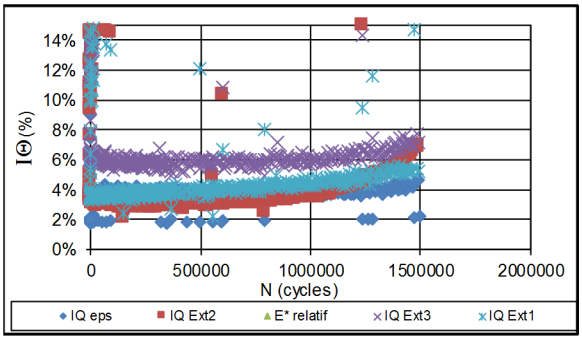
RÉSULTATS GRAPHIQUES - ESSAI DE FATIGUE 1/2

Presse de sollicitation:	Bionix
Date début essai:	6 février 2017
Opérateur:	Théophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette N°:	E2-MB4
Diamètre (mm):	74
Hauteur (mm):	124,90
Vi(%):	1,32
Fréquence (Hz):	10
T° cible (°C):	10
ε cible (µdef):	100









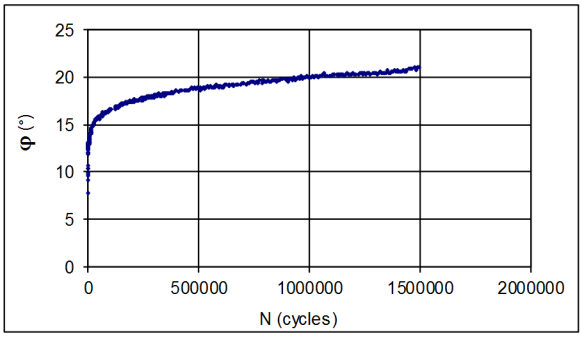


Figure-A V-7 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB4 page 1

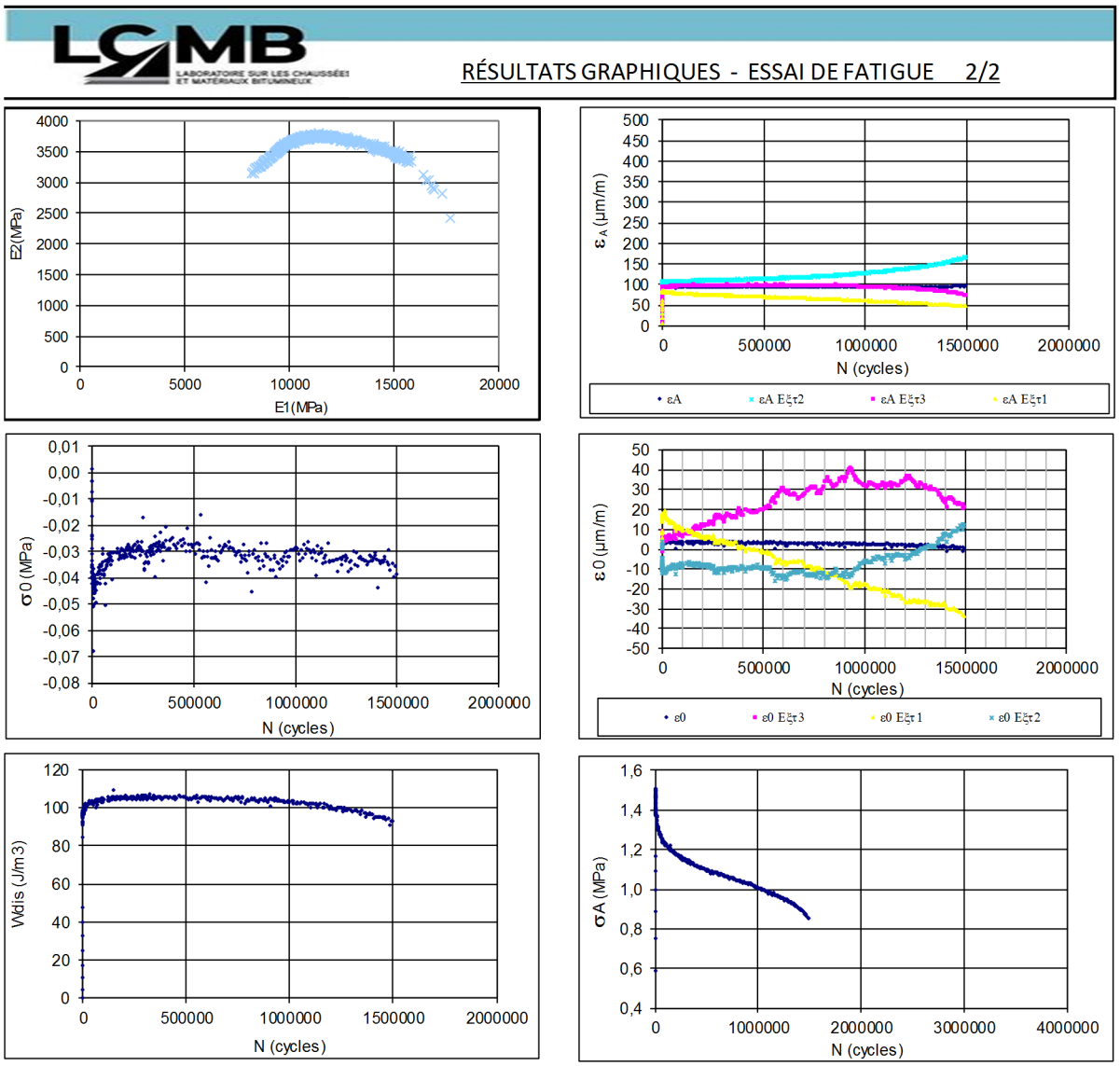


Figure-A V-8 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C3-MB4 page 2

Tableau-A V-5 Synthèse des résultats de fatigue de l'éprouvette C2-MB1

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

INFORMATION GÉNÉRALES - ESSAI DE FATIGUE

Presse de sollicitation:	MTS 810
Date / heure:	2016-11-29
Opérateur:	Kakpo Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette Nº:	C2-MB1
Diamètre (mm):	74,08
Hauteur (mm):	127,57
Vi(%):	1,86
Fréquence (Hz):	10
Tº cible (ºC):	10
ε cible (µdef):	120

RÉSULTATS FATIGUE (N_f)

	ref (E*)	ligne ref (E*)	**Cycles**
$N_{f\,25\%}$	11249	658	5 884
$N_{f\,30\%}$	10499	619	17 147
$Nf_{50\%}$ (6ème cycle)	7499	144	1 810 200
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-50)	7807	288	1 088 939
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-300)	7582	177	1 644 904
N_{f} II/III (φ)	32,31	3	2 516 438
N_{f} II/III (écart ext#1 >25%)	25	3074	2 456 333
N_{f} II/III (écart ext#2 >25%)	25	3088	2 526 456
N_{f} II/III (écart ext#3 >25%)	25	3084	2 506 423

SYNTHÈSE FATIGUE

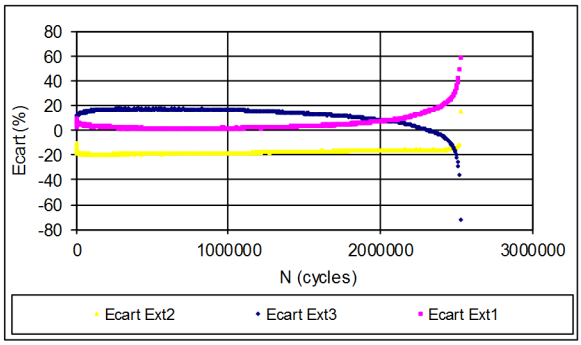
$IE_{0}I$ (MPa) :	**14999**
$IE_{0/2}I$ (MPa) :	**7499**
Perte de E* finale :	62%

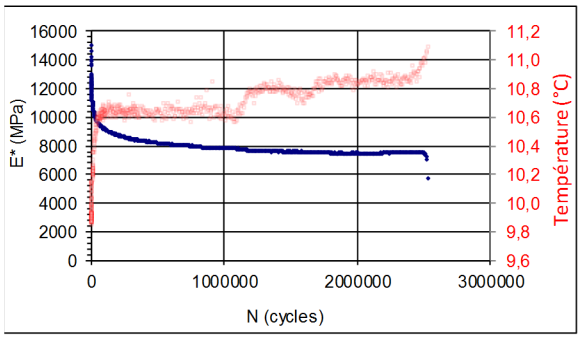
Fréquence (Hz):	10
Tº essai (ºC) :	10,57
ε réel (µdef):	117,21

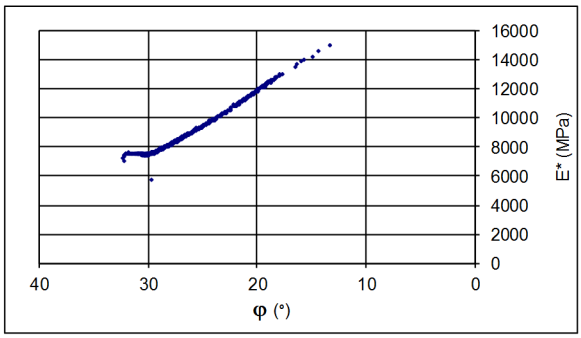
LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

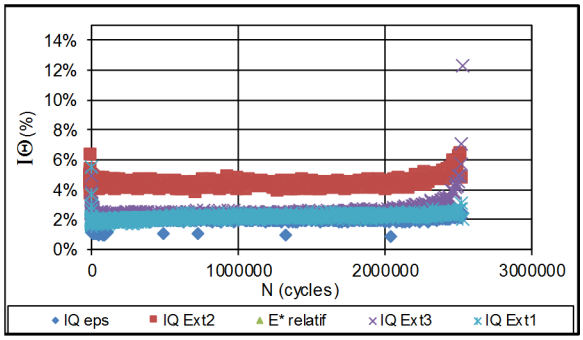
RÉSULTATS GRAPHIQUES - ESSAI DE FATIGUE 1/2

Presse de sollicitation:	MTS 810
Date début essai:	29 novembre 2016
Opérateur:	Kakpo Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette N°:	E1-MB1
Diamètre (mm):	74,08
Hauteur (mm):	127,57
Vi(%):	1,86
Fréquence (Hz):	10
T° cible (°C):	10
ε cible (µdef):	120









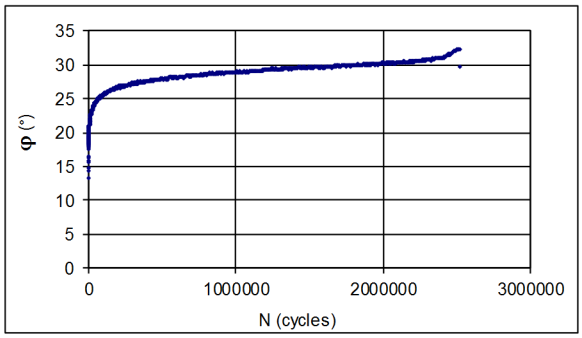


Figure-A V-9 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C2-MB1 page 1

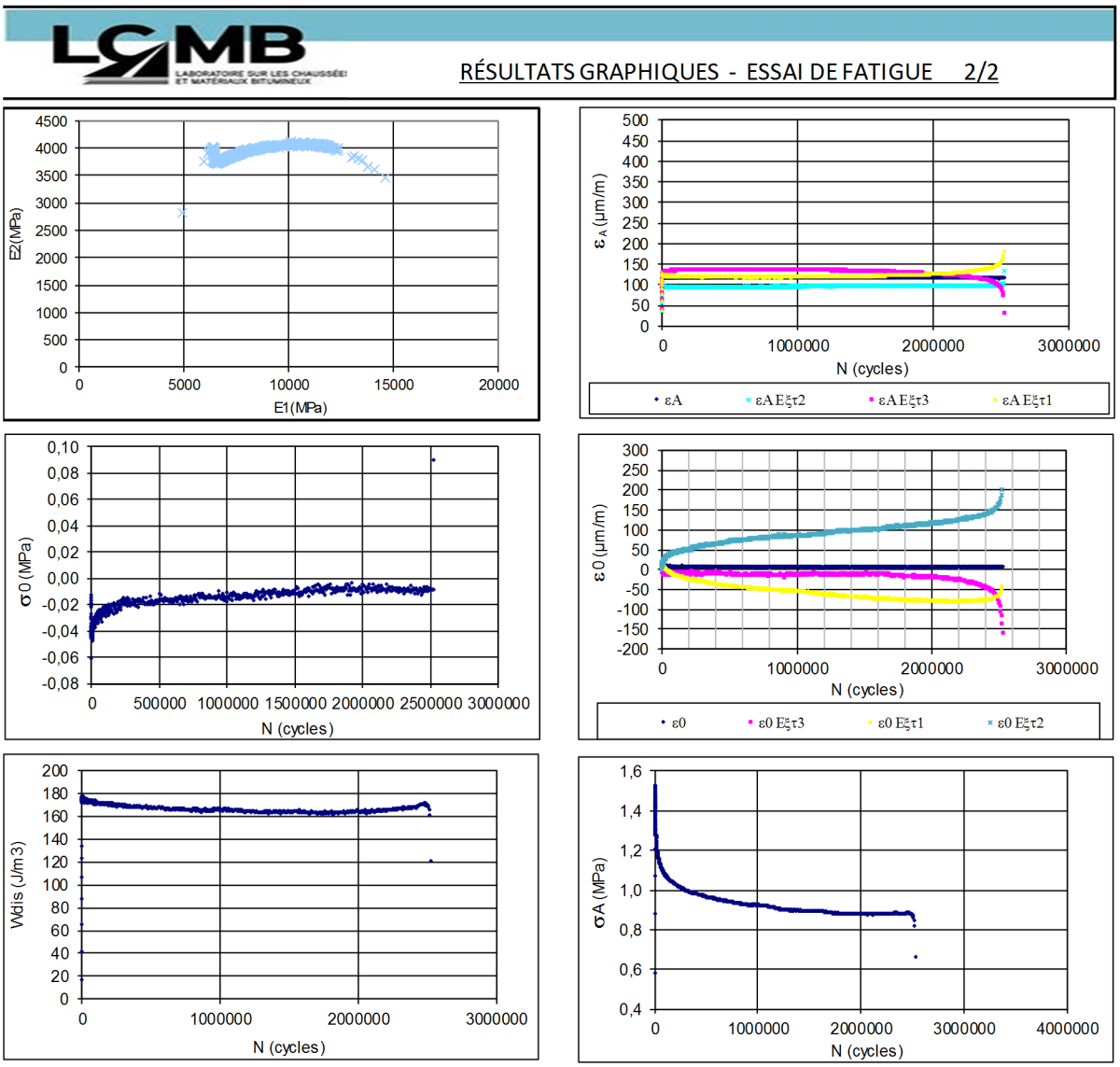


Figure-A V-10 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C2-MB1 page 2

Tableau-A V-6 Synthèse des résultats de fatigue de l'éprouvette C2-MB2

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

INFORMATION GÉNÉRALES - ESSAI DE FATIGUE

Presse de sollicitation:	Bionix 858
Date / heure:	2017-03-31
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP 14 - Verre
Éprouvette Nº:	C2-MB2
Diamètre (mm):	74,08
Hauteur (mm):	128,78
Vi(%):	1,54
Fréquence (Hz):	10
Tº cible (ºC):	10
ε cible (µdef):	170

RÉSULTATS FATIGUE (N_f)

	ref (E*)	ligne ref (E*)	**Cycles**
$N_{f\,25\%}$	10764	267	773
$N_{f\,30\%}$	10046	230	1 763
$Nf_{50\%}$ (6ème cycle)	7176	151	32 285
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-50)	7235	152	31 277
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-300)	7209	152	31 277
N_f II/III (φ)	29,46	92	91 742
N_f II/III (écart ext#1 >25%)	25	2855	2 398
N_f II/III (écart ext#2 >25%)	25	2852	1 922
N_f II/III (écart ext#3 >25%)	25	2779	0

SYNTHÈSE FATIGUE

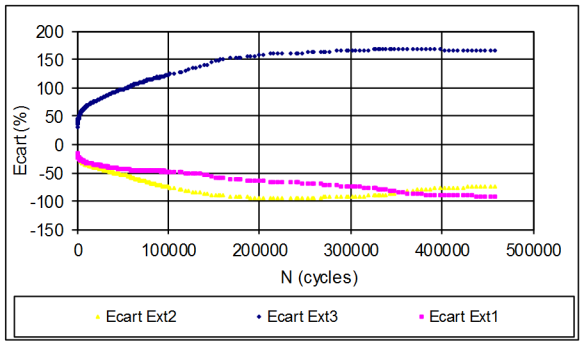
IE_oI (MPa) :	**14352**
$IE_{o/2}I$ (MPa) :	**7176**
Perte de E* finale :	86%

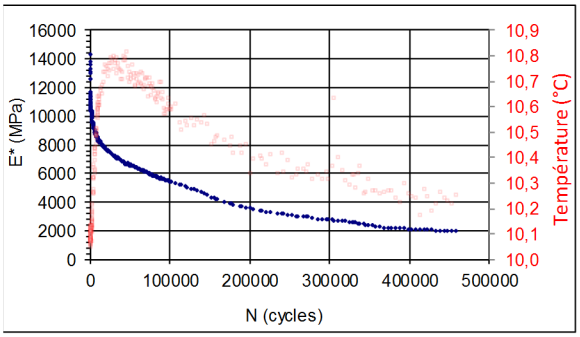
Fréquence (Hz):	10
Tº essai (ºC) :	10,45
ε réel (µdef):	167,32

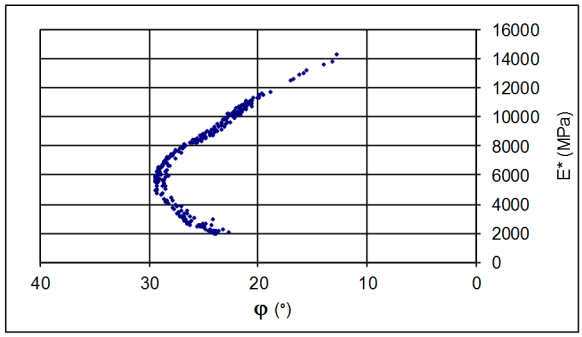
LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

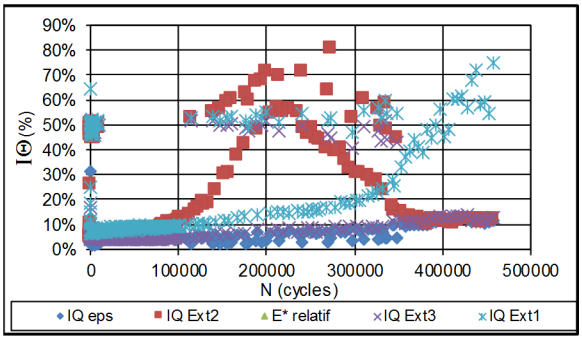
RÉSULTATS GRAPHIQUES - ESSAI DE FATIGUE 1/2

Presse de sollicitation:	Bionix 858
Date début essai:	31 mars 2017
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP 14 - Verre
Éprouvette N°:	E1-MB2
Diamètre (mm):	74,08
Hauteur (mm):	128,78
Vi(%):	1,54
Fréquence (Hz):	10
T° cible (°C):	10
ε cible (µdef):	170









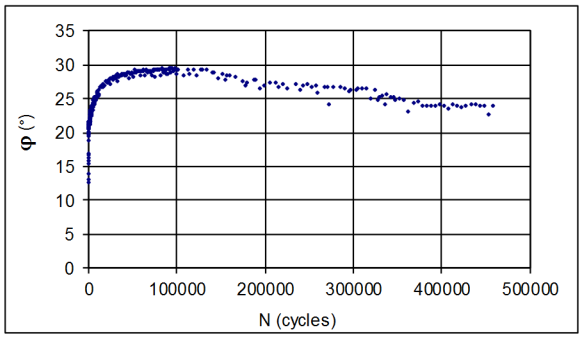


Figure-A V-11 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C2-MB2 page 1

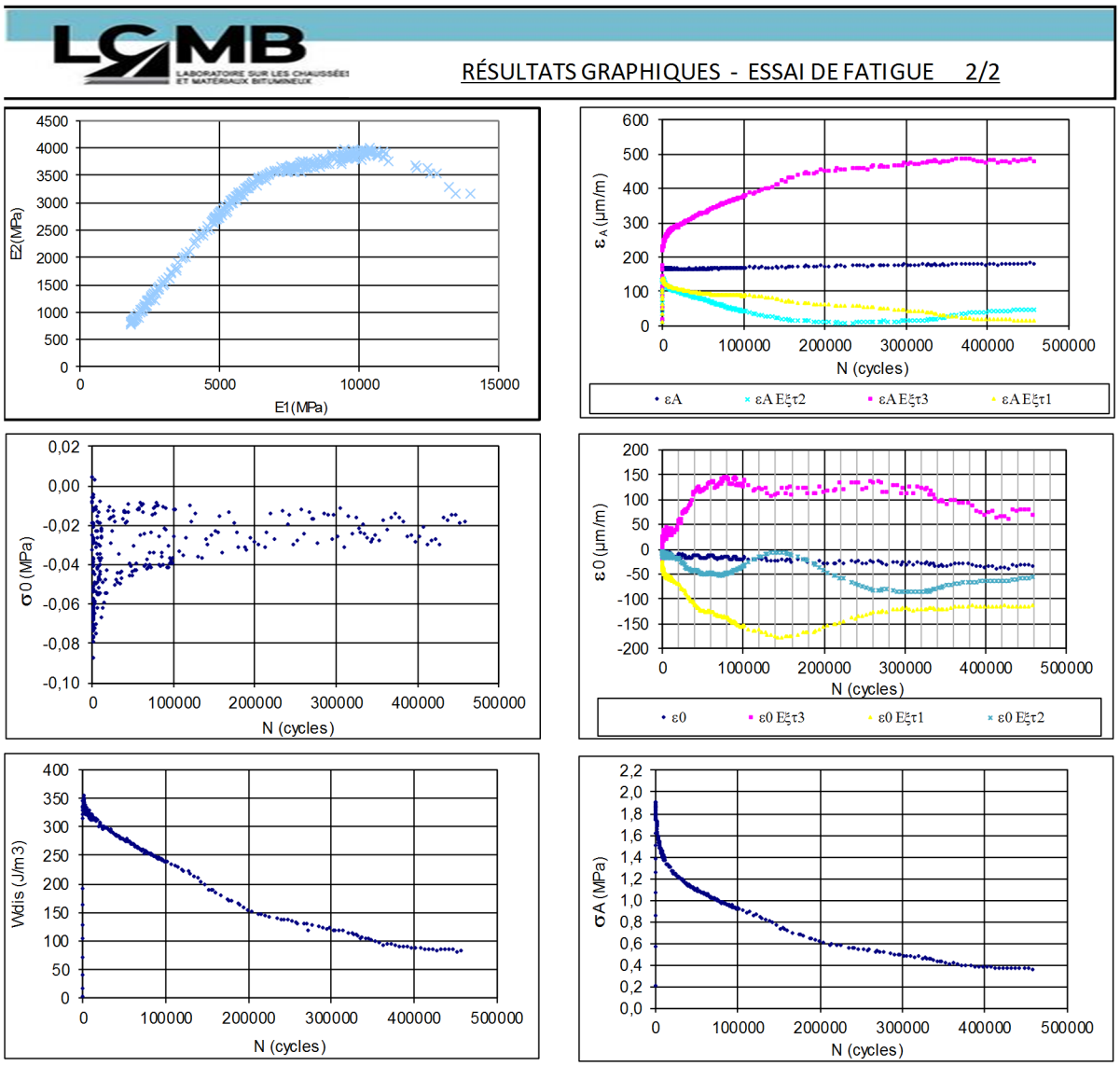


Figure-A V-12 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C2-MB2page 2

Tableau-A V-7 Synthèse des résultats de fatigue de l'éprouvette C2-MB3

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

INFORMATION GÉNÉRALES - ESSAI DE FATIGUE

Presse de sollicitation:	Bionix
Date / heure:	2017-03-08
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette Nº:	C2-MB3
Diamètre (mm):	74,04
Hauteur (mm):	128,21
Vi(%):	2,15
Fréquence (Hz):	10
Tº cible (ºC):	10
ε cible (µdef):	160

RÉSULTATS FATIGUE (N_f)

	ref (E*)	ligne ref (E*)	**Cycles**
$N_{f\,25\%}$	9604	394	1 220
$N_{f\,30\%}$	8964	365	3 789
$Nf_{50\%}$ (6ème cycle)	6403	199	219 628
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-50)	6455	202	202 077
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-300)	6433	199	219 628

N_f II/III (φ)	35,48	6	1 143 750
N_f II/III (écart ext#1 >25%)	25	3084	1 148 758
N_f II/III (écart ext#2 >25%)	25	3068	1 068 631
N_f II/III (écart ext#3 >25%)	25	3077	1 113 701

SYNTHÈSE FATIGUE

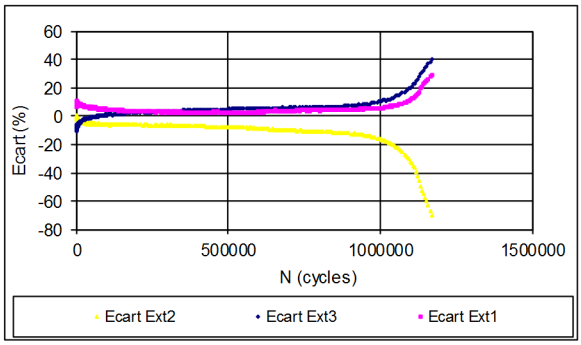
$|E_0|$ (MPa) :	**12806**
$|E_{0/2}|$ (MPa) :	**6403**
Perte de E* finale :	67%

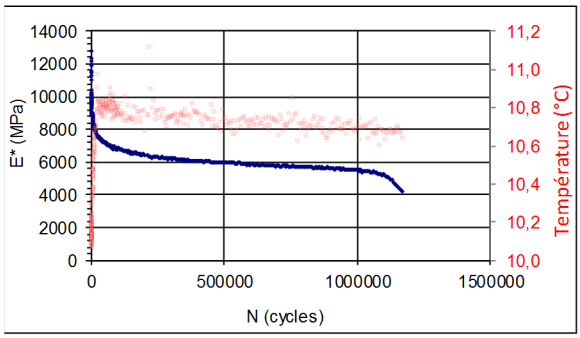
Fréquence (Hz):	10
Tº essai (ºC) :	10,61
ε réel (µdef):	153,41

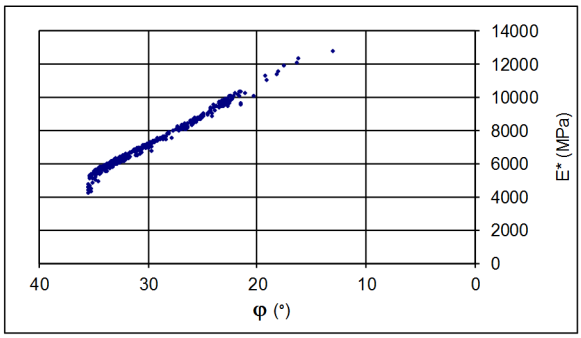
LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

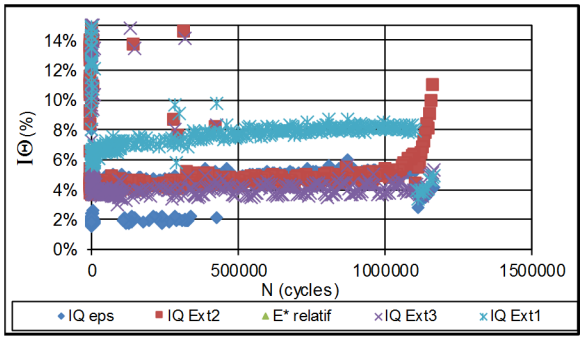
RÉSULTATS GRAPHIQUES - ESSAI DE FATIGUE 1/2

Presse de sollicitation:	Bionix
Date début essai:	8 mars 2017
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette N°:	E1-MB3
Diamètre (mm):	74,04
Hauteur (mm):	128,21
Vi(%):	2,15
Fréquence (Hz):	10
T° cible (°C):	10
ε cible (µdef):	160









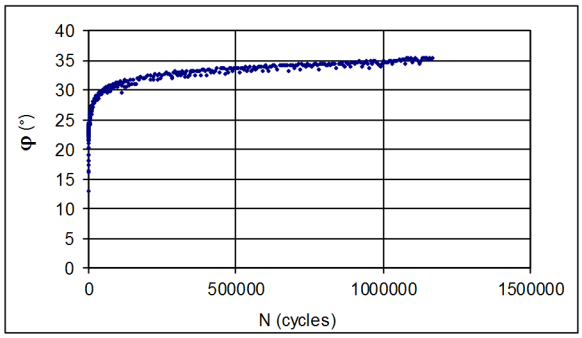


Figure-A V-13 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C2-MB3 page 1

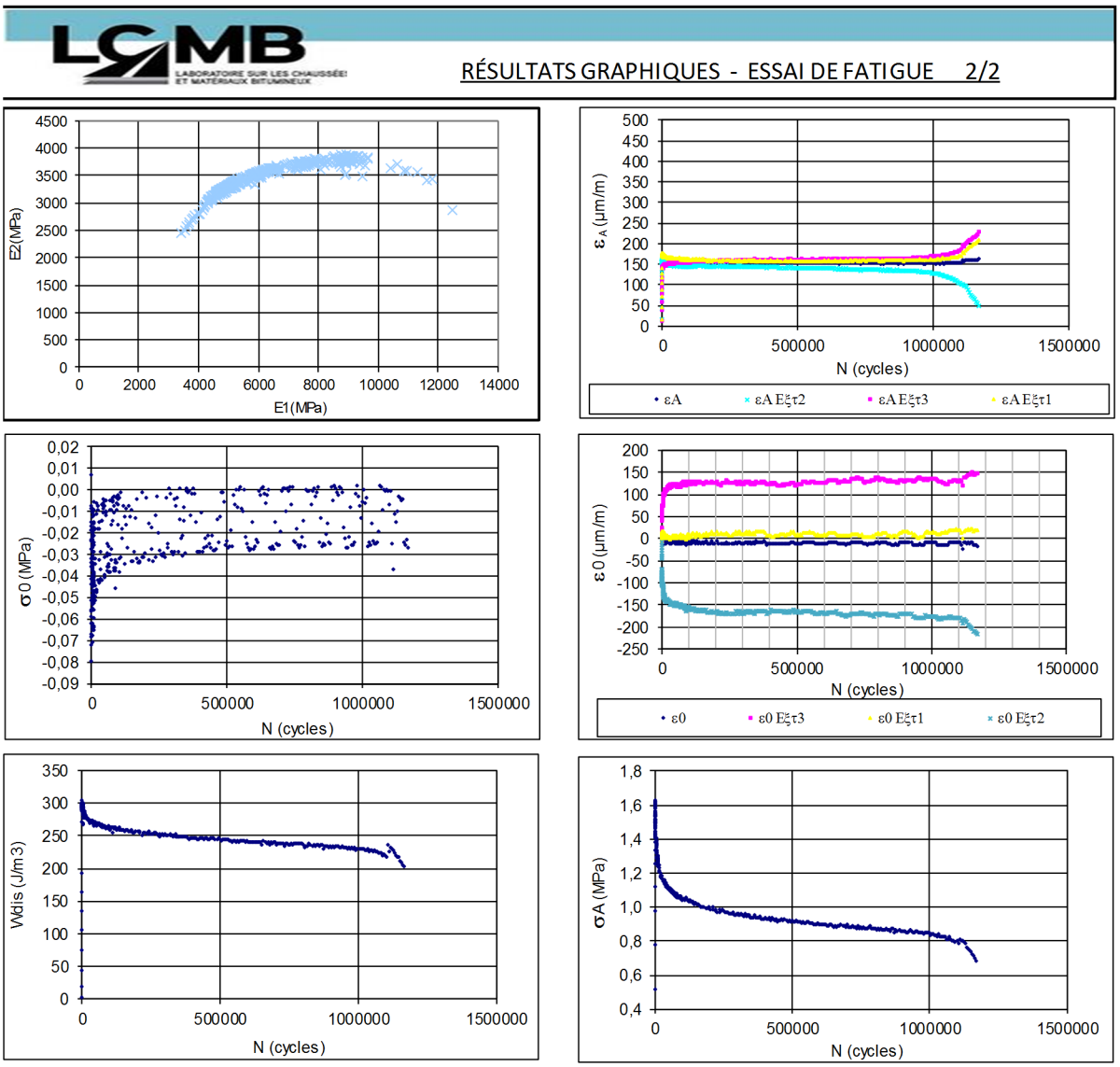


Figure-A V-14 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C2-MB3 page 2

Tableau-A V-8 Synthèse des résultats de fatigue de l'éprouvette C2-MB4

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

INFORMATION GÉNÉRALES - ESSAI DE FATIGUE

Presse de sollicitation:	Bionix
Date / heure:	2017-01-26
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette Nº:	C2-MB4
Diamètre (mm):	74,16
Hauteur (mm):	125,42
Vi(%):	1,71
Fréquence (Hz):	10
Tº cible (ºC):	10
ε cible (µdef):	140

RÉSULTATS FATIGUE (N_f)

	ref (E*)	ligne ref (E*)	**Cycles**
$N_{f\,25\%}$	9900	857	2 388
$N_{f\,30\%}$	9240	829	6 981
$Nf_{50\%}$ (6ème cycle)	6600	570	678 075
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-50)	6650	576	648 030
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-300)	6627	572	668 062
$N_{f\,II/III}$ (φ)	34,03	203	2 671 187
$N_{f\,II/III}$ (écart ext#1 >25%)	25	2723	4 023 305
$N_{f\,II/III}$ (écart ext#2 >25%)	25	2784	2 540 986
$N_{f\,II/III}$ (écart ext#3 >25%)	25	2301	197 078

SYNTHÈSE FATIGUE

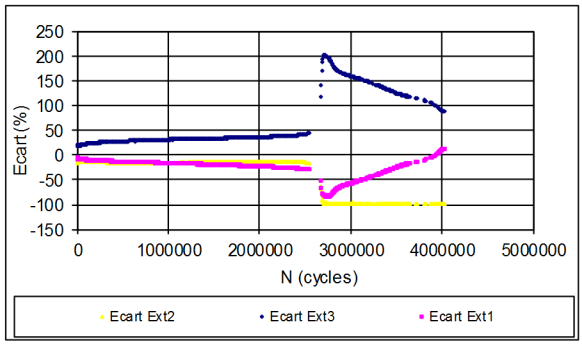
$|E_0|$ (MPa) :	**13200**
$|E_{0/2}|$ (MPa) :	**6600**
Perte de E* finale :	96%

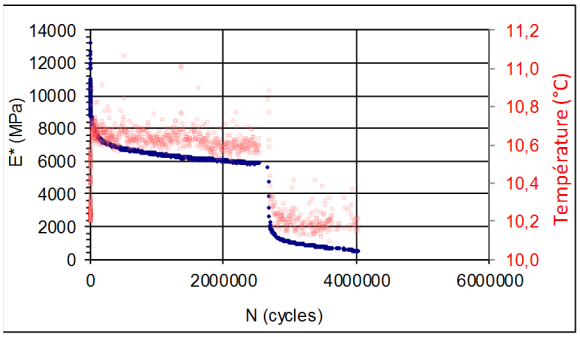
Fréquence (Hz):	10
Tº essai (ºC) :	10,52
ε réel (µdef):	138,77

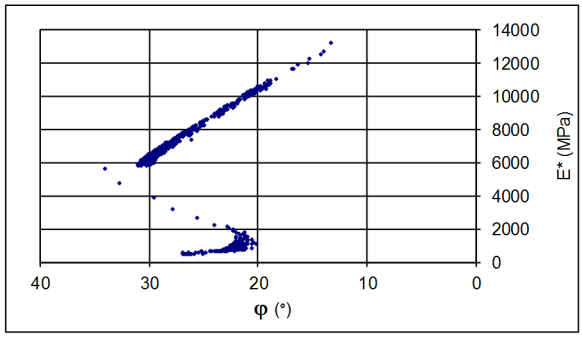
LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

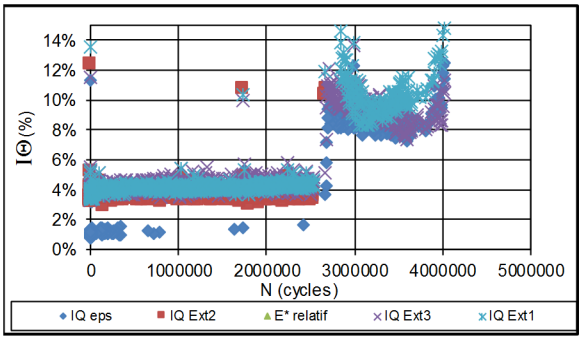
RÉSULTATS GRAPHIQUES - ESSAI DE FATIGUE 1/2

Presse de sollicitation:	Bionix
Date début essai:	26 janvier 2017
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP14-Verre
Éprouvette N°:	E1-MB4
Diamètre (mm):	74,16
Hauteur (mm):	125,42
Vi(%):	1,71
Fréquence (Hz):	10
T° cible (°C):	10
ε cible (µdef):	140









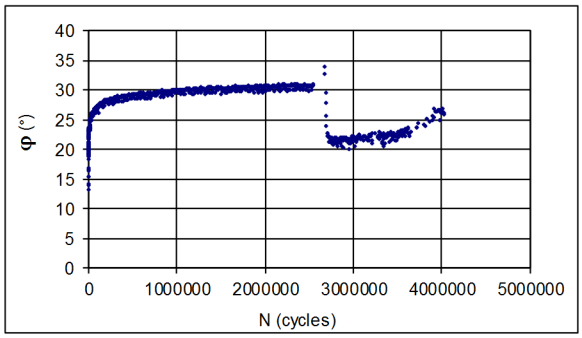


Figure-A V-15 Résultats de la fatigue de l'éprouvette C2-MB4 page 1

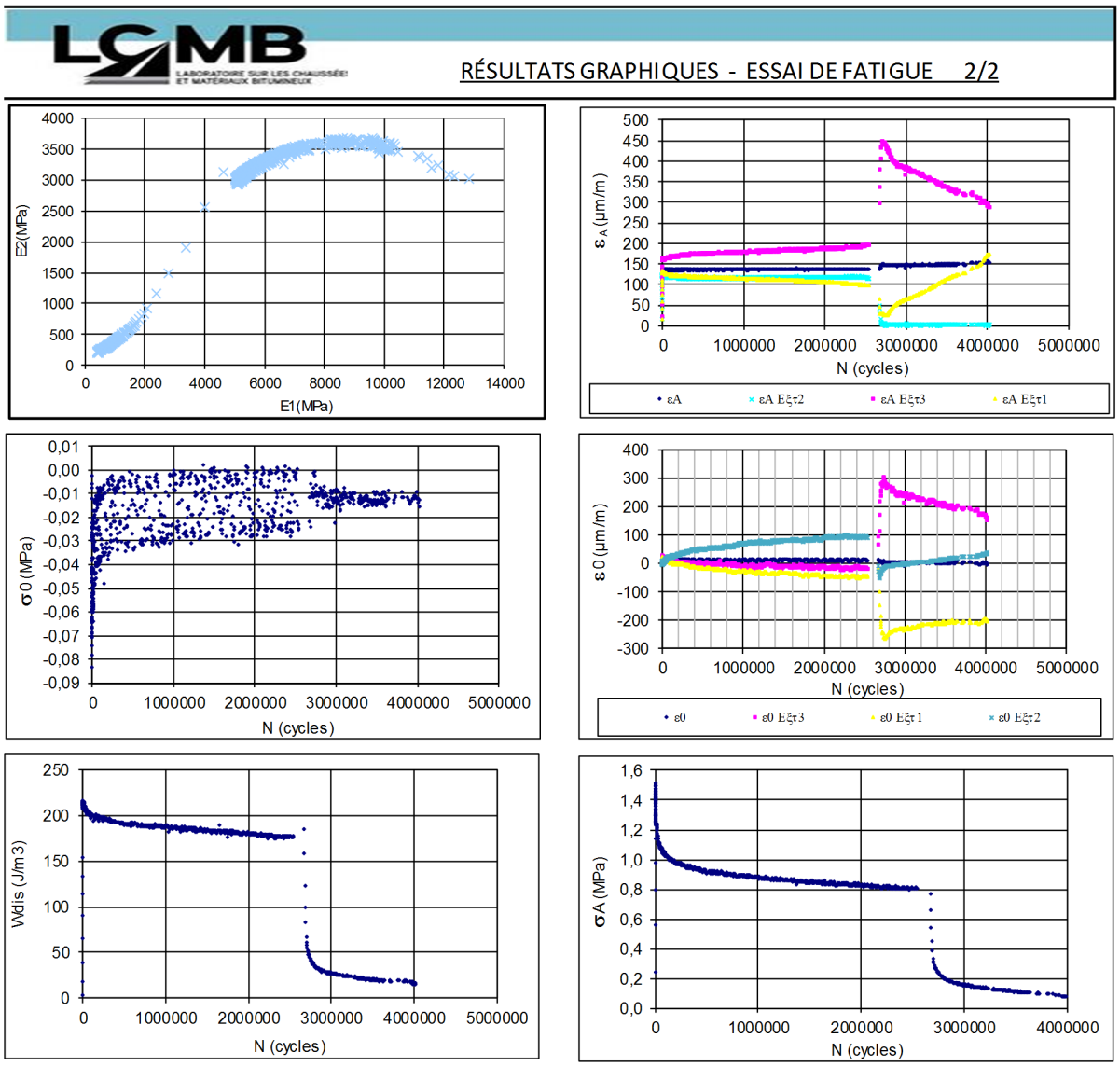


Figure-A V-16 Résultats de la fatue de l'éprouvette C2-MB4 page 2

ANNEXE VI

RÉSULTATS DES ESSAIS D'EXTRACTION AU LABORATOIRE DJL

DJL

Laboratoire
St-Patrick, Montréal

ENROBÉS
COMPILATION D'ANALYSE
E1

Échantillon				Granulométrie (% passant)												T.G.	bit.	bit. abs.	bit.	Fbe	VAM	VCB	Densité		vide	PCG		
				tamis en mm							tamis en µm																	
Numéro	Date jj/mm/aa	Tonnage cum.	Heure hh:mm		28	20	14	10	5	2,5	1,25	630	315	160	80		%	%	T.G.	µm	%	%	brute	max.	%	Nb girations 10	100	200
1678345	2016-06-28	E1-MB2			100	100	91	43	33,0	31	31	25	16	12	10,1	392	4,10		1,05									
1678346	2016-06-28	E1-MB3			100	100	96	43	34,6	33	32	26	17	13	11,0	405	4,12		1,02									
MOYENNE					100	100	94	43	34	32	31	25	17	12	10,6	399	4,11		1,04									
FORMULE					100	100	90	35	27	26	26	22	14	10	8,4	358	3,80	0,02	1,06	0,22				2,525				
ÉCARTS					0	0	4	8	7	6	5	3	3	2	2,2	41	0,31		-0,02									
MINIMUM																										11,0	4,0	2,0
MAXIMUM																											7,0	

DJL

Laboratoire
St-Patrick, Montréal

ENROBÉS
COMPILATION D'ANALYSE
E2

Échantillon				Granulométrie (% passant)												T.G.	bit.	bit. abs.	bit.	Fbe	VAM	VCB	Densité		vide	PCG		
				tamis en mm								tamis en µm														Nb girations		
Numéro	Date jj/mm/aa	Tonnage cum.	Heure hh:mm		28	20	14	10	5	2,5	1,25	630	315	160	80		%	%	T.G.	µm	%	%	brute	max.	%	10	100	200
1678347	2016-06-28	E2-MB2			100	100	94	41	33,8	32	32	26	14	8	6,8	388	3,97		1,02									
1678348	2016-06-28	E2-MB3			100	100	96	43	33,3	32	31	26	14	8	6,4	389	4,00		1,03									
MOYENNE					100	100	95	42	34	32	32	26	14	8	6,6	389	3,99		1,03									
FORMULE					100	100	90	35	27	26	26	22	14	10	8,4	358	3,80	0,02	1,06	0,22				2,525				
ÉCARTS					0	0	5	7	7	6	6	4	0	-2	-1,8	31	0,19		-0,04									
MINIMUM																										11,0	4,0	2,0
MAXIMUM																											7,0	

Laboratoire
Jarry, Montréal

D. brute

ENROBÉS
COMPILATION D'ANALYSE

Échantillon				Granulométrie (% passant)												T.G.	bit.	bit. abs.	bit.	Fbe	VAM	VCB	Densité		vide	PCG		
				tamis en mm							tamis en µm															Nb girations		
Numéro	Date jj/mm/aa	Tonnage cum.	Heure hh:mm		28	20	14	10	5	2,5	1,25	630	315	160	80		%	%	T.G.	µm	%	%	brute	max.	%	10	100	200
E2MB1	2016-06-20	C3-E2			100	100	93	40	31	30	30	24	13	8	6,5	376	3,44		0,91	#####								
E2MB4	2016-06-20	C3-E2			100	100	93	44	34	32	32	26	14	8	6,8	390	3,61		0,93	#####								
E1MB1	2016-06-20	C2-E1			100	100	94	45	33	32	31	25	16	11	9,7	397	3,91		0,99	#####								
E1MB4	2016-06-20	C2-E1			100	100	93	43	34	32	32	26	16	12	10,4	398	4,31		1,08	#####								
MOYENNE					100	100	93	43	33	32	31	25	15	10	8,4	390	3,82		0,98	#####								
FORMULE																												
ÉCARTS																												
MINIMUM																												
MAXIMUM																												

ANNEXE VII

RÉSULTATS DES ESSAIS D'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Tableau-A VII-1 Résultats des essais analyse granulométrique des mélanges C2 et C3

Tamis	Formule cible	C2-B8	C2-Pl. B1	C2-Pl. B2	C2-MB1	C2-MB2	C2-MB3	C2-MB4	C3-B6	C3-Pl. C1	C3-Pl. C2	C3-MB1	C3-MB2	C3-MB3	C3-MB4
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
14	91	95	91	96	93	91	92	92	95	93	93	92,2	93,8	94,4	93
10	34	47	46	48	46	46	47	46	47	47	47	45,3	50,1	49,9	47,5
5	27	35	34	35	36	35	35	35	36	35	35	35,5	36,7	37,3	35,7
2,5	26	34	33	33	34	34	33	34	34	34	34	33,9	35,1	35,5	34,2
1,25	26	32	32	32	33	32	32	33	33	32	32	32,9	34,1	34,3	33,1
0,63	22	26	26	26	27	26	26	26	27	26	26	26,3	27,5	27,4	26,7
0,315	13	17	17	17	17	17	17	17	14	14	14	14,5	15,1	15,1	14,7
0,16	10,6	14	14	14	14	14	14	14	10	10	10	9,8	10,2	10,2	9,9
0,08	10,1	11,7	11,9	12	11,8	11,9	11,9	12	7,7	7,9	7,8	7,8	8,1	8,1	7,9

ANNEXE VIII

RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE ET DE FATIGUE DE L'EBHP 14 – LAB

Tableau-A VIII-1 Paramètres de calage du modèle 2S2P1D de l'EBHP 14 – Lab

T_{ref} = 10 °C	E^*							C_1	C_2
	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ_E (s)	β		
EBHP 14	300	45000	0,15	0,46	2,20	0,1	3500	39	246

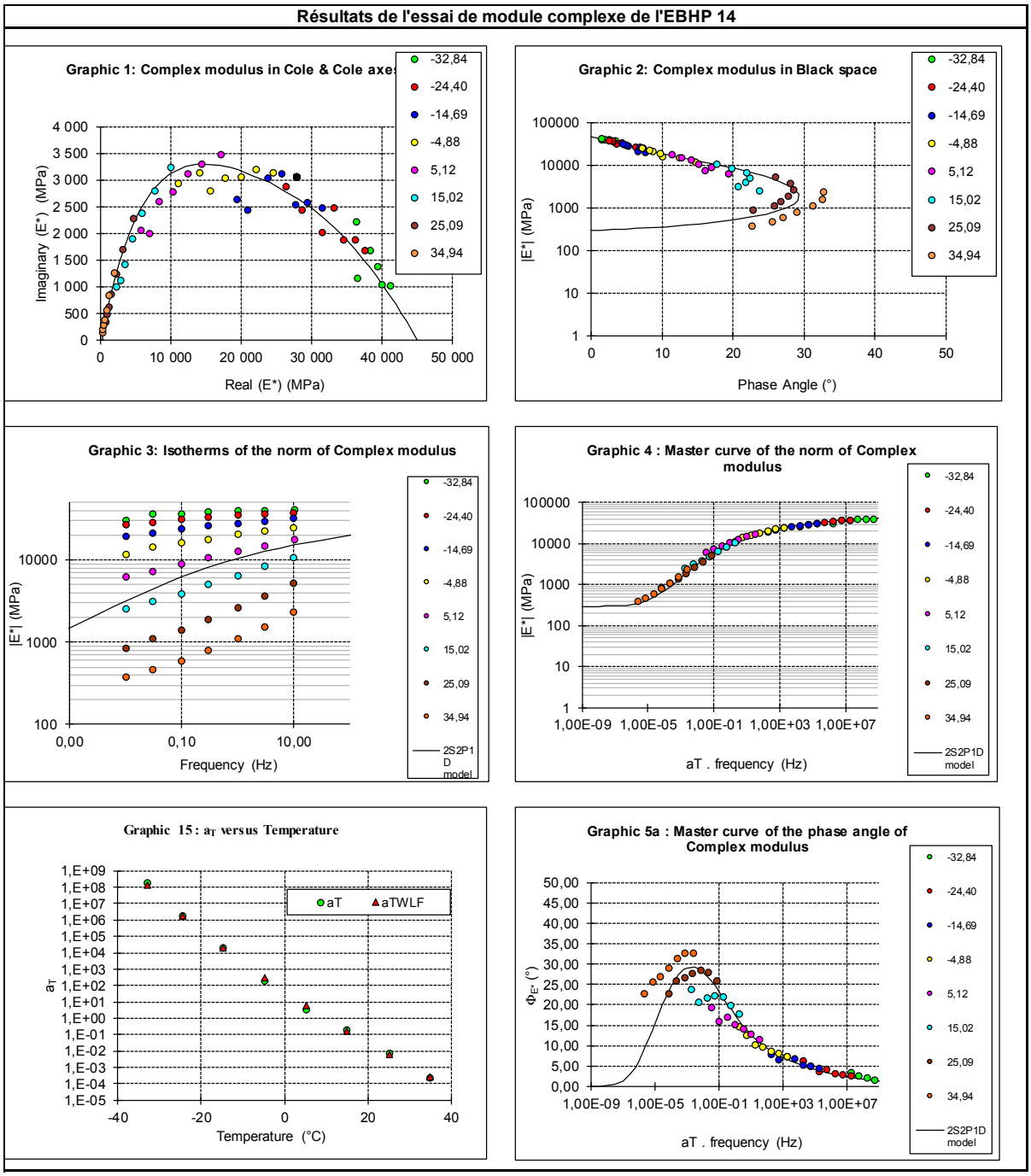


Figure-A VIII-1 Résultats de module complexe de l'EBHP 14

Tableau-A VIII-2 Synthèse des résultats de fatigue de l'EBHP 14

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

INFORMATION GÉNÉRALES - ESSAI DE FATIGUE

Presse de sollicitation:	Bionix
Date / heure:	2017-04-04
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP 14
Éprouvette Nº:	1
Diamètre (mm):	74,20
Hauteur (mm):	130,64
Vi(%):	1,78
Fréquence (Hz):	10
Tº cible (ºC):	10
ε cible (µdef):	150

RÉSULTATS FATIGUE (N_f)

	ref (E*)	ligne ref (E*)	**Cycles**
$N_{f\,25\%}$	10308	1204	423
$N_{f\,30\%}$	9621	1173	1 136
$Nf_{50\%}$ (6ème cycle)	6872	1003	101 817
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-50)	6988	1027	77 628
$Nf_{50\%}$ (E* cycles 1-300)	6910	1019	85 689
N_f II/III (ϕ)	36,58	62	4 724 417
N_f II/III (écart ext#1 >25%)	25	3088	5 039 912
N_f II/III (écart ext#2 >25%)	25	3088	5 039 912
N_f II/III (écart ext#3 >25%)	25	3088	5 039 912

SYNTHÈSE FATIGUE

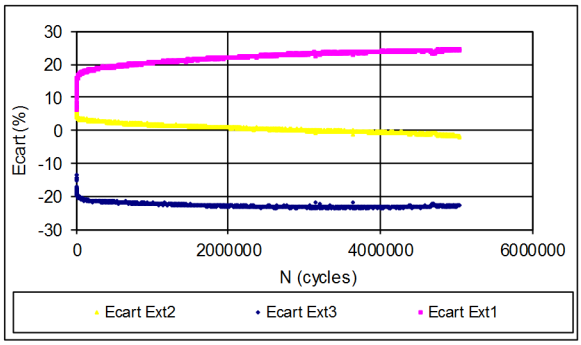
IE_0I (MPa) :	**13744**
$IE_{0/2}I$ (MPa) :	**6872**
Perte de E* finale :	64%

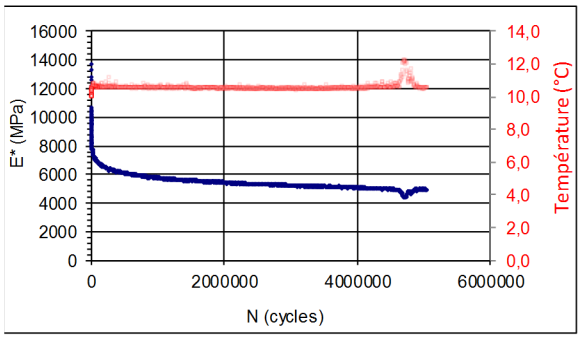
Fréquence (Hz):	10
Tº essai (ºC) :	10,56
ε réel (µdef):	143,42

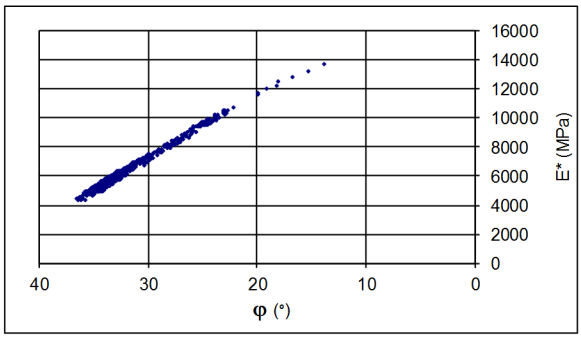
LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATÉRIAUX BITUMINEUX

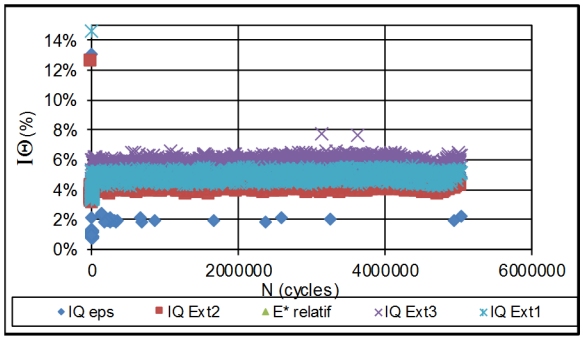
RÉSULTATS GRAPHIQUES - ESSAI DE FATIGUE 1/2

Presse de sollicitation:	0
Date début essai:	4 avril 2017
Opérateur:	Theophile
DONNÉES CIBLES	
Type d'enrobé:	EBHP 14
Éprouvette N°:	1
Diamètre (mm):	74,2
Hauteur (mm):	130,64
Vi(%):	1,78
Fréquence (Hz):	10
T° cible (°C):	10
ε cible (µdef):	150









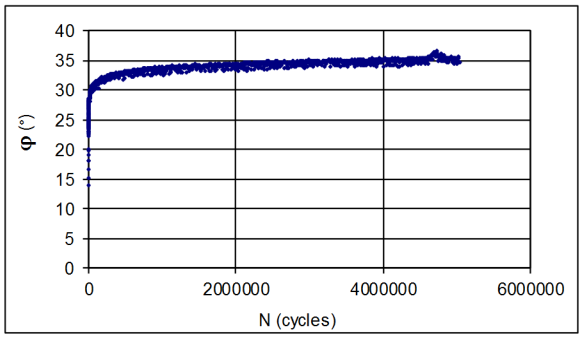


Figure-A VIII-2 Résultats de l'essai de fatigue de l'éprouvette de l'EBHP 14 page 1

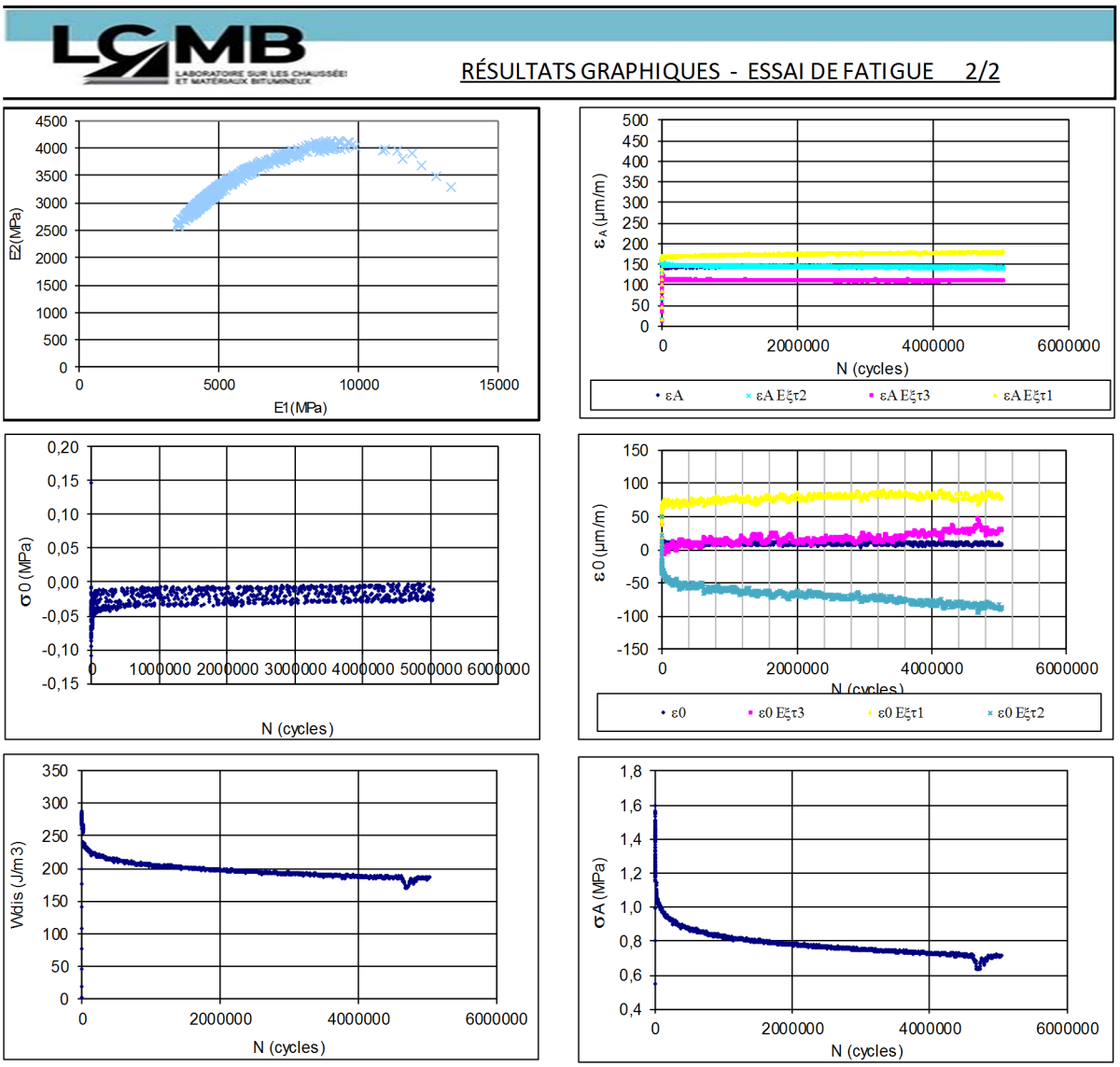


Figure-A VIII-3 Résultats de l'essai de fatigue de l'éprouvette de l'EBHP 14 page 2

ANNEXE IX

FICHE TECHNIQUE DES GRANULATS DE CALIBRE 10 – 14

2016-11-18

DJL

RAPPORT D'ANALYSE DE GRANULATS
Carrière St-Philippe

Téléphone: (450)653-2423
Télécopieur: (450)653-8877

Provenance	:	Construction DJL inc.	Calibre	:	10-14 mm
Localisation	:	St-Philippe de Laprairie	Usage	:	Enrobé bitumineux
Type de granulat	:	Pierre concassée	Éch.	:	n.d. Date: Saison 2016

GRANULOMÉTRIE (LC 21-040)

TAMIS mm	% PASSANT cumulatif	EXIGENCES	TAMIS mm	% PASSANT cumulatif	EXIGENCES
112			10	14	1-20
80			8		
56			6.3	3	0-3
40			5		
31.5			3.15		
28			2.5		
25			1.25		
20	100	100	0.630		
16			0.315		
14	89	80-99	0.160		
12.5	61	25-75	0.080	0,8	0-1.5
Module de finesse (CAN/CSA A23.1):			Propreté (CAN/CSA-A23.2- 5A):		0,6

* Dérogation au fuseau granulométrique

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

DESCRIPTION	MÉTHODES D'ESSAIS	RESULTATS	EXIGENCES	EFFECTUÉ PAR	DATE
CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES					
Micro-Deval (Gros granulats)	LC 21-070	14% (grade C)	<15%	CTNA - Brossard	11 04 2016
Abrasion Los Angeles	LC 21-400	22% (grade B2)	<35%	CTNA - Brossard	20 01 2016
Règle de compensation (MD + LA)		36,0%		CTNA - Brossard	11 04 2016
Micro-Deval (Granulats Fins)	LC 21-101				
Indice de Friabilité	LC 21-080				
CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION					
% Fragmentation	LC 21-100	100%		DJL - Carignan	23 03 2016
% Particules Plates	LC 21-265	19,9%	<25%	DJL - Carignan	23 03 2016
% Particules Allongées	LC 21-265	23,1%	<40%	DJL - Carignan	23 03 2016
Coefficient d'écoulement	LC 21-075				
CARACTÉRISTIQUES COMPLÉMENTAIRES					
Absorption en eau (%)	LC 21-065-066-067	0,75%		DJL - Carignan	29 03 2016
Coefficient Polissage Projection (CPP)	LC 21-102				
Indice colorimétrique	CAN/CSA A23.2-7A				
Densité relative (app)	LC 21-065-066-067	2,767		DJL - Carignan	29 03 2016
Densité relative (sec)	LC 21-065-066-067	2,711		DJL - Carignan	29 03 2016
Densité relative (sss)	LC 21-065-066-067	2,731		DJL - Carignan	29 03 2016
Durabilité MgSO4	BNQ 2560-450				
Masse non-tassée	BNQ 2560-060	1414,4 kg/m³		DJL - Carignan	22 03 2016
Masse tassée	BNQ 2560-060	1586,1 kg/m³		DJL - Carignan	22 03 2016
Matières organiques	LC 31-228				
Mottes d'argile et particules friables	CAN/CSA A23.2-3A				
Nombre pétrographique	BNQ 2560-900				
Particules légères	CAN/CSA A23.2-4A				
Proctor modifié	BNQ 2501-255				
Réact. alcalis-granulat (prisme:1 an)	CSA A23.2-14A				
Réact. alcalis-granulat (mortier:14 j.)	CSA A23.2-25A				
Valeur au bleu	LC 21-255				
Teneur particules inférieures à 5µm	NQ 2501-025				
Potentiel de gonflement: pyrite	CTQ-M100				

REMARQUE:

Préparé par: Daniel Garrett, tech. Approuvé par: Daniel Garrett, Resp. technique Date: 30 03 2016

P3-10 .xls (Révision: 02-2002) 2016-11-07

ANNEXE X

ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME PG 76 -28 THRD

BITUME PG - ATTESTATION DE CONFORMITÉ
(AASHTO M 320)

INFORMATIONS GÉNÉRALES	
Distributeur et lieu d'entreposage et de spédition Bitumar Inc 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4	
Fabricant et lieu de fabrication Bitumar Inc 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4	
Classe de bitume PG 76-28 THRD	Nom commercial PG 76-28 THRD
N° de lot 157628THRD-09	Date de fabrication 03/11/2015

RECOMMANDATIONS - TEMPÉRATURE D'UTILISATION	Minimale	Maximale
Entreposage	146	175
Malaxage	156	170
Malaxage tiède	154	168

ESSAIS DE CARACTÉRISATION	
Date des essais de caractérisation	05/11/2015
Masse volumique (g/cm³), à 25°C, AASHTO T228	1.018
Masse volumique (g/cm³), à 15°C, AASHTO T228	1.024
Viscosité Brookfield (Pa-s), à 135°C, AASHTO T316	1.708
Viscosité Brookfield (Pa-s), à 165°C, AASHTO T316	0.426
Stabilité au stockage (°C) LC 25-003	0.3
TBA moyenne (°C)	72.0
Recouvrance d'élasticité (%) à 10°C, LC 25-005	76.5
Teneur en cendres (%)	0.22
Variation de masse au RTFOT (%)	-0.595
Température élevée de caractérisation Te(°C)	79.7
Température basse de caractérisation Tb(°C)	-33.7
Module de rigidité So (60) (MPa)	53.7
Pente de mo (60)	0.474
Enrobé résiduel (%) (LC25-003)	96

MSCR (AASHTO TP70)	
Recouvrance d'élasticité à 3,2 kPa, R3,2 (%) à 64°C	77.13
Compliance non recouvrable à 3,2 kPa, Jnr3,2 (kPa-1) à 64°C	0.25
Compliance non recouvrable différentielle, Jnrdiff (%) à 64°C	16.6

ESSAIS DE CONTRÔLE	
Date des essais de contrôle	05/11/2015
G*/sin (δ), bitume d'origine à 76 °C (kPa)	1.36
Température élevée de caractérisation Te(°C)	79.7
Module de rigidité Sc (60) (MPa)	53.7
Pente de mc (60)	0.474
Recouvrance d'élasticité (%) à 10°C, LC 25-005	76.5

NOTES

Ce produit doit être entreposé dans un réservoir vide ou contenant le même grade fournis par Bitumar inc. Si ce n'est pas le cas, il est de votre responsabilité de prendre les mesures nécessaires pour confirmer la caractérisation du produit.

Peu importe les recommendations du fournisseur, L'entrepreneur doit respecter les documents contractuels.

REMARQUES

* Selon les viscosités, les températures de malaxage à chaud devraient être 184-198 °C.
Avec l'additive tiède, on recommande les températures de malaxage à 154-168 °C.

Signé par: Hua Qin Liu

Date 05/11/2015

F-PB-07.2 R0

BIBLIOGRAPHIE

Absamad, EL. 2006. « Développement d'une méthode de prédiction des déformations de surface des chaussées à assises non traitées ». Université de Limoges.

Agal, Tarek. 2005. « Développement d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées pour la Ville de Montréal ». Mémoire de maîtrise électronique. Montréal, École de Téchnologie Supérieure, 224 p. < http://espace.etsmtl.ca/345/ >.

Aim, R Ben, et P Le Goff. 1968. « Effet de paroi dans les empilements désordonnés de sphères et application à la porosité de mélanges binaires ». *Powder Technology,* vol. 1, nº 5, p. 281-290.

Ali, Bassem, Marwan Sadek et Isam Shahrour. 2008. « Modélisation numérique de l'orniérage: Application aux voiries urbaines ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering,* vol. 12, nº 9-10, p. 1165-1180.

Baaj, Hassan. 2002. « Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés ». *INSA Lyon*.

Barco, César. 2007. « Influence de la température de compactage des plaques d'enrobés sur la résistance à l'orniérage ». École de technologie supérieure.

Baron, J. 1982. « Les principes de composition du béton de porosité minimale ». *Le béton hydraulique, connaissance et pratique»*.

Bérubé, Marc-André, et Michel Paradis. 1997. *Influence de la fraction de sable (80um-2,5mm) des granulats et du filler minéral sur la résistance à l'orniérage des chaussées routières* (1997). Quebec: Le Ministère des transports.

Bitume Québec. 2008. « Guide de bonnes pratiques: La mise en oeuvre des enrobés ». *Bibliothèque et archives Canada*.

BNQ, Bureau de normalisation du Québec. 2014. *Travaux de génie civil : granulats* (2014), Deuxième édition. Québec: Bureau de normalisation du Québec, 69 pages p.

Caron, Jean-Michel. 2015. « Étude de formulations en vue de maximiser le module d'un enrobé bitumineux à squelette granulaire optimisé au niveau de ses contacts gros-sur-gros ». Mémoire de maîtrise électronique. Montréal, École de technologie supérieure, 240 p. < http://espace.etsmtl.ca/1532/ >.

Carter, Alan, et Daniel Perraton. 2002. « La mesure du module complexe des enrobés bitumineux ». In *2e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil*. p. 10.

Cholloux, Shara. 2015. *Étude de la variabilité et de la reproductibilité de quatre enrobés bitumineux incorporant des scories d'acier*. Rapport de projet de maîtrise. Montréal: École de technologie supérieure, 156 p.

Di Benedetto, H. 1998. « Modélisation: écart entre état des connaissances et applications ». *Journée LAVOC: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Septembre, Suisse*.

Di Benedetto, H, et JF Corté. 2005. « Matériaux routiers bitumineux 2 ». *Hermès Lavoisier editions*.

Di Benedetto, Hervè, et JF Corté. 2003. *Matériaux routiers bitumineux 1: description et propriétés des constituants*, 1 ed. Coll. « Mécanique et Ingénierie des Matériaux ». Paris: Hermes Science, 234 p.

Diakité, Ibrahim Soumaïla. 2014. *Caractérisation d'un enrobé bitumineux haute performance et évaluation de son utilisation en couche de base en remplacement d'une grave bitume* (2014). Montréal: École de technologie supérieure, 1 ressource en ligne (xxxiii, 254 pages) p.

DLC, Direction du laboratoire des chaussées. 2006. « Les nouveaux enrobés du MTQ et les chaussées à longue durée de vie ». *Bulletin d'information technique, Québec,* vol. 11, nº 4, p. 2.

Doan, Tu Ho. 1976. « Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC ». *BULL LIAISON LAB PONTS CHAUSS*, nº 84.

Domec, Vincent, Denys Breysse, Chantal de La Roche et Sylvie Yotte. 2005. « Caractérisation de la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux en conditions de «trafic simulé» et de température ». *Revue européenne de génie civil,* vol. 9, nº 3, p. 385-400.

Doucet, Félix, et Bruno Auger. 2010. *Détermination du module complexe des enrobés au ministère des transports du Québec*. Coll. « Direction du Laboratoire des Chaussées ». Québec (Québec), 151 p.

Faure, Michel. 1998. « Routes: Tome 2, 1ère éd ». *Coll.«Les Cours de l'ENTPE». Lyon: Aléas*.

Faure, Michel , et G. Noël. 1981. « Guide pratique de construction routière 28: Matériaux traités aux liants hydrocarbonés à chaud ». *Revue générale des routes et des aérodromes*, nº 576.

Gourier, Orianne. 2009. « Etude du Stone Mastic Asphalt en comparaison avec les enrobés français ». Insa de Strasbourg.

Kpossou, Gillis. 2016. *« Caractérisation des basins de déflexion mesurés au défletomètre à masse tombante »*. Montréal, École de technologie supérieure (Canada), 144 p.

La Roche, Chantal de. 1996. « Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux : expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse ». 1 vol. (217 p.) p. http://www.theses.fr/1996ECAP0580.

Labrie, Michel. 2000. « L'évolution technologique à Transports Québec ». *Journée bitume 2000 : Allocution du directeur de la Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec, Saint-Hyacinthe, Québec (Canada)*.

Lachance Tremblay, Éric. 2014. « Incorporation de particules de verre post-consommation dans un enrobé bitumineux de type ESG14 ». Mémoire de maîtrise électronique. Montréal, École de technologie supérieure, 241 p. < http://espace.etsmtl.ca/1383/ >.

Laldji, Said. 2015. « Les enrobés bitumineux ». *Notes du cours TCHO25 Travaux de génie civil, Montréal : École de technologie supérieure*.

Lamothe, Sebastien. 2003. « Enrobe grenu: Influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roule sur le couple ouvrabilite-ornierage ». M.Ing. Ann Arbor, Ecole de Technologie Superieure (Canada), 169-169 p. p. In ProQuest Dissertations & Theses Global. < http://search.proquest.com/docview/305234439?accountid=27231 >.

Lamothe, Sébastien. 2014. « Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques ». École de technologie supérieure.

Lu, Hewei, Weidong Huang, Kun Li, Liping Liu et Lijun Sun. 2011. « Glasphalt Mixtures' Performance Research and Analysis ». In *Third International Conference on Transportation Engineering (ICTE)*.

Lupien, Claude. 2006. *Projet pilote de valorisation du verre récupéré (non conforme pour le conditionnement) dans la construction de chaussées*. Longueil : Université de Sherbrooke.

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 électronique. Montréal, École de technologie supérieure, 279 p. < http://espace.etsmtl.ca/348/ >.

Meunier, Mathieu. 2012. « Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat électronique. École de technolgie supérieure, 349 p. < http://espace.etsmtl.ca/1095/ >.

Meunier, Mathieu. 2013. « La formulation: Enrobé bitumineux haute performance ». *Présentation technique, École de technologie supérieure, Montréal, Québec (Canada)*.

MTQ. 2009. « Guide technique sur la mise en place des enrobés bitumineux ». *Bibliothèque et Archives nationales du Québec et Bibliothèque et Archives Canada*.

Murillas, Alejandro Quijano. 2010. « Application de méthodes et d'outils mécaniste-empiriques pour la conception et la réhabilitation des chaussées ». Université Laval.

Nguyen, Dang-Truc. 2006. « Prédiction des déformation permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses ». Ecole des Ponts ParisTech.

Nguyen, Mai Lan. 2009. « Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux ». INSA de Lyon.

Noël, Frédéric. 2013. « Les centrales d'enrobage ». *Formation Bitume Québec*.

Olard, F, P Huon, S Dupriet et C Billet. 2010. « Graves-bitume GB5® Une nouvelle gamme d'enrobés à hautes performances pour couches d'assise et de liaison ». *RGRA-Revue Generale des Routes et des Aerodromes*, nº 888, p. 54.

Olard, François. 2003. « Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé ». INSA de Lyon.

Olard, François. 2012. « GB5 mix design: high-performance and cost-effective asphalt concretes by use of gap-graded curves and SBS modified bitumens ». *Road Materials and Pavement Design,* vol. 13, nº sup1, p. 234-259.

Olard, François, et Hervé Di Benedetto. 2003. « General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes ». *Road Materials and Pavement Design,* vol. 4, nº 2, p. 185-224.

Olard, François, Frédéric Noël et Frédéric Loup. 2006. « Modulus testing in indirect tension mode ». *Road materials and pavement design,* vol. 7, nº 4, p. 543-554.

Perraton, Daniel. 2015. « Les enrobés bitumineux : La chaussée bitumineuse ». *Notes de cours MGC 805: Matériaux de construction, Montréal: École de Technologie Supérieure*.

Perraton, Daniel, Hassan Baaj, Hervé Di Benedetto et Michel Paradis. 2003. « Évaluation de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux fondée sur l'évolution de l'endommagement du matériau en cours d'essai: aspects fondamentaux et application à l'enrobé à matrice de pierre ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 30, nº 5, p. 902-913.

Perraton, Daniel, Hervé Benedetto, Cédric Sauzéat, Bernhard Hofko, Andrea Graziani, Quang Tuan Nguyen, Simon Pouget, Lily D Poulikakos, Nouffou Tapsoba et James Grenfell. 2016. « 3Dim experimental investigation of linear viscoelastic properties of bituminous mixtures ». *Materials and Structures*, p. 1-17.

Perraton, Daniel, Hervé Di Benedetto et Alan Carter. 2011. « Correspondances entre les coefficients des modèles de fatigue dans les méthodes mécanistiques-empiriques de dimensionnement de chaussées souples ». *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 38, nº 11, p. 1287-1299.

Perraton, Daniel, Mathieu Meunier et Alan Carter. 2007. « Application des méthodes d'empilement granulaire à la formulation des Stones Matrix Asphalts (S MA) ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, nº 270-271, p. 87-108.

Perraton, Daniel, et François Olard. 2015. « Granulats et principe de base de la notion des volume absolus ». *Notes de cours MGC 837 - Les matériaux bitumineux : Formulation, fabrication et mise en place, Montréal: École de Technologie Supérieure.*

Piérard, Nathalie. 2011. « Quid de l'extraction et de la récupération des liants modifiés au polymère d'enrobés bitumineux? Les procédures classiques sont-elles toujours applicables? ». *Bulletin CRR* vol. 88, p. 12-6.

Piérard, Nathalie, Stefan Vansteenkiste et Ann Vanelstraete. 2010. « Effect of Extraction and Recovery Procedure on the Determination of PmB Content and on the Properties of the Recovered Binder ». *Road Materials and Pavement Design,* vol. 11, nº sup1, p. 251-279.

Recyc-Québec. 2015. « Le recyclage du verre au Québec ». p. 2.

Sohm, Juliette. 2011. « Prédiction des déformations permanentes des matériaux bitumineux ». Ecole Centrale de Nantes (ECN).

Tremblay, Denis. 2001. « Influence des différents paramètres de formulation et optimisation des enrobés à matrice de pierre ». Mémoire de maîtrise électronique. Montréal, École de technologie supérieure, 163 p. < http://espace.etsmtl.ca/843/ >.