

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Généralités au sujet des enrobés bitumineux	5
1.2 Maximisation du contact gros-sur-gros d'un squelette granulaire.....	6
1.2.1 Historique.....	7
1.2.2 Principes de la méthode d'optimisation granulaire maximisant le contact gros-sur-gros	8
1.2.2.1 Effets d'interaction entre les particules.....	8
1.2.2.2 Impact des dimensions moyennes des particules sur l'indice des vides (e)	10
1.2.2.3 Analyse proposée par Baron	11
1.2.3 Bénéfices apportés par cette nouvelle méthode d'optimisation granulométrique maximisant les contacts gros-sur-gros.....	13
1.3 Paramètres de composition pouvant influencer la rigidité de l'enrobé.....	15
1.3.1 Les paramètres de composition plus généraux	16
1.3.2 La chaux hydratée	17
1.3.2.1 Composition de la chaux hydratée.....	18
1.3.2.2 Bénéfices de la chaux hydratée sur l'enrobé.....	18
1.3.2.3 Dosages recommandés et méthodes d'application de la chaux hydratée.....	23
1.3.3 Interaction bitume-fines	24
1.3.3.1 Concept d'adsorption.....	24
1.3.3.2 Modèle conceptuel de l'effet rigidifiant des particules fines dans le bitume	25
1.4 Utilisation du verre concassé dans les enrobés bitumineux.....	28
1.4.1 Propriétés du verre concassé.....	28
1.4.2 Performances des enrobés contenant du verre concassé.....	30
1.4.2.1 Résistance au désenrobage.....	30
1.4.2.2 Résistance à l'orniérage	31
1.4.2.3 Réflexion de la lumière.....	33
1.4.2.4 Mise en oeuvre.....	33
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE, PROGRAMME DE RECHERCHE ET PLAN DE TRAVAIL	35
2.1 Méthodologie proposée pour la formulation du EBHP et formulation de référence...35	35
2.1.1 Optimisation granulométrique : interaction des particules grosses et intermédiaires.....	37
2.1.2 Optimisation granulométrique : interaction du combiné de particules grosses-intermédiaires et des particules fines	38
2.1.3 Synthèse des étapes de formulation de l'EBHP.....	38

2.1.4	Formulation de base.....	39
2.1.4.1	Squelette granulaire de l'EBHP formulé	40
2.1.4.2	Utilisation de particules de verre	40
2.2	Programme de recherche et plan de travail.....	41
2.2.1	Programme de recherche et stratégies – Phase I.....	41
2.2.1.1	L'influence de l'utilisation de nanoparticules remplaçant un volume du filler.....	42
2.2.1.2	L'influence de la nature des granulats (comparaison verre et calcaire).....	42
2.2.1.3	L'influence de l'utilisation de chaux hydratée remplaçant un volume des fines	43
2.2.1.4	L'influence de la nature du liant utilisé	43
2.2.1.5	Plan de travail – Phase I.....	45
2.2.2	Programme de recherche et stratégies – Phase II.....	46
2.2.2.1	Plan de travail – Phase II	47
CHAPITRE 3	DESCRIPTION DES MATÉRIAUX, DES ENROBÉS BITUMINEUX CONFECTIONNÉS ET DES PRINCIPALES MÉTHODES D'ESSAIS	49
3.1	Matériaux granulaires	49
3.1.1	Grosses particules	50
3.1.2	Particules intermédiaires.....	51
3.1.3	Particules fines	53
3.2	Liant	55
3.3	Description des enrobés bitumineux testés	57
3.3.1	Formulation du mélange de référence.....	57
3.3.1.1	Détermination des proportions granulaires.....	57
3.3.1.2	Détermination du volume de bitume effectif (V_{be})	61
3.3.2	Formulation des mélanges comparatifs	64
3.4	Principales méthodes d'essai	66
3.4.1	Essai d'aptitude au compactage	66
3.4.2	Essai de module complexe.....	67
3.4.2.1	Équipements et norme utilisés pour la détermination du module complexe	69
3.4.2.2	Le principe d'équivalence temps et température (PETT)	70
3.4.2.3	Modélisation 2S2P1D	75
3.4.3	Essai de retrait thermique empêché (TSRST).....	81
3.4.4	Essai de fatigue	83
3.4.4.1	Critères de rupture.....	86
3.4.5	Essai d'orniérage.....	87
3.4.6	Récapitulatif des essais	89
CHAPITRE 4	RÉSULTATS ET ANALYSES - PHASE I DU PROJET	93
4.1	Essais d'aptitude au compactage	93
4.1.1	Densité maximale (d_{mm}) pour l'essai de PCG.....	93
4.1.2	Calcul de la teneur en vides	94

4.1.3	Comportement à la PCG de l'enrobé de référence	95
4.1.4	Résultats et analyses pour les différents paramètres de formulation évalués à l'essai de PCG	96
4.1.4.1	Analyse de l'influence de l'ajout de fumée de silice sur la maniabilité (PCG)	98
4.1.4.2	Analyse de l'influence de la nature des granulats sur la maniabilité (PCG)	99
4.1.4.3	Analyse de l'influence de l'ajout de chaux hydratée sur la maniabilité (PCG)	100
4.1.4.4	Analyse de l'influence de la nature du liant sur la maniabilité (PCG)	101
4.2	Essais de module complexe	102
4.2.1	Confection des corps d'épreuve	102
4.2.2	Résultats de module complexe pour l'enrobé de référence	103
4.2.3	Résultats et analyses comparative du module complexe des formulations testées	107
4.2.3.1	Analyse de l'influence de l'ajout de fumée de silice sur le module complexe	111
4.2.3.2	Analyse de l'influence de la nature minéralogie des granulats sur le module complexe	113
4.2.3.3	Influence de la chaux hydratée sur le module complexe	116
4.2.3.4	Influence de la nature du liant sur le module complexe	117
4.3	Conclusion de la phase I	120
 CHAPITRE 5 CARACTÉRISATION DE L'ENROBÉ SÉLECTIONNÉ : EBHP (CHAUX-H)		
5.1	Confection et présentation des corps d'épreuve testés	121
5.2	Essais de retrait thermique empêché (TSRST)	122
5.2.1	Présentation des résultats d'essais TSRST	122
5.2.2	Données d'essais TSRST analysées	123
5.3	Essais de fatigue	125
5.3.1	Présentation des essais réalisés	125
5.3.2	Présentation des résultats types d'un essai de fatigue	126
5.3.2.1	Introduction	126
5.3.2.2	Évolution de la température et de l'échauffement en surface de l'éprouvette	127
5.3.2.3	Évolution de l'indice de qualité des signaux	129
5.3.2.4	Évolution de la déformation	131
5.3.2.5	Évolution de la contrainte	134
5.3.2.6	Évolution de l'angle de phase	136
5.3.2.7	Évolution de la norme du module complexe	137
5.3.2.8	Évolution de l'énergie dissipée	138
5.3.3	Durée de vie des éprouvettes de fatigue et critères de rupture	140
5.3.3.1	Correction des durées de vie en fonction de la température	143

5.3.3.2	Droite de Wöhler et durée de vie pour 1 000 000 de cycles (ϵ_6)	145
5.3.4	Méthodes DGCB d'analyse de l'endommagement par fatigue	148
5.3.4.1	Modules de rigidité initiaux	149
5.3.4.2	Calcul du dommage et correction	150
5.3.4.3	Résultats des valeurs de D_{IIIc} et prédiction	153
5.4	Essais d'orniérage	155
5.5	Essais de module complexe	157
5.5.1	Résultats et calibration pour le module complexe de l'EBHP (Chaux-H)	157
5.6	Comparaison des performances évaluées avec un enrobé de type ESG14	160
5.6.1	Comparaison des constituants	161
5.6.2	Comparaison des résultats d'essais	162
5.6.3	Comparaison en termes de structure de chaussée	166
5.6.3.1	Logiciel de dimensionnement OPECC©	166
5.6.3.2	Intrants du logiciel OPECC©	167
5.6.3.3	Résultats de l'analyse des deux structures de chaussée	168
CONCLUSION.....		171
ANNEXE I	FICHES TECHNIQUES DES FOURNISSEURS.....	177
ANNEXE II	PROCÉDURE D'INTÉGRATION DES GRANULES CONTENANT DU STYRÈNE-BUTADIÈNE-STYRÈNE (SBS) DANS L'ENROBÉ BITUMINEUX	191
ANNEXE III	RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE.....	193
ANNEXE IV	FORMULATION D'ESG14.....	201
ANNEXE V	CONSTITUANTS DES MÉLANGES D'ENROBÉ BITUMINEUX CONFECTIONNÉS EN PHASE I	203
ANNEXE VI	RÉSULTATS DE MODULE COMPLEXE (E^*) DANS L'ESPACE COLE-COLE DES ENROBÉS TESTÉS EN PHASE I.....	205
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		209

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Résultats expérimentaux des performances de trois formulations de GB514
Tableau 1.2	Comparatif des impacts économiques et environnementaux du GB5 par rapport à l'utilisation d'un enrobé français plus traditionnelle15
Tableau 1.3	Performance de stabilité à l'eau pour trois mélanges31
Tableau 3.1	Caractéristiques physiques des granulats 10-14 mm51
Tableau 3.2	Caractéristiques physiques du sable de verre C52
Tableau 3.3	Caractéristiques physiques des particules intermédiaires de calcaire53
Tableau 3.4	Caractéristiques physiques de la poussière de verre M54
Tableau 3.5	Caractéristiques physiques du filler DJL de St-Patrick55
Tableau 3.6	Tableau synthèse des liants utilisés.....57
Tableau 3.7	Récapitulatif de la taille des matériaux granulaires choisis57
Tableau 3.8	Proportions volumiques du squelette granulaire de l'EBHP de référence.60
Tableau 3.9	Proportions du mélange de référence EBHP (Réf)63
Tableau 3.10	Présentation des mélanges comparatifs et leurs constituants.....65
Tableau 3.11	Synthèse des essais réalisés pour la première phase du projet.....90
Tableau 3.12	Synthèse des essais réalisés pour la deuxième phase du projet91
Tableau 4.1	Moyenne des résultats de densité maximale pour les différents enrobés étudiés dans le cadre de la phase I94
Tableau 4.2	Résultats de la teneur en vides à la PCG des enrobés confectionnés en Phase I.....98
Tableau 4.3	Caractéristiques géométriques des éprouvettes testées au module complexe102
Tableau 4.4	Paramètres 2S2P1D de l'EBHP (Réf).....103

Tableau 4.5	Paramètres statistiques évalués sur la qualité du calage de l'EBHP (Réf)	107
Tableau 4.6	Norme du module complexe de l'EBHP (Réf) modélisée à 15°C et 10°C pour une fréquence de 10Hz	107
Tableau 4.7	Paramètres 2S2P1D des enrobés testés en phase I.....	108
Tableau 4.8	Paramètres statistiques de la qualité du calage et vides interstitiels des enrobés testés en phase I	109
Tableau 4.9	Norme du module complexe des enrobés testés en phase I avec le modèle 2S2P1D à 15°C et 10°C pour une fréquence de 10Hz	109
Tableau 5.1	Caractéristiques géométriques des éprouvettes carottées, formulation EBHP (Chaux-H)	122
Tableau 5.2	Synthèse des paramètres analysés pour les essais de TSRST	124
Tableau 5.3	Synthèse des essais de fatigue réalisés sur l'EBHP (Chaux-H) en phase II.....	126
Tableau 5.4	Synthèse de l'évaluation des différents critères de rupture	143
Tableau 5.5	Synthèse des différents critères de rupture corrigés à 10°C.....	145
Tableau 5.6	Caractéristiques des droites de fatigue.....	147
Tableau 5.7	Détermination des modules de rigidité initiaux	150
Tableau 5.8	Intervalles considérés pour la méthode DGCB.....	151
Tableau 5.9	Valeurs de dommage critique corrigé (D_{IIIc}) et prédiction du D_{IIIc} pour l'éprouvette E*/Fat-3	155
Tableau 5.10	Paramètres 2S2P1D des éprouvettes de l'EBHP (Chaux-H).....	157
Tableau 5.11	Paramètres statistiques de la qualité du calage des essais de module complexe, formulation EBHP (Chaux-H).....	159
Tableau 5.12	Module dynamique des éprouvettes testées à 15°C et 10°C pour une fréquence de 10Hz, formulation EBHP (Chaux-H).....	159
Tableau 5.13	Spécifications d'un enrobé classé EME au Québec, adapté de Bitume Québec (2014).....	160
Tableau 5.14	Caractéristiques divergentes entre les deux enrobés comparés	162

Tableau 5.15	Paramètres des droites de Wöhler de l'EBHP (Chaux-H) et de l'ESG14.....	162
Tableau 5.16	Données fictives du trafic considéré.....	167
Tableau 5.17	Structure de chaussée avec couche de base d'EBHP (Chaux-H) ou d'ESG14.....	168

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Géométrie de l'empilement apollonien de sphères7
Figure 1.2	Représentation de l'effet de paroi et d'interférence.....9
Figure 1.3	Impact du rapport des diamètres de particules sur l'indice des vides minimums11
Figure 1.4	Trois équations de droites proposées par Baron12
Figure 1.5	Photo illustrant la dégradation par désenrobage19
Figure 1.6	Mécanisme d'action de la chaux hydratée sur les liaisons bitume-granulats20
Figure 1.7	Dégradation due à l'orniérage.....21
Figure 1.8	Dégradation causée par le vieillissement chimique22
Figure 1.9	Dégradation par fissuration.....23
Figure 1.10	Schéma de l'interaction bitume-fine25
Figure 1.11	Schéma de l'évolution de la rigidité en fonction de la concentration de fines.....26
Figure 1.12	Schéma de l'évolution de la rigidité en fonction de la concentration de fines.....27
Figure 1.13	Comparaison des surfaces de verre désenrobé.....29
Figure 2.1	Schéma récapitulatif des étapes de formulation d'un EBHP39
Figure 2.2	Schéma illustrant les étapes du déroulement de la première phase du projet45
Figure 2.3	Schéma illustrant les étapes du déroulement de la deuxième phase du projet47
Figure 3.1	Courbes granulométriques des particules du squelette granulaire de l'EBHP de référence50
Figure 3.2	Photo du sable de verre C vis-à-vis une pièce de 2 dollars canadiens.....52

Figure 3.3	Photo de la poussière de verre M vis-à-vis une pièce de 2 dollars canadiens.....	54
Figure 3.4	Granules de SBS avant malaxage à chaud dans le sable de verre C.....	56
Figure 3.5	Résultats servant à déterminer les proportions optimales de grosses particules et de particules intermédiaires.....	58
Figure 3.6	Résultats servant à déterminer les proportions volumiques optimales du combiné de l'optimal des particules grosses-intermédiaires et des particules fines.....	59
Figure 3.7	Courbe granulométrique de l'EBHP de référence (% massique).....	60
Figure 3.8	Représentation volumétrique d'un enrobé bitumineux compacté.....	61
Figure 3.9	Photo de l'enrobage d'une grosse particule (10-14 mm).....	64
Figure 3.10	Illustrations du procédé physique (A) et mécanique (B) de la PCG.....	66
Figure 3.11	Exemple d'évolution de la teneur en vides en fonction du nombre de girations.....	67
Figure 3.12	Représentation du retard entre la contrainte et la déformation.....	69
Figure 3.13	Schéma de la presse hydraulique MTS (Materials Testing System) utilisée pour l'essai de module complexe.....	70
Figure 3.14	Exemple de représentation du module complexe dans l'espace Cole & Cole pour l'éprouvette EBHP (Chaux-H).....	71
Figure 3.15	Exemple de représentation du module complexe dans l'espace de Black pour l'éprouvette EBHP (Chaux-H).....	72
Figure 3.16	Exemple de courbe maîtresse pour une température de référence de 15°C pour l'éprouvette EBHP (Chaux-H).....	74
Figure 3.17	Représentation élémentaire d'un ressort.....	75
Figure 3.18	Représentation élémentaire d'un amortisseur linéaire.....	76
Figure 3.19	Représentation élémentaire d'un amortisseur variable.....	77
Figure 3.20	Représentation graphique d'un amortisseur variable pour chargement sinusoïdale.....	77
Figure 3.21	Représentation du modèle viscoélastique 2S2P1D.....	78

Figure 3.22	Représentation graphique de la distance à minimiser entre deux vecteurs dans l'espace Cole & Cole.....	80
Figure 3.23	Localisation des trois extensomètres sur l'éprouvette pour l'essai de TSRST.....	82
Figure 3.24	Détermination des paramètres analysés pour un exemple de résultats TSRST.....	83
Figure 3.25	Distinction des trois phases d'un essai de fatigue.....	85
Figure 3.26	Ornièreur MLPC	88
Figure 3.27	Compacteur de plaque LCPC.....	88
Figure 4.1	Évolution de la teneur en vides des deux échantillons d'EBHP (Réf)	95
Figure 4.2	Résultats graphiques de teneur en vides à la PCG des mélanges confectionnés en Phase I (Barres d'erreur représentant l'écart-type : $\pm 0,25\%$).....	97
Figure 4.3	Résultats et modèle de l'EBHP (Réf) dans l'espace Cole-Cole	104
Figure 4.4	Résultats et modèle de l'EBHP (Réf) dans l'espace de Black.....	104
Figure 4.5	Écarts relatifs de la norme du module complexe $ E^* $ sur l'ensemble des fréquences équivalentes ($T_{ref}=15^\circ C$) de l'EBHP (Réf).....	105
Figure 4.6	Écarts relatifs de l'angle de déphasage sur l'ensemble des fréquences équivalentes ($T_{ref}=15^\circ C$) de l'EBHP (Réf)	106
Figure 4.7	Évolution de la norme du coefficient complexe $ C^* $ pour les enrobés avec ajout de fumée de silice ($T_{ref}=15^\circ C$).....	111
Figure 4.8	Évolution de l'angle de phase (φ_C) pour les enrobés avec ajout de fumée de silice ($T_{ref}=15^\circ C$)	112
Figure 4.9	Évolution de la norme du coefficient complexe $ C^* $ pour les enrobés servant à déterminer l'influence de la nature des granulats ($T_{ref}=15^\circ C$)..	114
Figure 4.10	Évolution de l'angle de phase (φ_C) pour les enrobés servant à déterminer l'influence de la nature des granulats ($T_{ref}=15^\circ C$).....	114
Figure 4.11	Évolution de la norme du coefficient complexe $ C^* $ pour l'enrobé servant à déterminer l'influence de la chaux hydratée ($T_{ref}=15^\circ C$)	116

Figure 4.12	Évolution de l'angle de phase (φ_C) pour les enrobés servant à déterminer l'influence de la chaux hydratée ($T_{ref}=15^\circ C$).....	117
Figure 4.13	Évolution de la norme du coefficient complexe $ C^* $ pour l'enrobé servant à déterminer l'influence de la nature du liant ($T_{ref}=15^\circ C$)	118
Figure 4.14	Évolution de l'angle de phase (φ_C) pour les enrobés servant à déterminer l'influence de la nature du liant ($T_{ref}=15^\circ C$).....	119
Figure 5.1	Évolution de la contrainte en fonction d'une baisse de température de $10^\circ C/h$ de 4 éprouvettes de l'EBHP (Chaux-H)	123
Figure 5.2	Évolution de la température pour l'essai de fatigue de l'éprouvette Fat-1	128
Figure 5.3	Évolution de l'échauffement pour l'essai de fatigue de l'éprouvette Fat-1 (Température initiale de $10,36^\circ C$)	129
Figure 5.4	Évolution de l'indice de qualité des signaux de l'éprouvette Fat-1	130
Figure 5.5	Évolution de l'amplitude de déformation axiale moyenne de l'éprouvette Fat-1	131
Figure 5.6	Évolution des écarts de déformation mesurées pour l'éprouvette Fat-1 .	132
Figure 5.7	Évolution du centre de déformation mesuré de l'éprouvette Fat-1	133
Figure 5.8	Évolution de l'amplitude de contrainte de l'éprouvette Fat-1	134
Figure 5.9	Évolution de la valeur centrée de la contrainte pour l'éprouvette Fat-1 .	135
Figure 5.10	Évolution de l'angle de phase de l'éprouvette Fat-1	136
Figure 5.11	Évolution de la norme du module complexe de l'éprouvette Fat-1	137
Figure 5.12	Évolution de l'énergie dissipée par cycle pour l'éprouvette Fat-1	139
Figure 5.13	Évolution des écarts de déformations mesurées de l'éprouvette Fat-6...	141
Figure 5.14	Points d'inflexion des écarts d'extensomètres de l'éprouvette Fat-1	142
Figure 5.15	Points d'inflexion de la norme du module complexe de l'éprouvette Fat-1	142
Figure 5.16	Variables de la droite de Wöhler dans le domaine $\text{Log}(N_f)$ vs $\text{Log}(\epsilon_{Aax})$	146

Figure 5.17	Représentation graphique des droites de Wöhler corrigées à 10°C du mélange d'EBHP (Chaux-H)148
Figure 5.18	Extrapolation logarithmique du $ E^*_0 $ de l'éprouvette Fat-1149
Figure 5.19	Détermination des variables de la méthode DGCB sur l'éprouvette Fat-1152
Figure 5.20	Dépendance (D_{III}) et indépendance (D_{IIIc}) du dommage critique indiquant l'apparition de macrofissures (phase II/III) par rapport à l'amplitude de déformation (ϵ_{Aax}).....153
Figure 5.21	Évolution du dommage critique corrigé (D_{IIIc}) en fonction de la teneur en vides d'éprouvettes testées à 10°C et 10Hz.....154
Figure 5.22	Résultats d'orniérage de la formulation EBHP (Chaux-H)156
Figure 5.23	Représentation dans le plan Cole-Cole des essais de module complexe, formulation EBHP (Chaux-H).....158
Figure 5.24	Comparaison des courbes granulométriques de l'EBHP (Chaux-H) et de l'ESG14.....161
Figure 5.25	Représentation graphique des droites de Wöhler pour l'EBHP (Chaux-H) et l'ESG14163
Figure 5.26	Comparaison des résultats d'orniérage de la formulation d'EBHP (Chaux-H) et d'ESG14164
Figure 5.27	Comparaison des résultats de module complexe dans le plan Cole & Cole de l'EBHP (Chaux-H) et de l'ESG14.....165
Figure 5.28	Évolution de la norme du coefficient complexe de rigidité $ C^* $ de l'ESG14 par rapport à l'EBHP (Chaux-H) à 15°C165
Figure 5.29	Évolution de la fissuration par fatigue en fonction du nombre d'années de la structure de chaussée avec EBHP (Chaux-H)169
Figure 5.30	Évolution de la fissuration par fatigue en fonction du nombre d'années de la structure de chaussée avec ESG14169

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2S2P1D	Modèle rhéologique (deux ressorts, deux patins et un amortisseur)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
DJMA	Débit journalier moyen annuel
E*	Essai de module complexe
EBHP	Enrobé Bitumineux Hautes Performances
ESG	Enrobé semi-grenu
ÉTS	École de technologie supérieure
FAT	Essai de résistance à la fatigue
GNM	Grosseur nominale maximale
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
MLPC	Matériel du Laboratoire des Ponts et Chaussées
MTQ	Ministère des Transports du Québec
PETT	Principe d'Équivalence Temps Température
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PG	Grade de performance d'un bitume (Performance Grade)
TSRST	Essai de résistance au retrait thermique empêché
WLF	Loi de William Landel Ferry

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
°	Degré
°C	Degré Celsius
ω	Pulsation
φ	Angle de phase
φ_C	Angle de phase du coefficient complexe de rigidité
β	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
δ	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
a_T	Facteur de translation pour fréquence équivalente
σ	Contrainte
σ_0	Contrainte initiale
σ_A	Amplitude du signal de 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
c_1	Coefficient correspondant à la durée de vie de l'enrobé bitumineux pour une amplitude de déformation imposée de 1 m/m à une température et fréquence données
c_2	Coefficient lié à la pente de la droite de fatigue de l'enrobé bitumineux
C^*	Coefficient complexe de rigidité
$ C^* $	Norme du coefficient complexe de rigidité
d_{gb}	Densité du granulat brute
d_{mb}	Densité du mélange brute
d_{mm}	Densité du mélange maximale

XXVIII

E_0	Module vitreux (pulsation tend vers l'infini)
E_{00}	Module statique (pulsation tend vers zéro)
E_1	Composante réversible élastique du module complexe (E^*)
E_2	Composante irréversible ou visqueuse du module complexe (E^*)
E^*	Module complexe
$ E^* $	Norme du module complexe
R^2	Coefficient de détermination
RMSE	Erreur de prédiction moyenne (Root mean square error)
V_i	Volume des vides interstitiels
ϵ	Epsilon, déformation en m/m
$\S$	Section

INTRODUCTION

Le réseau routier québécois se détériore constamment dans le temps et c'est pourquoi des sommes d'argent importantes doivent être investies stratégiquement à chaque année afin d'entretenir les chaussées. La majorité des interventions ont principalement lieu sur la couche de surface d'enrobé bitumineux. Or, plusieurs dommages, comme l'orniérage ou les fissurations par fatigue, sont liés en grande partie à la qualité des matériaux en couche de base du revêtement bitumineux. Dans ce contexte il devient important de chercher à maximiser les performances de l'enrobé formant cette couche.

Le projet de recherche proposé consiste à formuler et caractériser un mélange d'enrobé bitumineux à hautes performances (EBHP), possédant notamment un haut module de rigidité. Le concept de formulation utilisé pour concevoir un EBHP est fondé sur le principe de l'enrobé à matrice de pierre (SMA), mais en s'assurant également d'optimiser les proportions des différentes combinaisons granulaires pour former un squelette granulaire très dense. En bref, l'approche EBHP vise à maximiser dans un premier temps le volume de la fraction grossière (principe SMA). Ensuite, une ou plusieurs combinaisons de plus petits granulats sont ajoutées pour minimiser les vides intergranulaires du squelette, sans toutefois nuire au contact gros-sur-gros de la fraction la plus grossière. La granulométrie des plus petites particules ainsi ajoutées doit également être très compacte, ce qui n'est pas toujours évident puisque le concepteur est souvent limité au niveau de la dimension des granulats pouvant être utilisés. Dans cette optique, un intérêt particulier est porté sur des granulats en verre concassé mixte. Il est possible actuellement d'obtenir ce type de matériaux en visant une granulométrie précise puisque le fournisseur a un bon degré de liberté quant au concassage du verre. Notons également l'aspect positif d'un point de vue environnemental de réutiliser des particules de verre concassé mixte dans l'enrobé bitumineux. En plus du travail d'optimisation mené sur les composantes solides de l'enrobé, différents bitumes et additifs sont testés durant la phase exploratoire de cette étude dans le but d'obtenir ultimement un bon matériau rigide et durable dans le temps.

Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur la thématique du projet pour être en mesure de bien cerner le niveau de connaissances actuelles sur le sujet. Un intérêt plus particulier est porté sur la méthode d'optimisation granulométrique utilisée pour l'EBHP où l'on veut favoriser le contact entre les gros granulats, sujet qui fait ici l'objet d'une synthèse. Il est ensuite question des différents paramètres de composition d'un enrobé bitumineux pouvant influencer sa rigidité, soit un sujet essentiel à aborder pour formuler éventuellement un enrobé bitumineux hautes performances. Finalement, une synthèse en lien avec l'incorporation de particules de verre dans les enrobés bitumineux a également été effectuée.

Afin de répondre à l'objectif de ce projet, une campagne expérimentale a été élaborée de façon minutieuse au Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'ETS. Deux phases composent cette campagne expérimentale. La première phase est de type exploratoire et vise essentiellement à formuler et tester plusieurs variantes d'une formulation d'EBHP pour évaluer l'influence de différents paramètres de composition sur la rigidité et la maniabilité. La deuxième phase sert ensuite à caractériser de façon plus complémentaire l'enrobé de la première phase semblant le plus prometteur au niveau de ses performances. L'EBHP ainsi caractérisé est ensuite comparé à un enrobé d'usage similaire (ESG-14), mais utilisé de façon plus conventionnelle au Québec. Le deuxième chapitre décrit plus amplement le programme de recherche, le plan de travail, la méthodologie et les stratégies utilisées.

Le troisième chapitre décrit les différents matériaux utilisés ainsi que la composition des formulations d'EBHP réalisées. L'ensemble des essais thermomécaniques utilisés pour caractériser les enrobés testés sont également décrits dans ce chapitre.

Le chapitre quatre présente les résultats des essais réalisés lors de la première phase de ce projet de recherche. Une analyse pour comprendre les causes à l'origine des résultats expérimentaux y est également exposée.

Le dernier chapitre présente intégralement la deuxième phase de ce projet. Les résultats et l'analyse des essais complémentaires de caractérisation y sont exposés. Deux structures de

chaussées sont finalement modélisées où l'EBHP (structure #1) est comparé à un ESG14 (structure #2) pour tenter de mettre en perspective les deux enrobés d'un point de vue performance globale.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans l'optique de formuler un **Enrobé Bitumineux à Hautes Performances (EBHP)**, plusieurs voies ont dû être étudiées afin de déterminer quels sont les paramètres de formulation qui peuvent aider à obtenir de hautes performances. Ce chapitre sur la revue de la littérature traite de différentes documentations actuellement disponibles pouvant aider de près ou de loin à déterminer ces paramètres de formulation.

1.1 Généralités au sujet des enrobés bitumineux

L'enrobé bitumineux est un mélange de granulats et de liant bitumineux. Une fois bien mis en place, l'enrobé offre une rigidité appréciable et peut être utilisé comme revêtement dans les structures de chaussée bitumineuse. Les granulats de différentes dimensions, représentés souvent sous la forme d'une courbe granulométrique, forment le squelette solide de l'enrobé, lequel est choisi en fonction des caractéristiques mécaniques et fonctionnelles recherchées. Le liant et les fines forment ce qui est appelé le mastic bitumineux. Le mastic est donc un amalgame de bitume et de particules fines, dispersées idéalement de façon homogène dans le bitume, agissant comme interface d'adhésion entre les plus grosses particules. C'est le mastic qui est en quelque sorte le véritable liant assurant l'intégrité de l'enrobé en lui permettant d'avoir de la cohésion (Olard, 2003). Tout comme le liant bitumineux qui le compose, l'enrobé bitumineux est un matériau thermosusceptible puisque ses propriétés dépendent fortement de sa température. Pour une température élevée, le module de rigidité de l'enrobé est faible et ce dernier est plus facilement déformable. Pour une basse température, le module de rigidité est élevé et le matériau devient fragile (Di Benedetto et al., 2005).

Un enrobé bitumineux pour couche de base joint à la couche de fondation représente l'essentiel de la rigidité d'une structure de chaussée. Le passage répété des essieux sur la chaussée se traduit par des efforts en traction dans le bas de la couche d'enrobé de base, ce qui peut initier une fissuration par fatigue. Les principales caractéristiques mécaniques

recherchées pour une couche d'enrobé de base sont : un bon module de rigidité, une haute résistance à l'orniérage et une bonne résistance en fatigue (Di Benedetto et al., 2005). C'est donc principalement dans cette optique que l'EBHP est ici formulé.

1.2 Maximisation du contact gros-sur-gros d'un squelette granulaire

Une structure de chaussée bitumineuse sert de médium entre les charges d'essieux de véhicule et l'infrastructure, de manière à répartir le mieux possible les contraintes admissibles à l'infrastructure. Sous l'action des charges, la structure de chaussée fléchit, induisant des déformations au bas des couches liées du revêtement. Pour une même épaisseur de revêtement à couche unique, ces déformations seront moindres avec un enrobé plus rigide. Or, ces déformations répétées induisent de la fatigue au sein du matériau, altérant ainsi sa cohésion et par conséquent le module de rigidité de l'enrobé. Notons que le fait de maintenir ces déformations le plus faible possible aide à prolonger grandement la durée de vie du revêtement d'une chaussée bitumineuse.

En plus d'être rigide, l'enrobé bitumineux doit rester stable vis-à-vis les déformations permanentes dû aux contraintes imposées. Dans certains cas, l'enrobé peut devenir instable aux températures chaudes d'utilisation dû notamment aux caractéristiques spécifiques du bitume. On peut obtenir un enrobé bitumineux à la fois rigide et stable en optimisant les caractéristiques du squelette granulaire. La méthode d'optimisation du squelette granulaire proposée dans ce projet permet d'atteindre ces objectifs. L'idée générale est de toujours maximiser le contact entre les plus grosses particules tout en remplissant les vides avec de plus petites particules. De cette façon, une bonne rigidité est assurée par la densité du squelette de l'enrobé et la stabilité de ce dernier est assurée par le contact entre les grosses particules.

La présente section traite des principes et bénéfices de la méthode d'optimisation granulométrique utilisée pour maximiser le contact gros-sur-gros, laquelle est ici associée au concept de formulation d'un Enrobé Bitumineux Hautes Performances (EBHP).

1.2.1 Historique

Les premiers travaux sur l'optimisation des arrangements granulaires discontinus datent du 3^{ème} siècle avant J-C. Ils ont été développés par un grec astronome et géomètre du nom d'Apollonios de Perga (Guyone et Troadec, 1994). Le concept développé, tel que schématisé à la Figure 1.1, est constitué d'un ensemble de sphères de même taille toutes tangentes les unes par rapport aux autres. Tous les vides ainsi formés sont ensuite comblés par une sphère plus petite. L'exercice se répète de façon séquentielle jusqu'à l'infiniment petit.

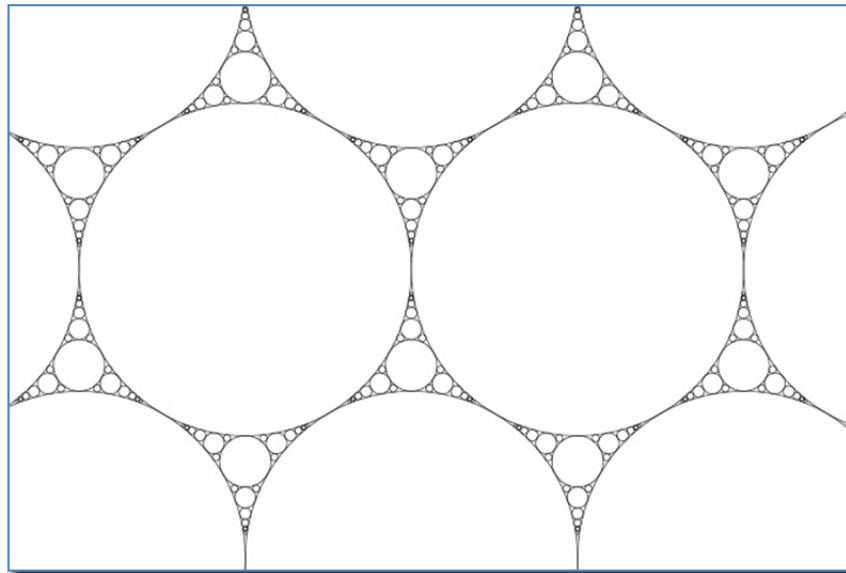


Figure 1.1 Géométrie de l'empilement apollonien de sphères
Tirée de Guyone et Troadec (1994)

De façon générale, le tétraèdre régulier formé par un vide est d'un diamètre de 0,225 fois celui des sphères formant ce tétraèdre. La géométrie fractale de cet empilement de sphères a été décrite beaucoup plus tard, soit au 20^e siècle, par un physicien français nommé Gilles de Gennes (Guyone et Troadec, 1994). Les applications expérimentales de ce concept ont beaucoup été étudiées pour les bétons hydrauliques, notamment dans les travaux de Caquot (Caquot, 1937) ou Baron et Sauterey (Baron et Sauterey, 1995) dans le domaine des bétons à hautes performances. Il y a eu toutefois des innovations depuis quelques années dans le domaine des enrobés bitumineux suite à l'application de ce concept comme la formulation du

du SMA Cpack développée à l'ÉTS (*Coarse aggregate packing*) et celle du GB5 (Olard et al., 2010) développée en France (Graves-bitume). La méthode d'optimisation granulométrique présentée dans ce chapitre est celle développée pour la formulation de l'enrobé SMA Cpack (Perraton, Meunier et Carter, 2007). Cette formulation a été développée en 2007 par Mathieu Meunier dans le cadre de son projet de maîtrise sous la supervision du professeur Perraton.

1.2.2 Principes de la méthode d'optimisation granulaire maximisant le contact gros-sur-gros

La méthode d'optimisation granulométrique discontinue, présentée ici, part du principe qu'un agencement granulométrique uniforme qu'on peut associer aux grosses sphères de même taille, peut atteindre sa compacité maximale très rapidement même si celle-ci n'est pas optimale. De plus, un squelette granulaire constitué ainsi offre une très bonne stabilité à l'orniérage puisque le contact "gros-sur-gros" des granulats permet un transfert plus direct des contraintes dans le matériau tout en empêchant le mouvement relatif des grosses particules par un effet autobloquant. Les vides résiduels entre les grosses particules doivent être comblés par des fractions de particules intermédiaires et fines tout en s'assurant de remplir un maximum de vides sans toutefois interférer sur l'agencement des grosses particules. Sur ce principe, une nouvelle méthode de formulation des enrobés bitumineux a été proposée au LCMB en considérant les interactions entre les différentes fractions de particules du squelette granulaire et ce, en vue de maximiser le contact entre les grosses particules dans l'enrobé (Perraton, Meunier et Carter, 2007). Les sous-sections qui suivent décrivent plus en détail les notions de base associées à cette méthode d'optimisation granulométrique.

1.2.2.1 Effets d'interaction entre les particules

Des travaux de Caquot (Caquot, 1937) ont porté sur l'étude de combiné binaire de granulats unidimensionnels en attachant un intérêt particulier sur l'indice des vides (e) de ces

mélanges. Ces travaux ont permis d'apporter des précisions sur deux types d'interactions entre les granulats, soit :

1. l'effet de paroi
2. l'effet d'interférence

L'évolution de l'indice des vides d'un combiné binaire suivant différentes proportions de granulats est présentée à la Figure 1.2. Les résultats montrent que l'indice des vides atteint une valeur minimale où se situe un point optimal limitant l'influence des deux phénomènes sur l'indice des vides (e) du combiné granulaire (Perraton, Meunier et Carter, 2007).

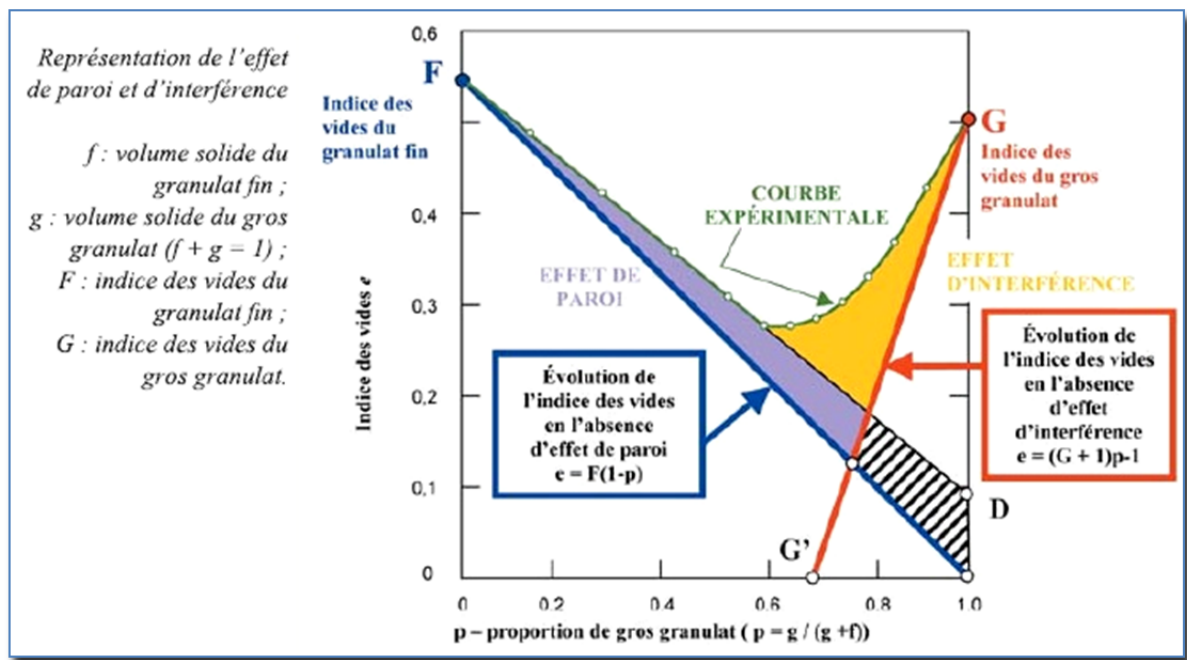


Figure 1.2 Représentation de l'effet de paroi et d'interférence
 Tirée de Perraton, Meunier et Carter (2007)

L'effet de paroi est associé à l'interaction entre les particules et tout type de paroi pouvant perturber leur agencement. Cette perturbation peut être visualisée si on pense à l'impact qu'aurait l'ajout d'une grosse particule sphérique dans un volume infini de petites particules unidimensionnelles. La grosse particule perturbera localement l'agencement des petites particules augmentant ainsi l'indice des vides à proximité de la paroi de cette grosse particule

puisque les petites particules ne seront plus à même de se positionner de façon optimale : il y a effet de paroi. L'effet de paroi est ainsi présenté sur la droite à la Figure 1.2 sous la forme d'une surface triangulaire jaune (Perraton, Meunier et Carter, 2007).

En poussant un peu plus loin l'exemple précédent, l'augmentation de la proportion de grosses particules devient suffisamment importante pour qu'il se forme des interstices entre les grosses particules et ces dernières sont remplies de particules plus fines. Il y a apparition de l'effet d'interférence où l'agencement des grosses particules interfère sur l'agencement des plus petites, augmentant ainsi l'indice des vides. Certes, l'agencement des plus petites particules dépend de l'aire de paroi des plus grosses (effet de paroi), mais également de la disposition propre des grosses particules au sein du squelette granulaire. La notion d'interférence peut également être illustrée en prenant pour exemple un volume infini de grosses particules dans lequel on augmente progressivement le volume de petites particules qui viennent se loger au sein des interstices des grosses. L'ajout progressif des petites permet de diminuer graduellement l'indice des vides du combiné. Or, à un certain point, l'augmentation du volume des petites provoquera un desserrement des grosses, marquant ainsi un changement dans l'évolution de l'indice des vides du combiné, qu'on peut associer à un seuil minimal de vides. L'effet d'interférence est ainsi présenté à la Figure 1.2 sous forme d'une surface triangulaire du côté droit (Perraton, Meunier et Carter, 2007).

1.2.2.2 Impact des dimensions moyennes des particules sur l'indice des vides (e)

Toujours dans le cas des mélanges binaires unidimensionnels, il est intéressant d'étudier l'évolution de l'indice des vides en fonction de la proportion de gros granulats, en faisant varier les écarts de diamètre des particules pour chacun des mélanges à l'étude. Les travaux de Powers (Powers, 1969) ont en effet mis en évidence que l'évolution de l'indice des vides en fonction de la proportion de gros granulats, pour un combiné binaire unidimensionnel, varie selon le rapport des dimensions moyennes des particules. Ainsi, l'indice des vides est plus faible lorsque l'écart du diamètre des petites et des grosses particules est élevé. Il est donc recommandé dans la littérature de limiter le diamètre des plus petites particules à 10%

de celui des plus grosses ($d_{\text{petites}} \leq 0.10 d_{\text{grosses}}$) dans le but de mitiger l'effet de paroi et d'interférence (Perraton, Meunier et Carter, 2007). Il a aussi été démontré expérimentalement que le volume minimal des vides dans une combinaison granulaire quelconque varie surtout en fonction du rapport entre les grosseurs minimales et maximales des granulats. Les grosseurs intermédiaires ont donc moins d'influence (Baron et Sauterey, 1995). La Figure 1.3 présente ces dernières relations pour un mélange binaire.

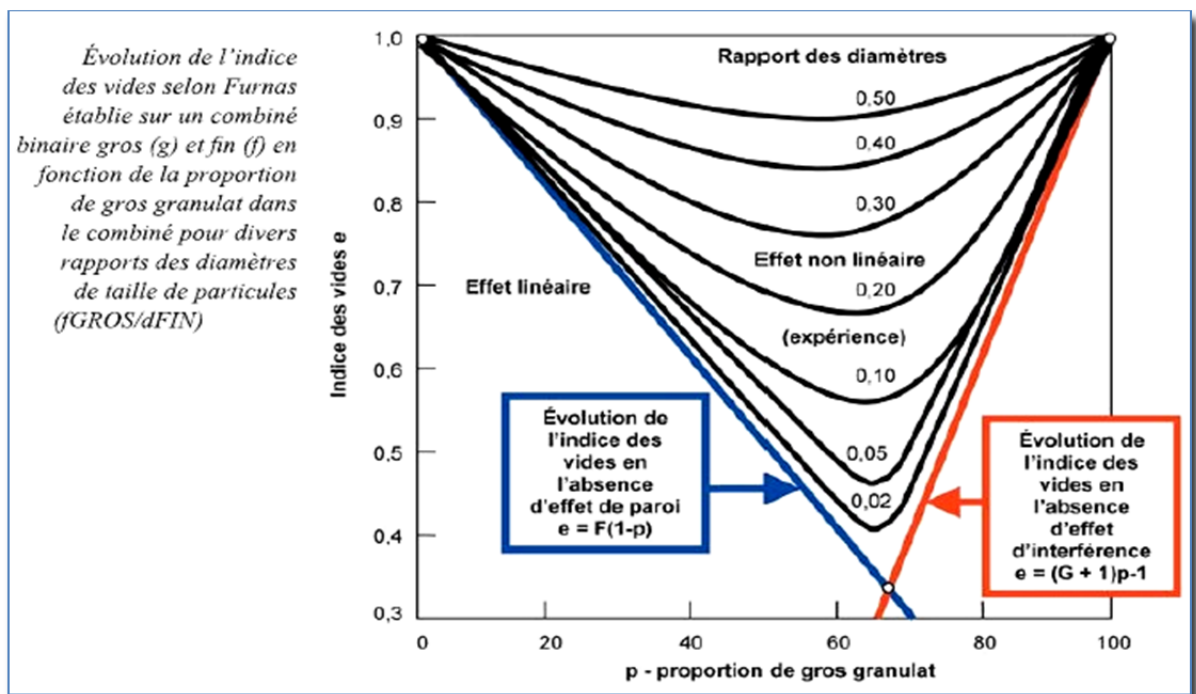


Figure 1.3 Impact du rapport des diamètres de particules sur l'indice des vides minimums
Tirée de Perraton, Meunier et Carter (2007)

1.2.2.3 Analyse proposée par Baron

Dans le but de se soustraire le plus possible aux effets d'interférence, Baron a proposé de décrire la variation de l'indice des vides (e) dans un combiné granulaire binaire en utilisant trois droites telles que montrées à la Figure 1.4. Cette approche est applicable lorsqu'un granulat est très fin par rapport à l'autre ($d_{\text{fin}}/d_{\text{gros}} \approx 0,008$) et permet de définir deux seuils critiques nommés p_i et p_s . Le seuil p_i correspond à la proportion maximale de grosses

particules pouvant être combinées aux petites (fines) sans nuire à l'agencement de ces dernières. Le seuil p_s correspond à la proportion maximale de fines pouvant être combinées aux grosses sans interférer sur l'agencement des grosses. Il est particulièrement important de ne pas desserrer l'agencement des grosses particules si l'on cherche à maximiser le contact "gros-sur-gros" d'un squelette granulaire : l'effet de desserrement risquerait de nuire à la stabilité du combiné granulaire vis-à-vis les déformations permanentes d'un enrobé bitumineux.

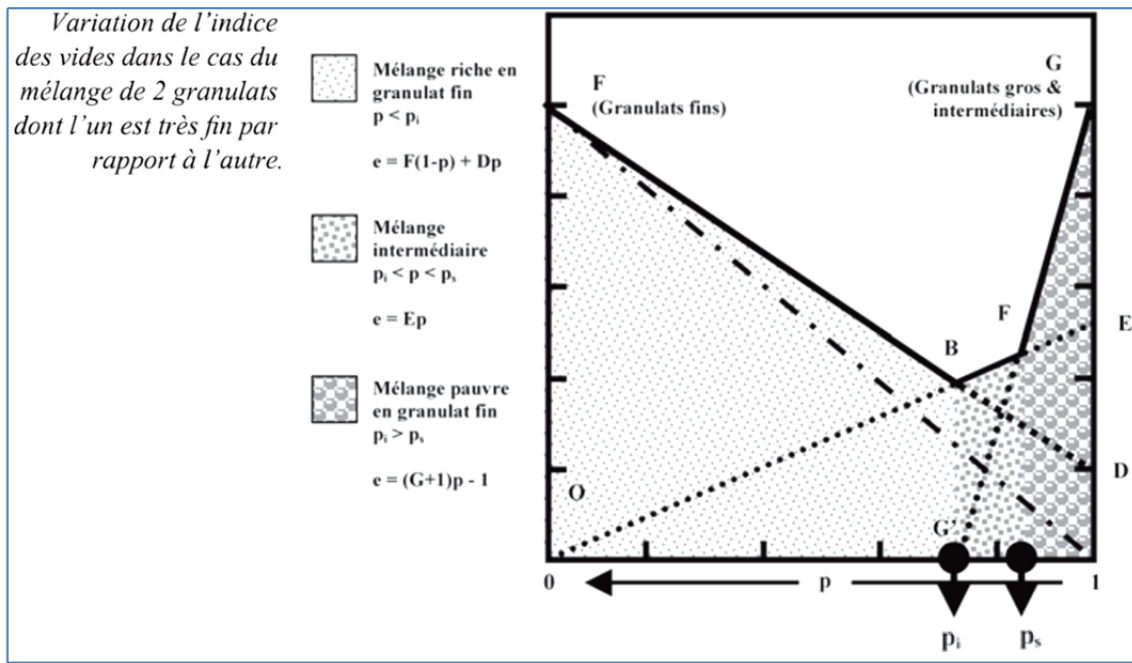


Figure 1.4 Trois équations de droites proposées par Baron
Tirée de Baron et Sauterey (1995)

La variation de l'indice des vides (e) peut donc être définie par trois lois qui sont décrites ci-dessous (Perraton, Meunier et Carter, 2007) :

- **Mélange riche en granulats fins : $p < p_i$**

$$e = F \times (1 - p) + D \times p \quad (1.1)$$

Où " F " est l'indice des vides des granulats fins et " D " est un coefficient de l'effet de paroi.

- **Mélange pauvre en granulats fins : $p > p_s$**

$$e = (G + 1) \times p - 1 \quad (1.2)$$

Où " G " est l'indice des vides des gros granulats.

- **Mélange intermédiaire : $p_i < p < p_s$**

$$e = E \times p \quad (1.3)$$

Où " E " est un coefficient sans signification physique simple.

Afin de quantifier le seuil p_i , on introduit la notion de « jeu » qui fait référence au jeu dans un assemblage. Il a été démontré expérimentalement que l'interférence du gros granulat sur le petit granulat est nulle lorsque le jeu (j) du gros granulat au sein du mélange est de l'ordre de grandeur de la taille du granulat fin ($j = d_{fin}$), l'équation pour déterminer le seuil p_i s'écrit ainsi (Perraton, Meunier et Carter, 2007) :

$$p_i = \left[\frac{(1 + F \times (1 - p_i) + D \times p_i) \times d_{gros}^3}{(1 + G) \times (d_{gros} + d_{fin})^3} \right] \quad (1.4)$$

Où " d_{gros} " est le diamètre moyen des gros granulats et " d_{fin} " est le diamètre moyen des granulats fins.

Une fois les interactions entre particules mieux comprises, il devient évident qu'il faut porter une attention très particulière sur les combinaisons granulaires utilisées pour conserver une bonne stabilité du squelette granulaire tout en ayant une faible teneur en vides.

1.2.3 Bénéfices apportés par cette nouvelle méthode d'optimisation granulométrique maximisant les contacts gros-sur-gros

En France, un nouvel enrobé à hautes performances a vu le jour en 2010. C'est la compagnie européenne Eiffage Travaux Publics qui a formulé cet enrobé bitumineux et son nom est le GB5[®]. La granulométrie de ces enrobés a été déterminée en utilisant la méthode décrite dans

ce chapitre. La base du squelette granulaire de cet enrobé étant formée majoritairement de gros granulats, l'aptitude au compactage est excellente puisque les gros granulats peuvent se positionner de façon optimale très rapidement. Notons également pour ce type de formulation, l'absence de ségrégation lors de sa mise en place. Le contact "gros-sur-gros" permet d'augmenter la stabilité et la rigidité du produit, d'où la très bonne résistance à l'orniérage qui en résulte. Le GB5 combine son squelette granulaire optimisé à un liant bitumineux modifié en polymères afin d'avoir aussi une bonne résistance à la fatigue. Bien que les liants bitumineux de bonne qualité soient relativement coûteux, la méthode d'optimisation visant à maximiser les contacts gros-sur-gros permet une réduction significative de la teneur en liant de l'enrobé étant donné la faible teneur en vides de l'agencement granulaire. Cette réduction est significative si on la compare à la quantité de liant nécessaire d'un enrobé conventionnel de même grosseur nominale maximale (GNM). Les modules ($E^*(15^\circ\text{C} - 10\text{ Hz})$) mesurés en laboratoire sur le GB5 peuvent être supérieurs à 15 000 MPa tout en conservant une bonne résistance à la fatigue. Le Tableau 1.1 présente les résultats obtenus en laboratoire sur trois types de GB5 formulés avec différents grades de bitume (Olard et al., 2010).

Tableau 1.1 Résultats expérimentaux des performances de trois formulations de GB5
Adapté de Olard et al. (2010)

	% TL totale	Grade du liant	PCG (100 g)	Orniérage		Module E* 15°C-10 Hz	Fatigue ε6 10°C-25 Hz
				10 000 cycles	30 000 cycles		
Spécif. EME2	-		≤ 6%	-	≤ 7,5%	> 14 000	> 130
Spécif. GB4	-		≤ 9%	-	≤ 10%	> 11 000	> 100
Spécif. GB3	-		≤ 10%	≤ 10%	-	> 9 000	> 90
Spécif. GB2	-		≤ 11%	≤ 10%	-	> 9 000	> 80
GB5® 0/14 La Noubleau Disc. 4/10	4,2	Liant multigrade 35/45	6 %	4,1	4,5	12 100 (vi=3,5%)	115
	3,9	Liant élastomère Biprène® 41	5,8 %	2,5	2,6	17 400 (vi=4%)	107
	4,6(*)	Liant élastomère Biprène® 41 IPE	4,5%	3,6	4,1	13 200 (vi=5,9%)	145
(*) 3,4% de liant modifié d'apport et 1,2% de recyclé							

Étant donné l'excellente rigidité, la bonne résistance à la fatigue et la plus faible teneur en liant, le GB5 a des impacts positifs tant sur l'environnement que sur les coûts de production et de mise en œuvre. Le

Tableau 1.2 présente une comparaison intéressante entre différentes formulations de GB5 et d'autres enrobés français plus traditionnelles.

Tableau 1.2 Comparatif des impacts économiques et environnementaux du GB5 par rapport à l'utilisation d'un enrobé français plus traditionnelle
Adapté de Olard et al. (2010)

Chaussée bitumineuses épaisses TC620. Revêtement BBM 4 cm. Plate-forme PF3						
	Solutions traditionnelles			Solutions innovantes GB5®		
	EME2 TL=5,7%	GB3 TL=4,3%	GB4 TL=4,7%	GB5 Liant multigrade TL=4,2%	GB5 Biprène® 41 TL=3,9%	GB5 Biprène® 41 IPE TL=4,6% ^(*)
Couche de roulement	4 cm BBM					
Couche d'assise	16 cm EME2	22 cm GB3	18 cm GB4	14 cm GB5	12 cm GB5	10 cm GB5
Différence d'épaisseur des couches d'assises	Référence	+ 6 cm (30%)	+ 2 cm (10%)	-2 cm (-10%)	-4 cm (-20%)	-6 cm (-30%)
Différence de quantité de granulats		+ 30%	+ 10%	-10%	-20%	-30%
Différence de quantité de liant		+ 20%	-8%	-28%	-39%	-48%
Différence relative de coût matières/m²		+ 5%	-6%	-23%	-27%	-38%
(*) 3,4% de liant modifié d'apport et 1,2% de recyclé						

1.3 Paramètres de composition pouvant influencer la rigidité de l'enrobé

Un enrobé bitumineux possédant une bonne rigidité peut normalement aider la chaussée à être plus durable dans le temps puisque les déformations dues aux charges répétées des véhicules auront moins d'amplitude au niveau de la couche d'enrobé. La rigidité est donc une propriété importante et c'est pourquoi il faut comprendre quels sont les paramètres pouvant améliorer ou nuire à cette propriété. La rigidité d'un enrobé bitumineux peut être évaluée grâce à l'essai de module complexe qui est décrit plus en détail au Chapitre 2.

Dans un premier temps il est proposé de voir en revue les paramètres de composition d'un enrobé plus généraux pouvant influencer sa rigidité. Ensuite, une attention plus particulière est portée sur les bénéfices probables de l'utilisation de matériaux moins conventionnels comme : la chaux hydratée, les particules ultrafines et les particules de verre.

1.3.1 Les paramètres de composition plus généraux

Les principaux paramètres de composition influençant le comportement rigide d'un enrobé sont : la teneur en liant, la nature du liant, les granulats ainsi que les particules fines et finalement, la teneur en vides (Di Benedetto et al., 2005).

La teneur en liant a une influence sur le module de rigidité de l'enrobé. La tendance suivante peut-être observée : à compacité fixe de l'enrobé bitumineux, une augmentation de la teneur en liant aide à élever le module de rigidité de l'enrobé jusqu'à une valeur optimale du module. Passé cette valeur optimale, une augmentation de la teneur en liant aura pour effet de diminuer le module de rigidité de l'enrobé.

Par ailleurs, le module complexe d'un enrobé est grandement influencé par la nature même du bitume. Cette dernière a un effet important à la fois sur la composante de rigidité visqueuse et élastique de l'enrobé, donc son comportement viscoélastique. Les bitumes modifiés aux polymères sont souvent utilisés pour obtenir des enrobés bitumineux plus rigides et élastiques.

Lorsque le liant dans l'enrobé a un comportement plutôt rigide, c.-à-d. pour des fréquences élevées de sollicitation et/ou des températures basses, la forme et la nature minéralogique des granulats a peu d'influence sur la rigidité. Cette influence devient plus importante lorsque le liant adopte un comportement plus visqueux soit pour de faibles fréquences de sollicitation et/ou des températures plus élevées. On peut penser que des granulats anguleux aideront d'avantage à la rigidité d'un enrobé dans un tel cas, puisque le bitume n'apportant plus

beaucoup de propriétés élastiques au mélange, la composante de rigidité élastique est alors majoritairement assurée par le contact des granulats.

Soulignons que l'ajout de particules fines ($< 80 \mu\text{m}$) a des effets positifs sur la qualité du mastic (amalgame bitume-fines) qui sert à bien lier les granulats entre eux. Pour une quantité fixe de bitume, l'épaisseur du film de bitume effectif sur les granulats dépend de la quantité de fines qui ont une surface spécifique très élevée. La rigidité de l'enrobé est donc améliorée lorsque des particules fines sont ajoutées puisque le volume de mastic est plus important et plus rigide. Il y a toutefois une valeur optimale de particules fines pouvant être ajoutées puisqu'au-delà d'une certaine teneur en fines, les propriétés mécaniques de l'enrobé peuvent chuter si la teneur en bitume n'est plus suffisante.

Finalement, il faut souligner que la teneur en vides a une influence marquée sur la rigidité d'un enrobé. En effet, une zone de vides dans un échantillon d'enrobé est beaucoup plus facile à déformer qu'une zone de bitume et de particules solides. La rigidité va donc augmenter lorsque la teneur en vides d'un enrobé bitumineux diminue. La teneur en vides résulte à la fois de paramètres de composition comme la granulométrie et d'autres facteurs de mise en œuvre. Il est à noter aussi que la rigidité d'un enrobé est très susceptible à la température, mais une diminution de la teneur en vides va amoindrir cette susceptibilité (Di Benedetto et al., 2005).

1.3.2 La chaux hydratée

La chaux hydratée est utilisée dans les enrobés bitumineux depuis plus de 50 ans. Au départ, ce matériau était utilisé dans le but d'améliorer la tenue à l'eau des enrobés. Toutefois, d'autres propriétés, comme le module de rigidité à haute température, se sont avérées améliorées par l'ajout de chaux hydratée, ce qui a pu être évalué et quantifié tant sur des enrobés confectionnés en laboratoire que pour ceux réalisés en chantier (Eula, 2011).

1.3.2.1 Composition de la chaux hydratée

L'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 est le principal composant de la chaux hydratée. Cette dernière est obtenue suite à l'hydratation de la chaux vive, essentiellement constituée d'oxyde de calcium CaO , grâce à un appareil qu'on appelle hydrateur. La chaux vive quant à elle est obtenue en brûlant de la roche calcaire (CaCO_3) à très haute température ($\approx 900^\circ\text{C}$) (Bitume.info, 2012). Il y a plusieurs types de chaux hydratée; la chaux hydratée calcique est la plus utilisée, mais il y a aussi la chaux hydratée dolomitique qui fonctionne de façon similaire. Étant donné sa forme, son origine minérale et la taille des particules, la chaux hydratée est considérée comme une fine minérale dans l'industrie routière selon la norme européenne EN 13108-1 (Eula, 2012).

1.3.2.2 Bénéfices de la chaux hydratée sur l'enrobé

La littérature rapporte que la chaux hydratée dans les enrobés bitumineux permet d'améliorer la durabilité des chaussées. La société des Autoroutes du Nord et de l'Est de la France a pu observer que les enrobés bitumineux de son réseau contenant de la chaux hydratée avaient une durabilité de 20 à 25% supérieure aux autres enrobés bitumineux similaires, mais confectionnés sans chaux hydratée (Eula, 2012). L'ajout de chaux hydratée a des effets bénéfiques en minimisant différents modes de dégradation de l'enrobé soit : le désenrobage, l'orniérage, le vieillissement chimique et la fissuration (Eula, 2011).

Le **désenrobage** est un phénomène qui se produit lorsque le lien unissant les granulats et le bitume diminue. La Figure 1.5 suivante présente une photo de désenrobage qui s'apparente à de l'arrachement des granulats pouvant ensuite dégénérer jusqu'à l'apparition de nids de poule (Eula, 2011).



Figure 1.5 Photo illustrant la dégradation par désenrobage
Tirée de Eula (2011)

Le bitume est un matériau huileux et donc hydrophobe. Cette propriété du bitume lui donne un caractère imperméable, mais elle signifie aussi que le bitume n'adhère pas aussi facilement que l'eau sur les surfaces hydrophiles comme la plupart des granulats. Les granulats hydrophiles ont d'avantage d'affinités pour l'eau que pour le bitume, ce qui peut causer le désenrobage des granulats lorsqu'ils sont exposés à l'eau. L'adhésivité entre les granulats et le bitume dépend aussi de la nature chimique des composants. Les bitumes ont tendance à être chargés légèrement négativement. Il peut donc y avoir des difficultés d'adhésion lorsque la surface des granulats a également tendance à être chargée négativement. Les granulats chargés négativement incluent ceux qui contiennent beaucoup de silice, tandis que les granulats chargés positivement incluent plutôt ceux qui contiennent des carbonates (AkzoNobel, 2008). La chaux hydratée ajoutée aux granulats de l'enrobé bitumineux agit en renforçant les liaisons granulats-bitume. Ce renforcement par la chaux hydratée est dû à un mécanisme de neutralisation des charges négatives de la surface des granulats, formant ensuite un interface d'ions de calcium (Ca^{2+}) autour des granulats. C'est cette interface qui interagit avec les radicaux acides (RCOO^-) du bitume améliorant l'ancrage du bitume par l'entremise d'échanges ioniques, voir Figure 1.6.

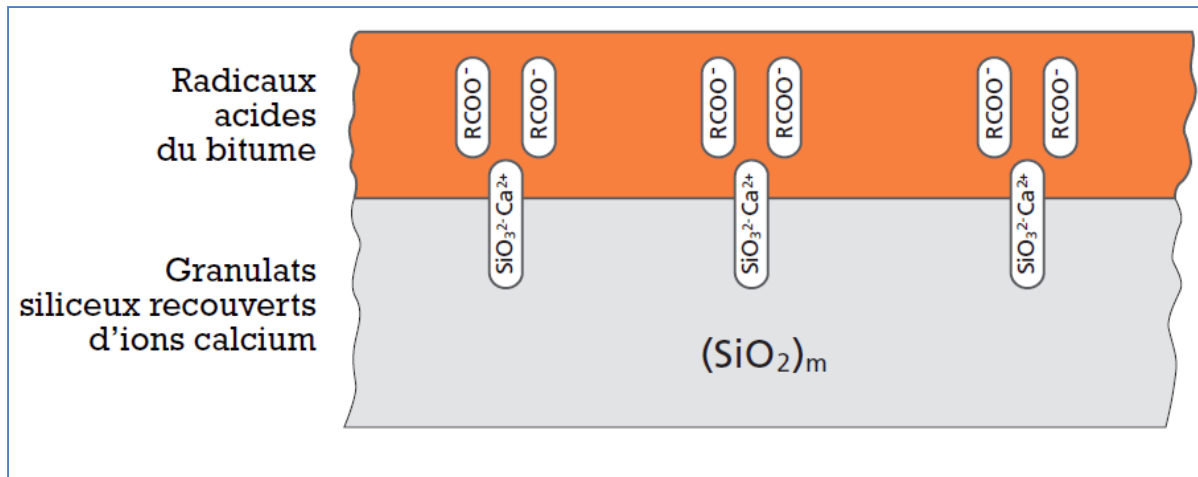


Figure 1.6 Mécanisme d'action de la chaux hydratée sur les liaisons bitume-granulats
Tirée de Bitume.info (2012)

En maximisant ce mécanisme qui agit au niveau de l'interface granulats-bitume, des précipités de carbonate de calcium peuvent apparaître localement ce qui donne des points d'ancrage additionnels pour le bitume. La chaux hydratée présente aussi une certaine réactivité chimique avec le bitume, ce qui n'est habituellement pas le cas des autres particules fines plus conventionnelles. Cette réactivité se manifeste dans le bitume en neutralisant certains composés polaires, indésirables puisqu'ils sont solubles dans l'eau. De plus, la chaux hydratée dans le bitume provoque la formation de sels de calcium insolubles dans l'eau. Ces sels insolubles aident à garder l'eau hors du système, ce qui augmente la résistance au désenrobage du mélange bitumineux (Bitume.info, 2012).

L'**orniérage** est un autre mode de dégradation des chaussées très important à considérer. Il s'agit de déformations permanentes des chaussées se traduisant par des tassements qui apparaissent en surface de la chaussée et qui s'apparentent à des traces de roues. Les principaux facteurs responsables sont le trafic lourd, intense et lent ainsi que les températures élevées de la chaussée. La Figure 1.7 suivante représente le phénomène d'orniérage sur une chaussée (Eula, 2011).



Figure 1.7 Dégradation due à l'orniérage
Tirée de Eula (2011)

Tel que déjà mentionné, la chaux hydratée neutralise certains composés polaires dans le bitume. Ce mécanisme permet aussi d'augmenter le module d'élasticité à haute température. Une plus grande rigidité à haute température permet entre autre d'obtenir une meilleure résistance à l'orniérage (Eula, 2011).

Le *vieillissement chimique* du bitume dans l'enrobé est dû à des réactions d'oxydation qui durcissent le bitume et diminuent la capacité de relaxation du liant sous contrainte. L'enrobé bitumineux se trouve donc ainsi fragilisé et de petits réseaux de fissures risquent de se développer plus facilement. La Figure 1.8 présente une photo d'une chaussée fragilisée probablement suite au vieillissement chimique du bitume.



Figure 1.8 Dégradation causée par le vieillissement chimique
Tirée de Eula (2011)

Les composés polaires du bitume sont plus sensibles à l'oxydation. C'est encore une fois la neutralisation de ces derniers par la chaux hydratée qui rend le bitume moins vulnérable à l'oxydation (Eula, 2011).

La **fissuration** dans les enrobés bitumineux est un phénomène de dégradation qui peut être dû au vieillissement du bitume, mais aussi à l'accumulation de petites déformations (fatigue) et/ou des contraintes thermiques liées aux changements de température. La Figure 1.9 présente une photo de dégradation par fissuration.



Figure 1.9 Dégradation par fissuration
Tirée de Eula (2011)

Les phénomènes de fissuration de la chaussée débutent souvent par l'apparition de microfissures qui cherchent ensuite à se propager. Éventuellement, les microfissures s'unissent pour former des macrofissures. La chaux hydratée agit en ralentissant d'avantage la propagation des microfissures qu'un filler inerte standard. En effet, la couche de bitume lié à la surface des particules de chaux hydratée, suite à la réaction bitume-chaux, forme une plus grande fraction volumique faisant obstacle à l'évolution des microfissures (Eula, 2011).

1.3.2.3 Dosages recommandés et méthodes d'application de la chaux hydratée

La plupart des études qui s'intéressent à la chaux hydratée utilisent des dosages variant entre 1 et 1,5% de la masse des granulats secs en chaux hydratée. Les résultats sont généralement plus prononcés avec des dosages plus élevés. L'utilisation de la chaux hydratée dans ces proportions a été fortement utilisée aux États-Unis depuis plus de 40 ans. L'expérience du terrain en Amérique du Nord montre qu'il y a une augmentation de la durabilité des enrobés bitumineux variant entre 2 et 10 ans lorsque la chaux hydratée est utilisée pour ces dosages (Eula, 2012).

Différentes méthodes ont été développées pour bien ajouter de la chaux hydratée à l'enrobé bitumineux. Il est donc possible d'en ajouter directement dans le malaxeur, sous forme de filler ajouté à sec sur des granulats mouillés ou même sous forme de lait de chaux. La littérature à ce sujet ne fait cependant pas clairement ressortir une méthode qui serait plus efficace que les autres et chacune semble permettre d'obtenir les bénéfices attendus par l'ajout de la chaux hydratée dans l'enrobé (Eula, 2012).

1.3.3 Interaction bitume-fines

1.3.3.1 Concept d'adsorption

Il existe un phénomène de surface, entre le bitume d'un enrobé et les particules solides, qu'on appelle l'adsorption. Il s'agit d'atomes ou molécules d'un gaz ou d'un liquide qui se fixent sur une surface solide suites à des interactions électriques de faible intensité connu sous le nom de force de Van der Waals.

En utilisant un solvant, il est possible de fractionner le bitume en deux parties, soit :

- Une fraction dissoute qu'on appelle les maltènes. Ils ont l'aspect d'une huile visqueuse et ils confèrent un comportement de viscosité newtonienne au bitume.
- Une fraction précipitée qu'on appelle les asphaltènes. Ils ont l'aspect d'un solide noir et ils confèrent un comportement élastique au bitume.

C'est la fraction d'asphaltènes qui est principalement adsorbée par la surface des particules solides formant ainsi une mince couche d'adsorbat enrobant chacune des particules. Il a été rapporté, par Tunnicliff en 1962, qu'un gradient d'effet rigidifiant entoure cette mince couche et devient de plus en plus faible en s'éloignant de la particule, tel que présenté à la Figure 1.10 (Tunnicliff, 1962).

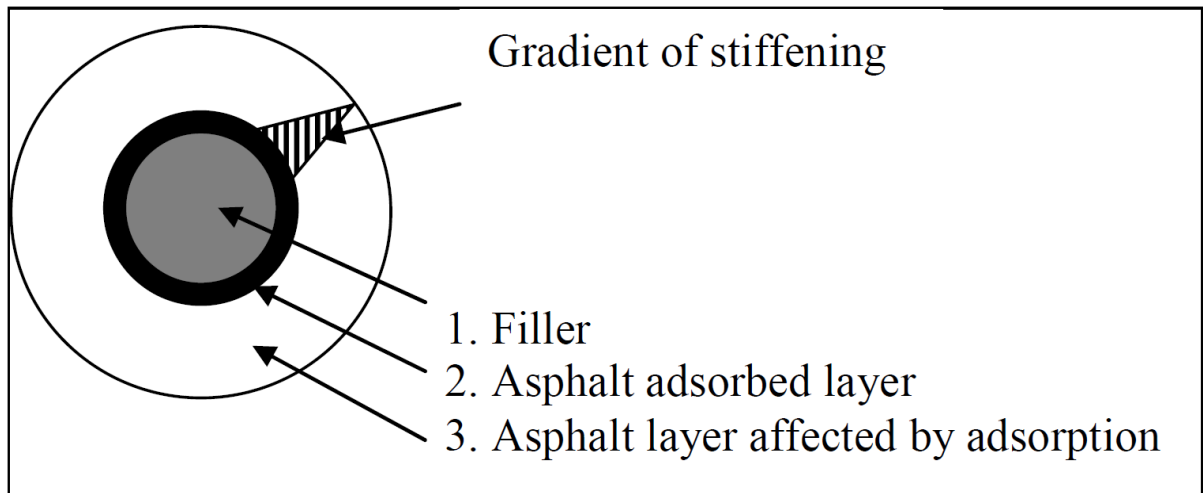


Figure 1.10 Schéma de l'interaction bitume-fine
Adaptée de Tunnicliff (1962)

1.3.3.2 Modèle conceptuel de l'effet rigidifiant des particules fines dans le bitume

En 2010, Faheem et Bahia ont fait le postulat que l'effet rigidifiant des particules fines dépend de sa concentration et de sa minéralogie. Un modèle conceptuel a été défini pour tenter de décrire l'évolution de cet effet rigidifiant. Leurs études indiquent que l'évolution du changement de la rigidité (G^*) du mastic, en fonction de l'augmentation de la concentration des fines, peut être divisé en deux régions, soit : la région diluée et la région concentrée (Figure 1.11). En ce qui concerne la région diluée, les particules fines sont séparées par suffisamment de bitume libre. Le bitume libre peut être défini comme étant le volume de bitume qui ne fait pas partie de la couche d'adsorbat sur chacune des particules. La transition de la région diluée vers la région concentrée est due à la consommation du volume de bitume libre lorsque la concentration de fines atteint un certain point (Faheem et Bahia, 2010).

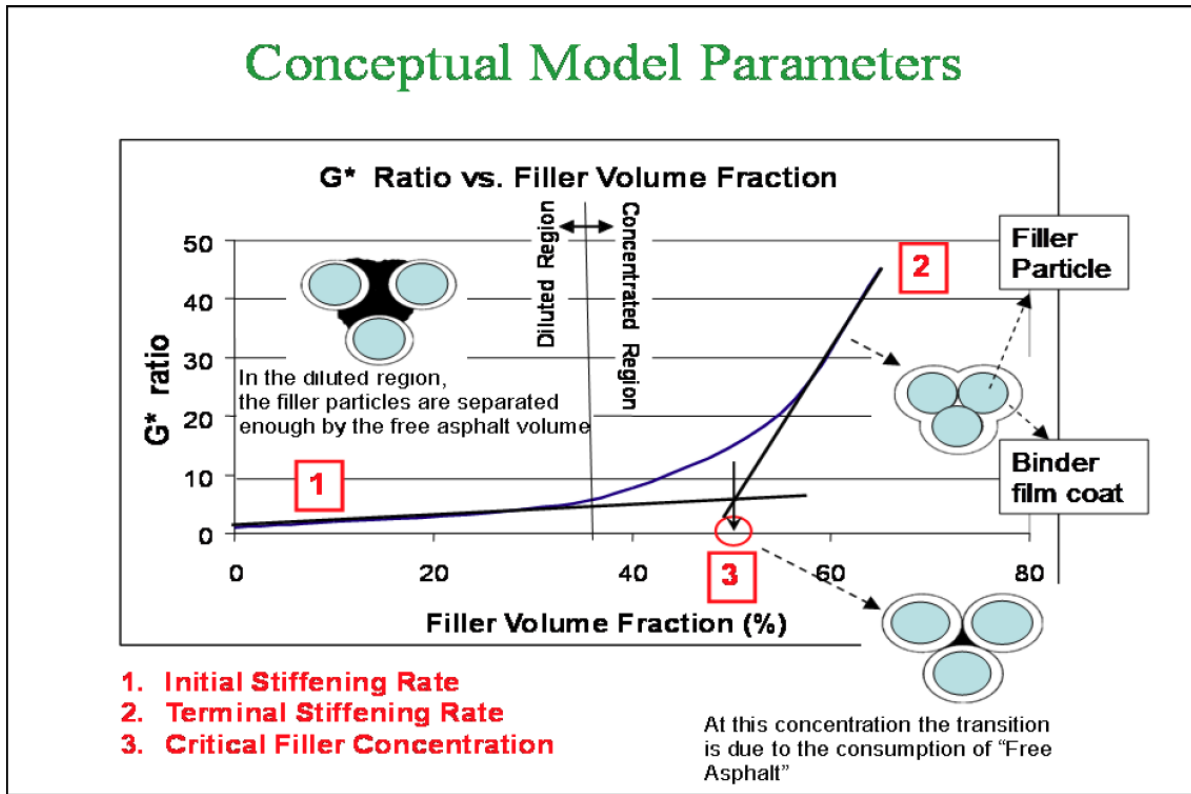


Figure 1.11 Schéma de l'évolution de la rigidité en fonction de la concentration de fines
Tiré de Faheem et Bahia (2010)

En 2014, Robati, Carter et Perraton ont proposé un nouveau modèle conceptuel en ajoutant notamment une nouvelle région au modèle de Faheem et Bahia. Cette région est appelée la région de concentration optimum et elle est située entre la région diluée et la région concentrée. Cette région optimum est décrite par une concentration minimum et maximum de fraction volumique de fines. Le début de la région optimum représente un début d'interaction entre les particules fines et le bitume libre environnant. La fin de la région représente la limite où les particules fines sont complètement enrobées par le bitume libre consommé (Figure 1.12).

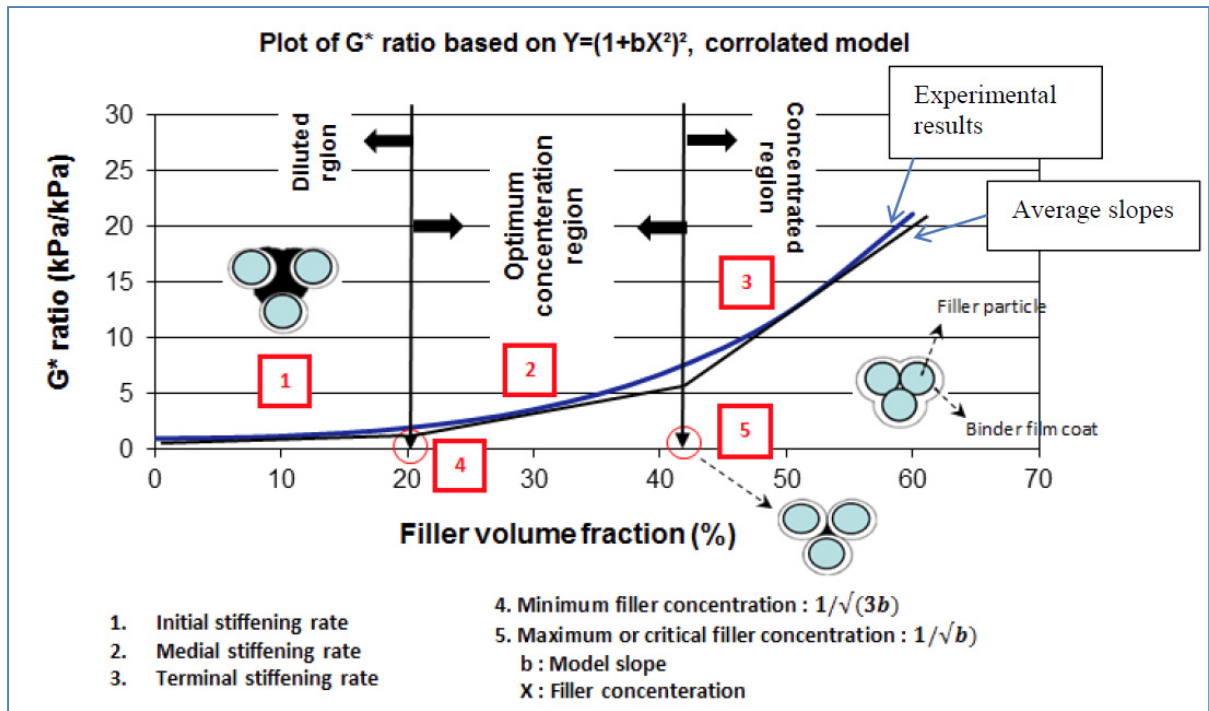


Figure 1.12 Schéma de l'évolution de la rigidité en fonction de la concentration de fines
Tirée de Robati, Carter et Perraton (2014)

Ce nouveau modèle permet de prédire la rigidité d'un mastic pour différentes concentrations de particules fines et il n'utilise seulement qu'un paramètre qui est corrélé avec des propriétés des fines et du bitume. Parmi les différentes propriétés servant à déterminer ce paramètre, il y a notamment :

- Concentration d'asphaltènes (%)
- D10 : Diamètre du tamis au 10% passant (μm)

La concentration d'asphaltènes dans le bitume a une influence proportionnelle sur la rigidité du mastic, tandis que le diamètre du tamis au 10% passant a une influence inversement proportionnelle sur cette rigidité (Robati, Carter et Perraton, 2014). Ces deux comportements cadrent bien avec l'hypothèse que la surface spécifique adsorbante ainsi que la quantité d'adsorbat ont une influence sur l'effet rigidifiant des fines dans le bitume. En considérant l'importance de la surface spécifique adsorbante dans un composé bitume-fines, il peut être intéressant d'utiliser des particules ultrafines ou nanoparticules puisqu'ils ont comme

particularité physique de développer une très grande surface spécifique par volume de matériaux.

1.4 Utilisation du verre concassé dans les enrobés bitumineux

Les sociétés d'aujourd'hui produisent de plus en plus de déchets et une bonne gestion de ces déchets est nécessaire afin de répondre aux pressions à la fois environnementales, économiques et sociales qui pèsent sur nos épaules. Les déchets de verre mixte post-consommation sont souvent rejetés dans des sites d'enfouissement, faute d'avoir des solutions de gestion moins coûteuses pour ces déchets. Il existe toutefois des alternatives où le verre peut être utilisé pour remplacer une portion des matériaux granulaires dans les enrobés bitumineux. Ce type d'enrobé bitumineux est actuellement reconnu sous le nom de *Glasphalt* ou *Glass-asphalt*. Cette section présente quelques propriétés du verre concassé et les performances de plusieurs mélanges de *Glasphalt* ayant été réalisés dans le passé.

1.4.1 Propriétés du verre concassé

Dans la littérature, le verre concassé utilisé dans les enrobés de type *Glasphalt* provient généralement de contenants récupérés comme des bouteilles de bière ou de vins. La nature physique du verre, rigide et fragile, en fait un matériau facile à broyer pour obtenir des particules de la taille recherchée. En ce qui concerne sa nature chimique, le verre est un non-métal inorganique composé majoritairement des principaux oxydes suivants : SiO_2 (77%), Na_2O (9,4%) et CaO (6,7%) (Shaopeng, Wenfeng et Yongjie, 2005). La nature du verre, majoritairement silicieuse (chargé négativement), peut donc nuire au niveau de l'adhérence avec un bitume (chargé négativement), plus particulièrement si le bitume présente un indice d'acidité élevé.

La surface du verre concassé est très lisse et peu poreuse par rapport à un granulat conventionnel, faisant en sorte que les particules de verre absorbent moins le bitume. Dans certains cas, le dosage nécessaire en bitume du *Glasphalt* peut donc être inférieur au dosage

d'un enrobé bitumineux équivalent, mais sans particules de verre. Toutefois, le faible taux d'absorption du bitume peut nuire au bon enrobage des particules de verre. Cependant, il y a moyen de pallier à ce problème d'enrobage en utilisant un adjuvant de type HRD (Haute Résistance au Désenrobage) dans le bitume si ce dernier a de la difficulté à adhérer aux particules de verre (Shaopeng, Wenfeng et Yongjie, 2005).

L'utilisation de particules de verre trop grosses est à proscrire. Étant donné la provenance et la forme du verre réutilisé, le fait de le broyer de façon trop grossière génère des particules plates et allongées, ce qui pourrait réduire la stabilité de l'enrobé, nuire au bon enrobage des particules de verre et même user d'avantage les pneus des usagers dans le cas où le *Glasphalt* est utilisé en couche de roulement. Des essais ont aussi été réalisés à ce sujet en mesurant la stabilité dynamique de deux enrobés de type *Glasphalt*. Les résultats ont été obtenus suite à un test d'orniérage de l'enrobé immergé dans l'eau. L'enrobé contenant des particules de verre d'une taille maximum de 9,5 mm a moins bien performé que l'enrobé contenant des particules d'une taille maximum de 4,5 mm (Shaopeng, Wenfeng et Yongjie, 2005). De plus, il y avait beaucoup plus de surfaces de verre désenrobé pour le mélange avec particules de 9,5 mm tel que présenté à la Figure 1.13 ci-dessous.

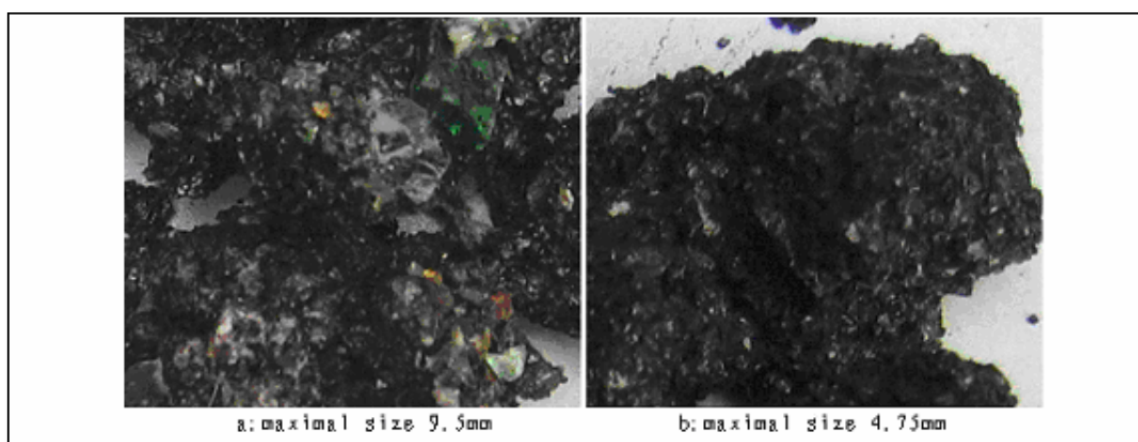


Figure 1.13 Comparaison des surfaces de verre désenrobé
Tirée de Shaopeng, Wenfeng et Yongjie (2005)

La variation du coefficient de dilatation thermique est petite pour les particules de verre concassé (environ $8,8 \times 10^{-6}$ cm/cm/°C à $9,2 \times 10^{-6}$ cm/cm/°C pour des températures inférieures à 700°C). Cette propriété est intéressante pour la résistance aux fissurations à basse température de l'enrobé puisque le changement de volume de l'enrobé en fonction de la température est relativement stable (Shaopeng, Wenfeng et Yongjie, 2005).

Le verre est également reconnu pour ses propriétés isolantes. La conductivité thermique du verre concassé étant plus faible que celle des agrégats naturels conventionnellement utilisés dans les enrobés, les enrobés contenant du verre concassé prennent donc plus de temps à refroidir (Federal Highway Administration). Cette propriété pourrait être intéressante pour réduire la profondeur de gel sous la chaussée et même pour faciliter la mise en place de l'enrobé lorsque celui-ci est compacté à chaud en chantier.

Finalement, le verre concassé, contrairement aux granulats plus conventionnels, a de bonnes propriétés de réflexion de la lumière, ce qui peut se refléter dans les propriétés de l'enrobé si les proportions et les dimensions des particules de verre sont suffisantes (Lu et al., 2011).

1.4.2 Performances des enrobés contenant du verre concassé

1.4.2.1 Résistance au désenrobage

Tel que mentionné précédemment, la surface lisse et peu poreuse du verre en fait un matériau qui a plus de difficulté à bien adhérer avec le bitume. Un bon enrobage et une bonne adhérence entre le bitume et les granulats permettent d'avoir une bonne durabilité en présence d'eau lorsque l'enrobé est soumis à des conditions de saturation. L'ajout d'additifs tel que la chaux hydratée ou un autre adjuvant de type HDR peut améliorer ces propriétés d'adhérence (Shaopeng, Wenfeng et Yongjie, 2005). Ces performances peuvent être évaluées en comparant l'essai de stabilité Marshall humide et sec. Des essais ont donc été réalisés dans cette optique en évaluant trois enrobés. Le premier enrobé contenait 10% de verre concassé avec des particules inférieures à 4,75 mm. Le deuxième mélange était comme le premier,

mais les particules solides ont été traitées avec de la chaux hydratée (2% de la masse de granulats). Le dernier mélange était aussi semblable au premier, mais un additif de type HRD a été ajouté au bitume (0,4% de la masse d'enrobé). Les résultats sont exprimés au Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Performance de stabilité à l'eau pour trois mélanges, bitume de classe 70-100 pour la pénétration (norme NF EN 1426)
Adapté de Shaopeng, Wenfeng et Yongjie (2005)

Mélange #	Additif	Stabilité résiduelle (%)
1	Aucun	79,1
2	2% de chaux hydratée	91,4
3	0,4% HRD	92,3

La stabilité résiduelle est un ratio entre la stabilité avec saturation d'eau et la stabilité sans saturation à 60°C dans les deux cas. Ces résultats montrent que le fait de renforcer le lien entre les particules de verre et le bitume en utilisant les additifs mentionnés permet d'augmenter la durabilité à l'eau (tenue à l'eau) de l'enrobé. Les auteurs soulignent qu'il y a très peu de différence de durabilité à l'eau entre l'enrobé contenant un additif HRD et celui contenant de la chaux hydratée (Shaopeng, Wenfeng et Yongjie, 2005).

1.4.2.2 Résistance à l'orniérage

En premier lieu, la grosseur des particules de verre utilisées a une influence sur la résistance à l'orniérage de l'enrobé. Une étude de Wuhan University of Technology, en Chine, a été faite sur des enrobés contenant des particules de verre d'une grosseur maximale de 9,5 mm et d'autres enrobés incorporant des particules de verre d'une grosseur maximale de 4,75 mm. La comparaison a été faite au niveau des performances à l'orniérage sur des éprouvettes d'enrobé testées en immersion dans l'eau (Hamburg Wheel-Tracking Device). L'enrobé incorporant des particules de verre de 4,75 mm a mieux performé que l'enrobé incorporant des particules plus grossières. Tel que mentionné à la section 1.4.1, les plus grosses particules

de verre ont tendance à avoir des formes plates et allongées, ce qui n'est pas le cas des particules broyées plus finement (Shaopeng, Wenfeng et Yongjie, 2005). Cette morphologie des plus grosses particules peut nuire à la stabilité vis-à-vis les déformations permanentes de l'enrobé lors des essais d'orniérage.

Le rapport de Wuhan University of Technology présente des résultats quant à l'influence de la proportion de verre sur la vulnérabilité de l'enrobé à l'orniérage immergé dans l'eau. Ce même rapport s'intéresse également à l'influence de l'utilisation de chaux hydratée ou d'additif de type HRD sur la résistance à l'orniérage. Les essais pour déterminer l'influence de la proportion de verre sur l'orniérage ont été réalisés sur des enrobés contenant 0%, 5%, 10%, 15% et 20% respectivement de verre concassé.

Le rapport conclut qu'il y a une augmentation des déformations suite à l'orniérage lorsque la proportion de verre concassé est plus importante pour l'enrobé. Toutefois, l'utilisation de chaux hydratée ou d'un additif de type HRD permet de ramener ces déformations à un niveau semblable à celles obtenues pour l'enrobé ne contenant pas de particules de verre. Les auteurs concluent que c'est l'utilisation d'un additif de type HRD qui donne les meilleurs résultats (Shaopeng, Wenfeng et Yongjie, 2005). En utilisant un additif de type HRD, il est donc possible d'obtenir de bonnes performances à l'orniérage tout en utilisant du verre concassé.

En 1983, la firme d'ingénieurs Christman Associates, Inc. a travaillé avec la ville de Baltimore pour fabriquer des enrobés incorporant des particules de verre. Des enrobés contenant 50% de verre concassé ont été testés, mais ces derniers ne résistaient pas bien à l'orniérage. Il a été établi de cette étude qu'il valait mieux limiter la proportion massique de verre dans l'enrobé à des dosages inférieures à 25%. Des enrobés confectionnés suivant ces limites, ont pu rencontrer les spécifications requises pour être jugés acceptables (Dembicki, 1992). Toutefois, le rapport ne fait pas état du recours à un quelconque additif promoteur d'adhésion.

1.4.2.3 Réflexion de la lumière

Une autre étude des performances du *Glasphalt* réalisée par certains membres de l'Université de Tongji, en Chine, s'est intéressée aux propriétés de réflexion de la lumière des enrobés contenant du verre concassé. En théorie, une formulation d'enrobé réfléchissant mieux la lumière permet de diminuer l'augmentation de sa température durant le jour et d'augmenter la visibilité de la chaussée la nuit. Des résultats concernant la réflexion de la lumière ont été obtenus sur trois mélanges et ils indiquent que la quantité de verre concassé ainsi que la grosseur des particules sont deux facteurs favorisant la capacité à réfléchir la lumière de l'enrobé bitumineux (Lu et al., 2011).

1.4.2.4 Mise en oeuvre

Un rapport de recherche sur le *Glasphalt*, provenant de l'état de la Virginie, rapporte que l'utilisation de verre dans l'enrobé a tendance à réduire le pourcentage de vides mesuré pour des briquettes Marshall. La teneur optimale en liant nécessaire à une bonne compaction en est aussi réduite. Les enrobés testés contenaient respectivement 5% et 15% de particules de verre (Kandhal, 1993). La surface lisse et le faible taux d'absorption en bitume des particules de verre pourraient expliquer ces résultats.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE, PROGRAMME DE RECHERCHE ET PLAN DE TRAVAIL

Dans ce chapitre, il est question de bien mettre en évidence les objectifs visés par cette campagne expérimentale ainsi que les méthodes de travail et stratégies utilisées. L'objectif général de ce programme de recherche est de formuler un enrobé bitumineux suivant le concept d'un EBHP. Il s'agit donc d'un enrobé constitué d'un squelette granulaire dont le contact gros-sur-gros est maximisé, de manière à ce que le module complexe soit le plus élevé possible. Dans un premier temps (Phase I), l'effet de différents composants de formulation de l'enrobé a été étudié. Cette étude préliminaire a servi à mieux cibler certains composants ayant un impact positif sur la rigidité et/ou la maniabilité dans un contexte de formulation d'EBHP. Dans un deuxième temps (Phase II), une formulation finale d'EBHP a été réalisée en se basant sur les résultats de la première phase. Les différentes propriétés d'usage de cette formulation finale ont ensuite été déterminées par des essais en laboratoire. Dans cette situation, les propriétés considérées sont :

1. Le module complexe
2. La résistance à la fatigue
3. La résistance au retrait thermique empêché
4. La résistance à l'orniérage.

2.1 Méthodologie proposée pour la formulation du EBHP et formulation de référence

Avant d'entamer la phase I, qui consiste à étudier l'effet de différents composants de formulation dans un EBHP, un premier enrobé de référence a été réalisé suivant la méthodologie de formulation d'EBHP proposée dans cette section. Dans l'ensemble, le combiné granulaire est considéré suivant trois dimensions distinctes, soit : 1) la fraction grossière, 2) la fraction intermédiaire et 3) la fraction fine. Les particules de la fraction plus grossière sont bien en contact les unes sur les autres et forment la macrostructure du squelette granulaire qui peut reprendre ainsi une bonne partie des contraintes. La fraction intermédiaire

doit être choisie en fonction de la fraction grossière en prenant soin de limiter les effets de parois et d'interférence entre les deux (voir Figure 1.3). Son rôle principal est de remplir les interstices formés entre les grosses particules. La fraction fine a un rôle similaire à la fraction intermédiaire, mais à une plus petite échelle. Les fines ont aussi une influence importante sur le comportement du mastic qui est l'amalgame de bitume et de fines. Dans le but d'atténuer les effets de paroi et d'interférence tel que mentionné précédemment à la section 1.2.2.2, il est suggéré de limiter le diamètre moyen des particules intermédiaires à 10% de celui des grosses particules ($d_{\text{int.}} \leq 0.10 d_{\text{gros}}$) et le diamètre des particules fines à 10% de celui des particules intermédiaires ($d_{\text{fines}} \leq 0.10 d_{\text{inter}}$) (Perraton, Meunier et Carter, 2007).

Contrairement aux méthodes de formulation utilisées au Québec comme la formulation LC du MTQ, la méthode d'EBHP ne fixe pas un fuseau granulométrique et un volume de bitume effectif (V_{be}). Cette méthode vise plutôt à optimiser les proportions des différentes particules solides de façon à maximiser les contacts gros-sur-gros du squelette granulaire suivant la grosseur nominale maximale (GNM) de l'enrobé formulé. Le volume de bitume effectif (V_{be}) est ensuite déterminé en fonction du volume restant à combler, formé par les interstices du squelette granulaire optimisé, moins le volume des vides final voulu dans l'enrobé.

L'optimisation granulométrique est réalisée suite à l'analyse de résultats d'essais en laboratoire visant à déterminer la teneur en vides pour différent combinés de particules solides. Tel que présenté à la section 1.2.2.3, les principes proposés par Baron permettent de décrire la variation de l'indice des vides (e) en fonction des proportions de particules pour un combiné binaire unidimensionnel. L'approche consiste à décrire cette variation à l'aide de trois équations formant des droites. C'est en trouvant les équations de ces trois droites qu'il est possible de trouver le point optimum permettant de se soustraire le plus possible aux effets de paroi et d'interférences. La connaissance de ce point optimum (point p_s de la Figure 1.4) permet ainsi de maximiser le contact entre les plus grosses particules (contact gros-sur-gros). Dans le but de mettre en application les principes proposés par Baron, la variation de l'indice des vides pour différentes proportions de particules a été évaluée, en considérant

l'essai de compaction à la presse à cisaillement giratoire sur matériaux secs à 80 girations. Pour les matériaux utilisés dans ce projet, un calcaire 10-14mm et un sable de verre (Sable C) ont été utilisés. Il a pu être observé qu'une compaction à sec de 200 girations change très peu la granulométrie de ces matériaux. Les essais de PCG sur matériaux secs ont toutefois été arrêtés à 80 girations pour limiter les phénomènes d'attrition, d'abrasion et de fracturation tout en étant près de la teneur en vides minimale atteignable.

2.1.1 Optimisation granulométrique : interaction des particules grosses et intermédiaires

Suivant la méthode d'optimisation granulométrique proposée et vue à la §1.2.2, une première analyse est effectuée sur l'interaction entre les particules grosses et intermédiaires. Tel que mentionné précédemment, l'idée est de déterminer les trois droites introduites à la Figure 1.4 (§1.2.2.3). Les paramètres de l'équation de ces droites peuvent être déterminés en utilisant la teneur en vides des trois essais de PCG suivants :

- **Essai #1** : Réalisé avec 100% de grosses particules
- **Essai #2** : Réalisé avec 100% de particules intermédiaires
- **Essai #3** : Réalisé avec 40% de grosses particules et 60% de particules intermédiaires

La droite de l'équation (1.1) peut être résolue en utilisant les résultats des essais #2 et #3 qui représentent deux points sur une droite. Le coefficient de l'effet de paroi "D" peut ensuite être déterminé avec l'équation (1.1). La droite de l'équation (1.2) peut facilement être déterminée puisque l'inconnu "G" est le résultat de l'essai #1. Pour trouver la droite de l'équation (1.3), on utilise tout d'abord l'équation (1.4) pour trouver le seuil critique p_i pour ensuite résoudre la droite (1.3) sachant qu'elle passe par l'origine et le seuil critique p_i . Le point optimum choisi, représentant les proportions du combiné de particules grosses-intermédiaires, est le seuil critique p_s puisqu'il faut éviter le desserrement des grosses particules dû à la présence de l'effet d'interférence entre les seuils critiques p_i et p_s . Le point p_s représente une proportion plus élevés de grosses particules que le point p_i et il est déterminé en trouvant l'intersection des équations (1.2) et (1.3).

2.1.2 Optimisation granulométrique : interaction du combiné de particules grosses-intermédiaires et des particules fines

Une deuxième analyse est effectuée sur l'interaction entre l'optimal du combiné de particules grosses-intermédiaires et de particules fines. Tout comme pour la première analyse, les essais de PCG suivants sont exécutés :

- **Essai #1** : Réalisé avec 100% de l'optimum du combiné de particules grosses-intermédiaires qui a été déterminé dans un premier temps
- **Essai #2** : Réalisé avec 100% de particules fines
- **Essai #3** : Réalisé avec 40% du combiné de particules grosses-intermédiaires et 60% de particules fines

Les trois droites peuvent être à nouveau précisées en considérant ce nouveau mélange binaire suivant la même méthode qui a été présentée pour la première analyse (§2.1.1). Les proportions correspondant au seuil critique p_s de cette deuxième analyse sont retenues pour déterminer les proportions du squelette granulaire optimisé pour le combiné de particules grosses-intermédiaires-fines, soit la granulométrie finale de la formulation d'EBHP.

2.1.3 Synthèse des étapes de formulation de l'EBHP

Dans son ensemble, la méthodologie de formulation de l'EBHP peut être divisée en 4 étapes. La Figure 2.1 présente ces étapes et fait en même temps un récapitulatif des éléments les plus importants à retenir.

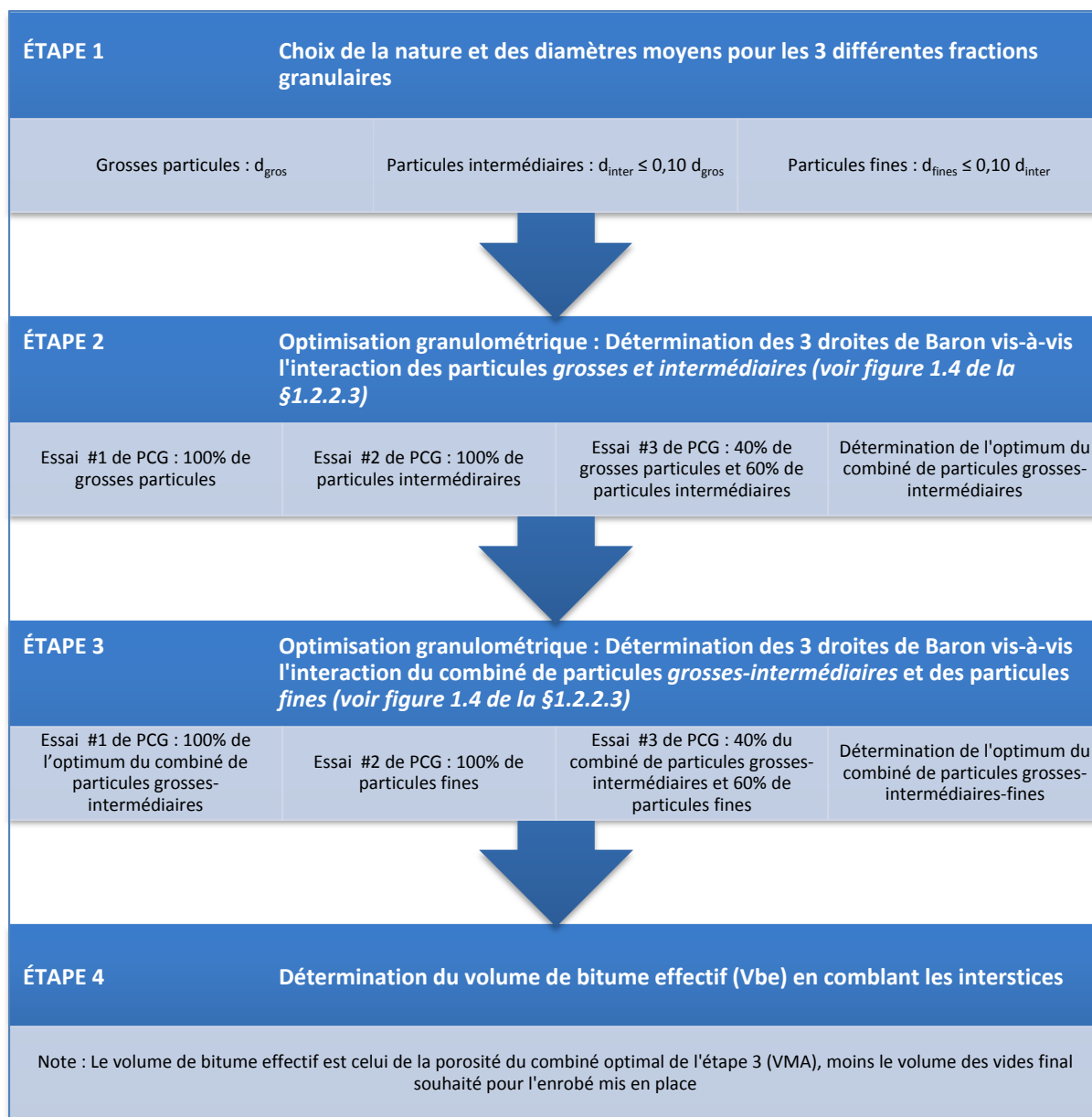


Figure 2.1 Schéma récapitulatif des étapes de formulation d'un EBHP

2.1.4 Formulation de base

Une première formulation a été réalisée dans le but de servir de référence pour les analyses comparatives de la première phase du projet. Les sous-sections qui suivent expliquent certains choix qui ont dû être faits.

2.1.4.1 Squelette granulaire de l'EBHP formulé

La grosseur nominale maximale (GNM) de l'enrobé étudié a été établie à 14 mm (EBHP-14). En consultant le guide des critères de sélection des enrobés du MTQ, l'EBHP-14 devrait être semblable au ESG-14 en termes de critères d'usage. L'EBHP-14 pourrait donc remplir le rôle de couche de base, couche unique et couche de surface tout en offrant des performances supérieures à un ESG-14 conventionnel pour les propriétés d'usage mentionnées précédemment.

Parmi tous les enrobés réalisés lors de ce projet, le volume de liant ainsi que la granulométrie sont des paramètres de formulation qui sont restés inchangés. Il y a trois fractions granulaires qui composent le squelette granulométrique, soit : les grosses particules, les particules intermédiaires et les particules fines. Les grosses particules sont constituées de calcaire 10-14 mm afin de respecter le GNM établi au départ. Les dimensions des particules fines et intermédiaires ont été choisies de manière à minimiser les interactions d'effet de paroi et d'interférence. En effet, tel que vu à la section 1.2.2.2, plus le rapport des diamètres moyens (d/D) entre deux groupes de particules est petit, moins il y a d'effet de paroi et d'interférence donc plus dense est l'empilement granulaire. À titre informatif, le rapport des diamètres (d/D) entre chacun des groupes de particules choisis est de 0,04. Ensuite, le choix des proportions de particules est établi en fonction de la méthode d'optimisation granulométrique décrite plus tôt dans cette section.

2.1.4.2 Utilisation de particules de verre

La formulation de base est composée de particules fines et intermédiaires en verre concassé. En plus de l'aspect écologique de réutilisation du verre, il pourrait y avoir des avantages à utiliser ce type de particules puisque leur faible taux d'absorption devrait aider à réduire la teneur en bitume nécessaire à l'enrobé et augmenter aussi la maniabilité lors de la mise en place. Ces hypothèses pourront être validées durant l'analyse des essais réalisés lors de la phase I. D'un point de vue logistique, le fournisseur des particules de verre concassé

(Tricentris de Lachute au Québec) est en mesure de produire une grande variété de dimensions de particules, ce qui permet de donner beaucoup de liberté au concepteur lorsque vient le temps d'optimiser le squelette granulaire d'un enrobé. Afin de minimiser quelques impacts négatifs de l'utilisation du verre, tels que la présence de particules plates et allongées pour les particules plus grossières ($>4,75\text{mm}$) et la fragilité du verre, on a choisi d'encapsuler de petites particules de verre ($<630\mu\text{m}$) dans les interstices formés par des grosses particules de calcaire. Ainsi, la petite taille des particules devrait permettre d'éviter les formes plates et allongées. Finalement, il devrait y avoir moins de concentration de contraintes dans les particules de verre vu leur taille, leur nombre et leur emplacement.

2.2 Programme de recherche et plan de travail

Ce projet peut être divisé en deux phases. La phase I, consiste à évaluer différents composants de formulation qui sont susceptibles d'apporter un gain significatif quant à la rigidité et la maniabilité de l'enrobé. La phase II vise à réaliser une formulation finale d'EBHP en se basant sur les données recueillies en phase I. Cette dernière formulation est ensuite caractérisée au niveau de ses propriétés thermomécaniques.

2.2.1 Programme de recherche et stratégies – Phase I

Le choix des composants de formulation étudiés dans le cadre de la phase I est en partie fondé sur ce qui a été mis en perspective lors de la revue de la littérature du premier chapitre. Différents paramètres de formulation ont été étudiés dans le but de déterminer leur influence sur la maniabilité et la rigidité de l'enrobé. L'évaluation des différents paramètres se fait par une analyse comparative entre l'enrobé de référence formulé au début de la Phase I et les autres enrobés ayant subi une modification d'un paramètre. Essentiellement, deux caractéristiques sont évaluées pour chacun des paramètres, soit : 1) l'aptitude au compactage par l'essai de la presse à cisaillement giratoire et, 2) la rigidité par l'essai de module complexe. Étant donné le nombre élevé de formulations réalisées, il a été convenu pour des raisons d'efficacité de mesurer le module complexe à partir d'une seule éprouvette carottée à

même la briquette de PCG, obtenue suite à l'essai d'aptitude au compactage de l'enrobé. Un des avantages de cette façon de procéder est de minimiser l'impact de la teneur en vides sur les résultats de module complexe en ayant des densités très semblables parmi les différentes éprouvettes testées. Les briquettes de PCG ont été carottées après 200 girations de compaction permettant ainsi d'atteindre une teneur en vides minimale dans l'éprouvette. Les paramètres évalués et autres stratégies utilisées sont détaillés dans les sous-sections qui suivent.

2.2.1.1 L'influence de l'utilisation de nanoparticules remplaçant un volume du filler

Il a été relevé dans la littérature qu'il existe un phénomène de surface dans l'interaction fines-bitume qu'on appelle l'adsorption. Un effet rigidifiant du mastic découlerait de cette interaction. Puisque c'est un phénomène de surface et que la quantité de surface spécifique des particules fines joue un rôle très important, la stratégie utilisée pour l'évaluation de ce paramètre est de remplacer une partie du volume des fines de la formulation d'EBHP de référence par des particules beaucoup plus petites de l'ordre du nanomètre (fumée de silice 100 à 200 nm). Les formulations confectionnées ainsi devraient contenir des fines présentant une plus grande surface spécifique, augmentant ainsi l'importance du phénomène d'adsorption. L'influence de ce phénomène sur la rigidité de l'enrobé sera ensuite évalué.

2.2.1.2 L'influence de la nature des granulats (comparaison verre et calcaire)

L'utilisation de verre concassé semble, selon la revue de la littérature, être une bonne solution pour favoriser la mise-en-œuvre de l'enrobé bitumineux tout en ayant une quantité réduite de bitume et en rencontrant les spécifications de performances requises. On tentera toutefois de valider en partie cette hypothèse en confectionnant de nouveaux mélanges où le verre de l'une des fractions granulométriques de la formulation de référence est remplacé par des particules de calcaire de granulométrie identique. Le volume de bitume total étant le même pour tous les mélanges.

2.2.1.3 L'influence de l'utilisation de chaux hydratée remplaçant un volume des fines

La revue de la littérature mentionne plusieurs bénéfices concernant l'utilisation de chaux hydratée dans l'enrobé bitumineux. Il y a notamment la résistance à l'orniérage, la résistance au désenrobage, la résistance à la fissuration et l'augmentation de la rigidité à haute température. L'influence de l'utilisation de la chaux hydratée sera évaluée en confectionnant un mélange d'enrobé pour lequel un certain volume des fines de l'enrobé de référence est remplacé par un même volume de chaux hydratée. Une proportion d'utilisation qui ressort souvent dans la littérature est de 1,5% de chaux hydratée par rapport à la masse de granulats.

2.2.1.4 L'influence de la nature du liant utilisé

La nature du liant fait partie des principaux paramètres de composition ayant une influence sur la rigidité de l'enrobé. Puisque ce paramètre est plus général et ne met pas l'emphasis sur l'utilisation d'un matériau en particulier, 2 bitumes différents et un additif seront testés. La formulation de référence contient un bitume 76-28P de McAsphalt qui devrait offrir une bonne rigidité ainsi qu'une excellente résistance à la fatigue étant donné qu'il contient des polymères. Cette formulation sera comparée dans un premier temps à une autre formulation réalisée avec un bitume expérimental 88-28 de Bitumar. Le bitume 88-28 devrait permettre à l'enrobé d'obtenir une excellente rigidité, mais la résistance en fatigue pourrait être inférieure à celle obtenue avec le bitume 76-28P puisque le 88-28 a une recouvrance élastique de 76,3% (LC 25-005). Dans un deuxième temps, la formulation de référence sera comparée à une autre formulation contenant le même bitume 76-28P, mais ayant subi des ajouts d'additifs élastomères. Les additifs sont ajoutés sous forme de granules durant le malaxage de l'enrobé et ils contiennent du Styrène-Butadiène-Styrène (SBS). Le fournisseur de cet additif affirme qu'en remplaçant seulement 5% du bitume par ces granules, il pourrait y avoir augmentation des propriétés élastiques de l'enrobé, augmentation de la rigidité, augmentation de la résistance à l'orniérage et augmentation de la résistance en fatigue. Les proportions d'utilisation recommandées par le fournisseur pour ce projet visent à remplacer 12,5% de la masse de bitume par les granules de SBS. Notons que cette valeur a été déterminée suivant

des essais de laboratoire effectués en France par le groupe Eiffage Travaux Publics à partir d'un échantillon du bitume utilisé dans le cadre de ce projet. D'un point de vue logistique, cette façon de modifier la nature du bitume lors du malaxage permet d'améliorer les propriétés du bitume en chantier de façon précise.

2.2.1.5 Plan de travail – Phase I

La Figure 2.2 présente schématiquement les étapes du déroulement de la première phase du projet.

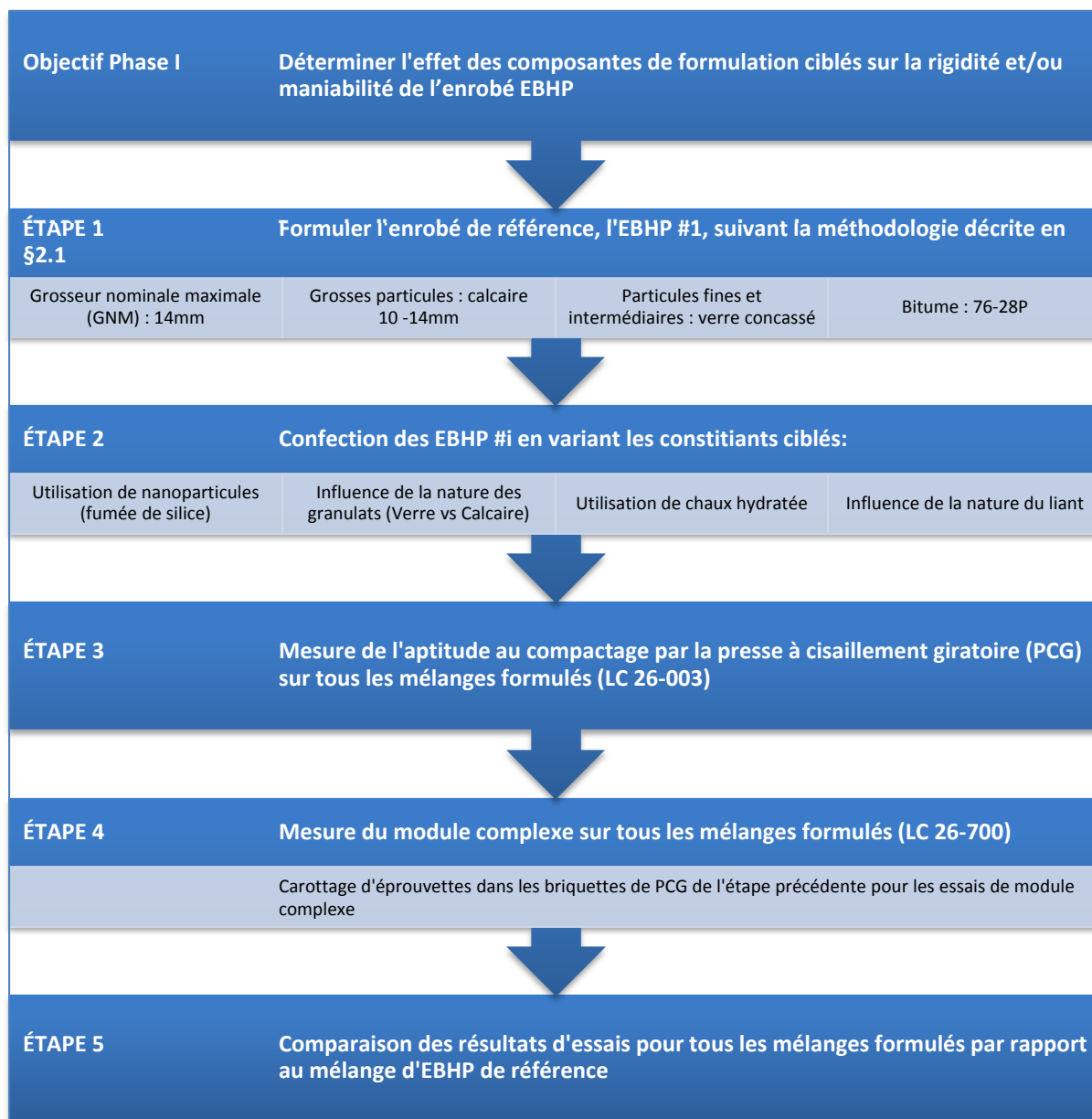


Figure 2.2 Schéma illustrant les étapes du déroulement de la première phase du projet

2.2.2 Programme de recherche et stratégies – Phase II

À partir de l'analyse des résultats de la phase I, une des formulations d'EBHP a été sélectionnée en considérant ses performances aussi bien d'un point de vue de la rigidité que de la maniabilité. Outre la rigidité et la maniabilité de l'enrobé, d'autres propriétés d'usage comme la résistance en fatigue, la résistance aux fissurations à basse température et la résistance à l'orniérage doivent être considérées lorsqu'il s'agit de concevoir une chaussée résistante et durable dans le temps. Dans cette perspective, la phase II du projet d'étude vise à évaluer les performances thermomécaniques de l'enrobé sélectionné par l'entremise d'essais en laboratoire. Une fois les résultats d'essais analysés, les propriétés d'usage de l'EBHP formulé au cours de la phase II, seront comparées avec celles d'un enrobé ESG14 couramment utilisé au Québec.

2.2.2.1 Plan de travail – Phase II

Une représentation schématique de la deuxième phase du projet se trouve à la Figure 2.3.

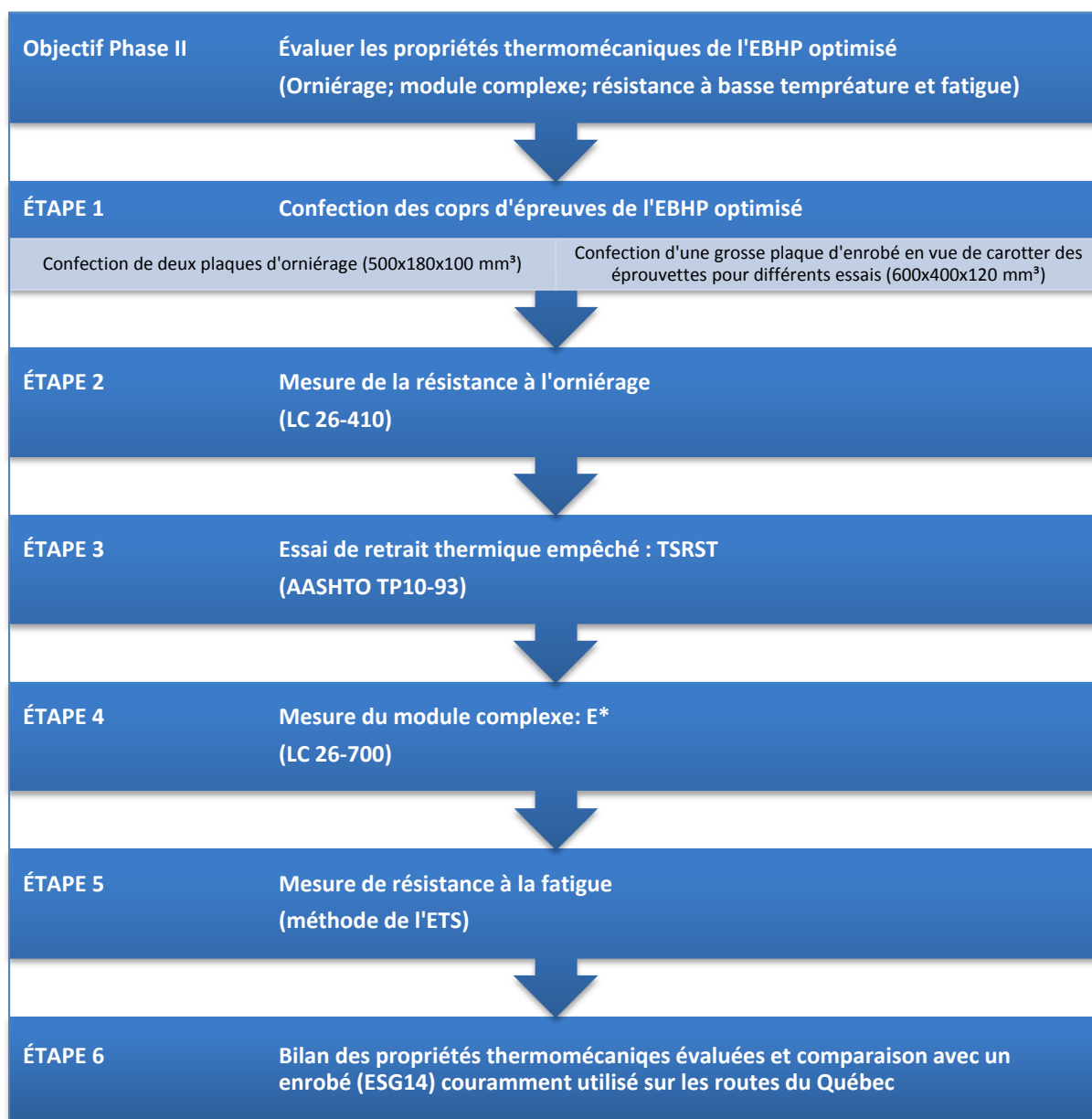


Figure 2.3 Schéma illustrant les étapes du déroulement de la deuxième phase du projet

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DES MATÉRIAUX, DES ENROBÉS BITUMINEUX CONFECTIONNÉS ET DES PRINCIPALES MÉTHODES D'ESSAIS

Tel que présenté plus tôt lors de la description du programme de recherche, l'objectif général est de formuler un enrobé bitumineux suivant le concept d'un EBHP, c'est-à-dire un enrobé constitué d'un squelette granulaire dont le contact gros-sur-gros est maximisé, de manière à ce que le module complexe soit le plus élevé possible. Pour répondre à cet objectif, différents matériaux ont été caractérisés et ensuite utilisés dans la confection de diverses formulations. Ce chapitre vise donc à présenter les principales caractéristiques des matériaux utilisés, les composants des formulations d'enrobés confectionnés ainsi qu'une description des principales méthodes d'essais utilisées dans ce programme expérimental.

3.1 Matériaux granulaires

Les matériaux granulaires sont présentés suivant trois catégories en fonction de leurs dimensions, soit : 1) particules grossières où le contact gros-sur-gros est maximisé au sein du squelette granulaire, 2) les particules de taille intermédiaire servant à combler les vides entre les grosses particules et, 3) les particules fines qui viennent combler une portion des vides restants et qui forment avec le bitume un mastic. La Figure 3.1 présente la granulométrie des trois fractions granulaires utilisées pour former le squelette granulaire de la formulation d'EBHP de référence.

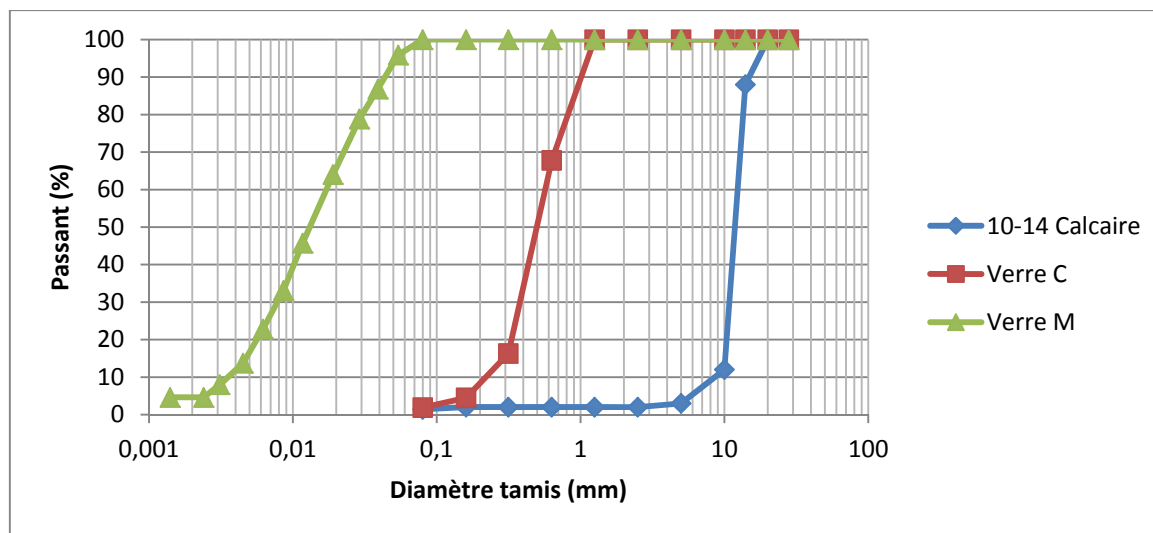


Figure 3.1 Courbes granulométriques des particules du squelette granulaire de l'EBHP de référence

La granulométrie des particules de dimensions supérieures à 80 μm a été déterminée par tamisage par la méthode d'essai LC 21-040. En ce qui concerne la granulométrie des particules inférieures à 80 μm , celle-ci a été déterminée par sédimentométrie à l'aide de la méthode d'essai BNQ 2501-025. Avoir les dimensions granulométriques des particules utilisées est nécessaire pour atteindre les objectifs visés lors de l'optimisation du squelette granulaire.

3.1.1 Grosses particules

Les grosses particules ayant été utilisées pour ce programme de recherche sont de calibre 10-14 mm et leurs nature minéralogique est le calcaire. Le granulat 10-14 a été échantillonné à la carrière DJL à St-Philippe de Laprairie. Afin de valider les propriétés physiques du granulat échantillonné, des essais de granulométrie (LC 21-040), densité et absorption (LC 21-067) ont été faits par le laboratoire de Solmatech. Le Tableau 3.1 présente les résultats obtenus.

Tableau 3.1 Caractéristiques physiques des granulats 10-14 mm

Tamis (mm)	20	14	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,160	0,080
% passant	100	88	12	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,4
Densité brute (d _{gb}) : 2,729							(LC 21-067)			
Absorption : 0,58%										
Nature minéralogie : Calcaire										
Provenance : Carrière DJL à St-Philippe de Laprairie										
Diamètre moyen ¹ : 9,36 mm										

3.1.2 Particules intermédiaires

Les particules intermédiaires utilisées ont une dimension comprise entre 315-630 μm . Rappelons qu'un écart important sépare les diamètres moyens des particules grosses, intermédiaires et fines afin de minimiser le plus possible les effets de parois et d'interférence au sein du squelette granulaire. Deux sources de particules intermédiaires ont été utilisées pour la confection des EBHP, soit un sable de verre et un sable de pierres concassées.

Le sable de verre est un verre mixte concassé obtenu du centre de tri appelé Tricentris, à Lachute. Ces particules sont désignées tout au long de ce projet par le nom de «Sable de verre C». Des essais de granulométrie (LC 21-040), densité et absorption (LC 21-065) ont également été faits sur le sable de verre C par le laboratoire Solmatech. Le Tableau 3.2 ci-dessous présente les résultats obtenus et la Figure 3.2 présente une photo du sable de verre C.

¹ Diamètre moyen déterminé en calculant la moyenne des dimensions de mailles des tamis au prorata du pourcentage de particules retenues sur chacun de ces tamis

Tableau 3.2 Caractéristiques physiques du sable de verre C

Tamis (mm)	20	14	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,160	0,080
% passant	100	100	100	100	100	100	68	16	4,5	1,9
Densité brute (d _{gb}): 2,511							(LC 21-065)			
Absorption : 0,00%										
Nature : Verre mixte concassé										
Provenance des particules : Verre concassé du centre de tri Tricentris à Lachute										
Diamètre moyen : 0,39 mm										



Figure 3.2 Photo du sable de verre C vis-à-vis une pièce de 2 dollars canadiens

La deuxième source de particules intermédiaires a été échantillonnée à la carrière DJL à St-Philippe de Laprairie et il s'agit de granulats de calibre 0-5 mm. Leur nature minéralogique est le calcaire. Des essais de granulométrie (LC 21-040), densité et absorption (LC 21-065) ont été faits sur ces particules par le laboratoire Solmatech. Après l'échantillonnage, les granulats 0-5 mm ont été tamisés afin d'obtenir exactement la même granulométrie que celle du sable de verre C (calibre de 315-630 μm). Le Tableau 3.3 présente les résultats obtenus.

Tableau 3.3 Caractéristiques physiques des particules intermédiaires de calcaire

Tamis (mm)	20	14	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,160	0,080
% passant	100	100	100	100	100	100	68	16	4,5	1,9
Densité brute (d _{gb}): 2,713						(LC 21-065)				
Absorption : 0,44%										
Nature minéralogie : Calcaire										
Provenance : Carrière DJL à St-Philippe de Laprairie										
Diamètre moyen : 0,39 mm										

3.1.3 Particules fines

Différentes sources de particules fines, c'est-à-dire les particules de dimension inférieure à 80 μm , ont été utilisées dans le cadre de ce projet. Toutes les fines utilisées n'ont pas exactement la même granulométrie étant donné les difficultés logistiques à contrôler la dimension de telles particules. Néanmoins, les granulométries qui divergent ne devraient pas avoir trop d'influence sur la stabilité du squelette granulométrique étant donné que cette stabilité est en grande partie assurée par l'agencement des particules grosses et intermédiaires.

La principale source de particules fines provient d'un verre mixte concassé produit par le centre de tri Tricentris. Ces particules sont désignées tout au long de ce projet par le nom de «Poussière de verre M». Des essais de sédimentométrie (BNQ 2501-025) et de densité (BNQ 2501-070) ont été faits sur la poussière de verre M par le laboratoire Solmatech. Le Tableau 3.4 ci-dessous présente les résultats obtenus et la Figure 3.3 qui suit est une photo de la poussière de verre M.

Tableau 3.4 Caractéristiques physiques de la poussière de verre M

Tamis (µm)	315	160	80	54	39	29	19	11,7	8,6	6,2
% passant	100	100	100	96	87	79	64	46	33	23
Tamis (µm)	4,5	3,1	2,4	1,4	-	-	-	-	-	-
% passant	14	8,0	4,6	4,6	-	-	-	-	-	-
Densité brute (d _{gb}): 2,560						(BNQ 2501-070)				
Absorption : 0,0% (estimée, puisque même nature que Sable de verre C)										
Nature : Verre mixte concassé										
Provenance des particules : Verre concassé du centre de tri Tricentris à Lachute										
Diamètre moyen : 15,4 µm										



Figure 3.3 Photo de la poussière de verre M vis-à-vis une pièce de 2 dollars canadiens

La deuxième source de particules fines utilisée pour certains des enrobés testés provient de l'usine d'enrobage de DJL à Montréal, rue St-Patrick. Des essais de sédimentométrie (BNQ 2501-025) et de densité (BNQ 2501-070) ont été faits sur ce filler par le laboratoire Solmatech. Le Tableau 3.5 présente les résultats obtenus.

Tableau 3.5 Caractéristiques physiques du filler DJL de St-Patrick

Tamis (µm)	315	160	80	60	44	32	20,6	12,2	8,8	6,0
% passant	100	96	84	67	58	49	40	30	23	17
Tamis (µm)	4,4	3,2	2,3	1,3	-	-	-	-	-	-
% passant	13	9,3	8,1	5,8	-	-	-	-	-	-
Densité brute (d _{gb}): 2,782						(BNQ 2501-070)				
Nature minéralogie : Calcaire										
Provenance des particules : Usine d'enrobé bitumineux DJL à Montréal, rue St-Patrick										
Diamètre moyen : 37,7 µm										

Finalement, soulignons que plusieurs mélanges ont été réalisés en substituant une proportion de la poussière de verre par de la fumée de silice ou de la chaux hydratée. Le fournisseur de la chaux hydratée est Graymont et celui de la fumée de silice est Silicium Bécancour. Aucun essai de caractérisation n'a été effectué durant le projet sur ces deux derniers produits, mais leurs caractéristiques sont identifiées dans les fiches techniques des fournisseurs, à l'ANNEXE I.

3.2 Liant

Deux liants de bonne qualité ont été utilisés dans ce projet, soit un bitume PG 76-28P de McAsphalt et un bitume PG 88-28 de Bitumar. Ce dernier est un produit expérimental et ses performances au niveau de la rigidité sont excellentes. Sa recouvrance élastique est de 76%. Le bitume PG76-28P offre quant à lui une rigidité inférieure au PG 88-28, mais il présente d'excellentes performances au niveau de la recouvrance élastique, soit de 93%. Les caractéristiques de ces bitumes sont présentées dans les fiches techniques à l'ANNEXE I. Des essais de recouvrance élastique ont été réalisés au laboratoire de bitume de l'ETS selon la norme LC 25-005.

En plus des deux liants hydrocarbonés utilisés, un additif d'élastomère servant à augmenter les propriétés élastiques de l'enrobé a été utilisé. Cet additif est ajouté sous forme de granules contenant du Styrène-Butadiène-Styrène (SBS) d'un diamètre allant de 2 à 5 mm, voir Figure 3.4.



Figure 3.4 Granules de SBS avant malaxage à chaud dans le sable de verre C

Ces granules sont fournis par une entreprise européenne du nom de RoadWay Solutions. L'objectif est d'être en mesure d'améliorer les propriétés du bitume en chantier de façon précise. Ces granules contiennent principalement du bitume, mais également du Styrène-Butadiène-Styrène et de la poudre de talc. Les granules sont ajoutés aux matériaux secs et à chaud afin de les faire fondre dans les granulats pendant un premier malaxage. Une température minimum de 160°C est nécessaire pour bien mobiliser les granules de SBS au sein des granulats. Le bitume est ensuite ajouté et le processus de malaxage se poursuit ensuite de façon conventionnelle. La procédure, telle que décrite par le fournisseur, visant à intégrer les granules de SBS est détaillée à l'ANNEXE II. Le Tableau 3.6 qui suit résume les matériaux utilisés pour la section liant.

Tableau 3.6 Tableau synthèse des liants utilisés

Produit	Fournisseur	Observation / Description	Température de malaxage	Température de compaction
Bitume PG 76-28P	McApshalt	Excellente recouvrance élastique de 92,5% (LC 25-005)	165°C	155°C
Bitume PG 88-28	Bitumar	Excellente rigidité et recouvrance élastique de 76,25% (LC 25-005)	180°C	170°C
RWelast	RoadWay Solutions	Granules de Styène-Butadiène-Styrène (SBS) ajoutées au bitume	160°C	Dépendante du PG du bitume

3.3 Description des enrobés bitumineux testés

3.3.1 Formulation du mélange de référence

Dans le cadre de ce projet de recherche, l'EBHP de grosseur nominale de 14mm a été optimisé à partir des matériaux granulaires retenus pour cette étude. Le Tableau 3.7 présente le récapitulatif de la taille des matériaux granulaires sélectionnés pour la confection de l'EBHP-14 de référence.

Tableau 3.7 Récapitulatif de la taille des matériaux granulaires choisis

	Calcaire 10-14	Verre C	Verre C	Verre M
Diamètre moyen (mm)	9,76	0,39	0,39	0,015
Rapport diamètres (d/D)	0,040		0,040	

3.3.1.1 Détermination des proportions granulaires

L'optimisation granulométrique d'un EBHP consiste à trouver les proportions idéales pour chacun des matériaux solides sélectionnés dans le but d'obtenir un squelette granulaire

maximisant les contacts entre les plus grosses particules (gros-sur-gros). Les principes de Baron derrière la méthode d'optimisation granulométrique décrits à la §1.2.2.3 ont donc été utilisés. La Figure 3.5 présente les données obtenues suite aux essais visant à déterminer les proportions optimales du mélange de particules grosses-intermédiaires, établies à partir d'essais à la PCG (80 girations) sur les granulats secs.

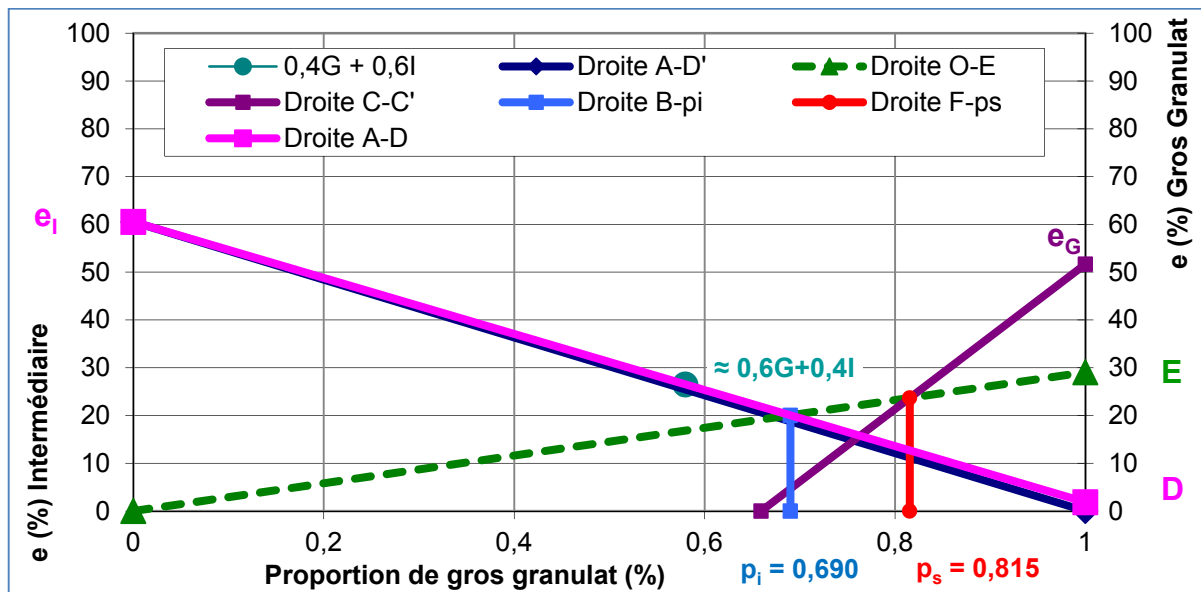


Figure 3.5 Résultats servant à déterminer les proportions optimales de grosses particules et de particules intermédiaires

Suivant la détermination du combiné optimal grosses-intermédiaires, la proportion optimale de fines pouvant être ajoutées au mélange a été établie encore une fois à partir d'essais à la PCG sur matériaux secs. La Figure 3.6 présente les données obtenues suite aux essais visant à déterminer les proportions optimales du mélange binaire suivant : combiné de l'optimal des particules grosses-intermédiaires et des particules fines.

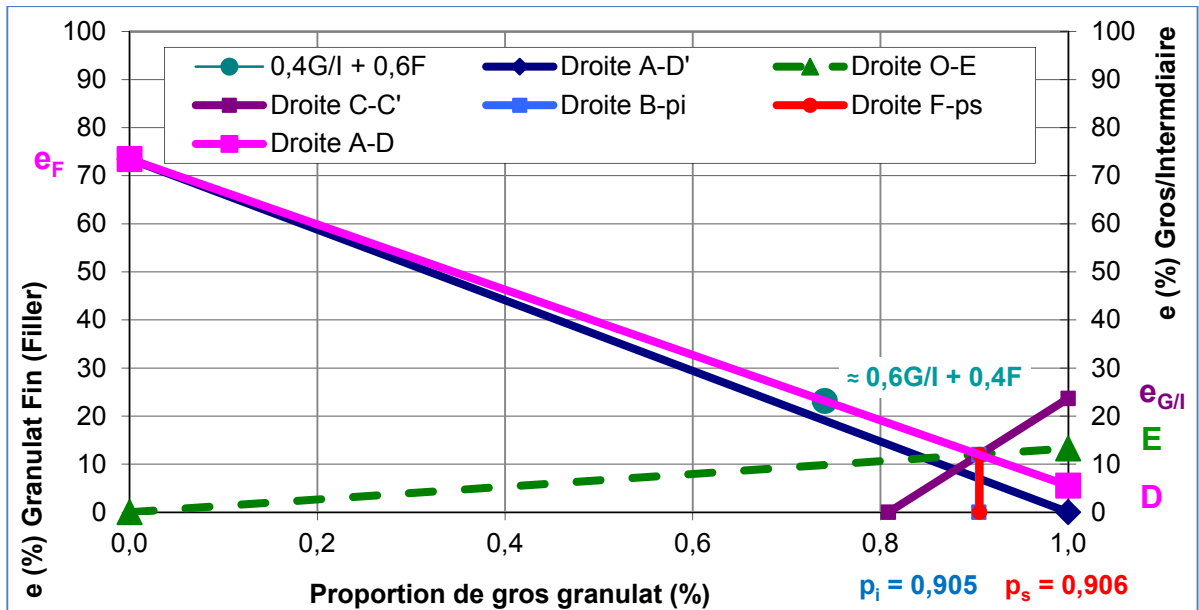


Figure 3.6 Résultats servant à déterminer les proportions volumiques optimales du combiné de l'optimal des particules grosses-intermédiaires et des particules fines

À partir des données présentées aux Figures 3.5 et 3.6, les proportions des combinés ont été établies en considérant les proportions au seuil critique p_s , lequel représente l'optimum pour un agencement binaire vis-à-vis de sa compacité (faible teneur en vides) tout en ayant un minimum d'effet d'interférence sur les grosses particules. Rappelons que le seuil p_s permet d'établir le dosage maximal de particules fines pouvant être ajoutées aux grosses particules sans interférer sur l'agencement de ces dernières.

Les résultats présentés à la Figure 3.5 montrent que p_s correspond à 0.815, soit une combinaison de 81.5% de granulat 10-14 mm et 18.5% de sable de verre C. Ensuite, les résultats présentés à la Figure 3.6 montrent que le seuil p_s du combiné de l'optimal des particules grosses-intermédiaires et des particules fines est de 0.906, soit une combinaison de 90.6% de l'optimal du combiné de granulats 10-14 mm et sable C, et 9.4% de poussière de verre M. Le Tableau 3.8 présente les proportions retenues au final pour former le squelette granulaire du mélange d'EBHP de référence.

Tableau 3.8 Proportions volumiques du squelette granulaire de l'EBHP de référence

Proportions volumiques	PCG Gros + Intermédiaires	PCG Gros / Intermédiaires + Fines	Formulation finale Gros / Intermédiaires / Fines
Calcaire 10-14 (Gros)	81,5 %	90,6 %	73,9 %
Verre C (Intermédiaires)	18,5 %		16,7 %
Verre M (Fines)	-	9,4 %	9,4 %
Indice des vides du squelette granulaire (V_i / V_s)	12,01 %		
Porosité du squelette granulaire ou VAM (V_i / V_T)	10,72 %		

En traçant graphiquement la courbe granulométrique de l'EBHP de référence, on peut apercevoir les discontinuités plutôt marquées. Ces dernières semblent donc indiquer qu'on a bel et bien un squelette granulaire similaire à un empilement Apollonien (granulométrie discontinue avec contact gros-sur-gros). La Figure 3.7 présente la courbe granulométrique obtenue.

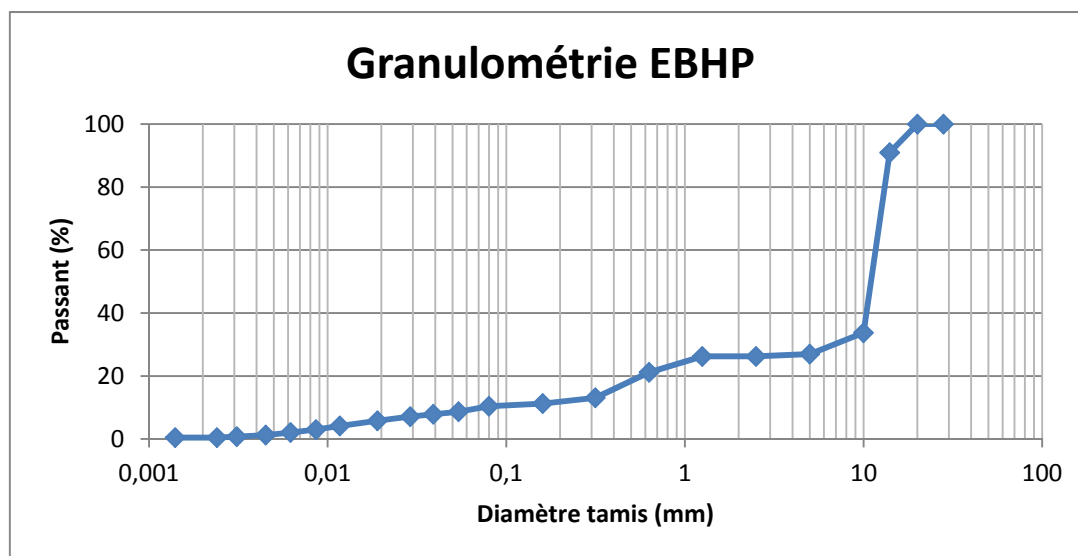


Figure 3.7 Courbe granulométrique de l'EBHP de référence (% massique)

3.3.1.2 Détermination du volume de bitume effectif (V_{be})

Avant d'être en mesure de déterminer le volume de bitume effectif dans l'enrobé, il est important de mentionner le concept des volumes absolus, tel que décrit dans le guide de formulation selon la méthode LC, du MTQ (Ministère des Transports du Québec, 2005). Il s'agit de visualiser schématiquement un volume fini d'enrobé fragmenté en plus petits volumes, ces derniers représentant chacun des constituants. La Figure 3.8 est un schéma représentant bien ce concept.

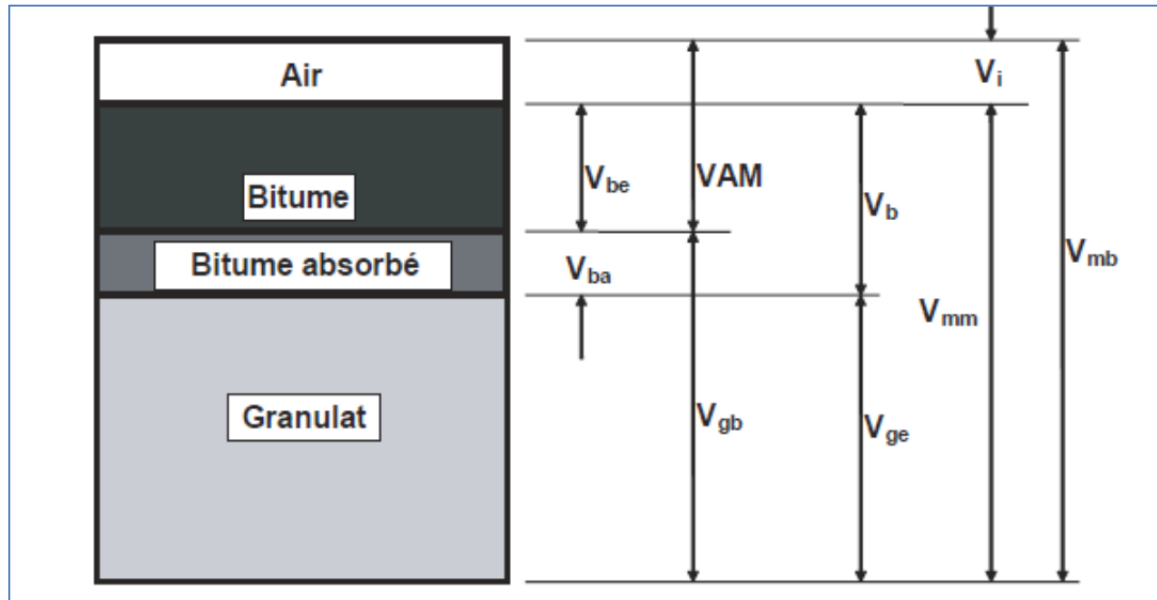


Figure 3.8 Représentation volumétrique d'un enrobé bitumineux compacté
Tirée de Ministère des Transports du Québec (2005)

Les variables de la figure précédente sont définies ainsi :

- **VAM** : Volume des vides entre les grains du granulat de l'enrobé compacté
- **V_{mb}** : Volume brut de l'enrobé compacté
- **V_{mm}** : Volume de l'enrobé sans vides interstitiels
- **V_{be}** : Volume de bitume effectif (divisé par V_{mm} lorsqu'exprimé en pourcentage)
- **V_i** : Volume des vides interstitiels
- **V_b** : Volume total de bitume

- V_{ba} : Volume de bitume absorbé
- V_{gb} : Volume brut du granulat
- V_{ge} : Volume effectif du granulat

En considérant la porosité de 10,72% (VAM) du squelette granulaire optimisé et souhaitant avoir une teneur en vides après compaction de 2,00% (v_i) dans l'enrobé, il est possible à partir du concept des volumes absolus de déterminer la teneur en bitume effectif de l'EBHP-14. Le volume restant de bitume effectif est de 8,72%, mais il faut toutefois se rappeler que le V_{be} exprimé en pourcentage est calculé par rapport au V_{mm} qui dans ce cas précis est de 98% ($V_{mb}-V_i$). Le calcul du volume de bitume effectif (V_{be}) est donc :

$$V_{be} = \frac{8.72\%}{V_{mm}} = \frac{8.72\%}{98\%} = 8.90\% \quad (3.1)$$

La dernière variable à déterminer est celle du volume de bitume total (V_b) qui est égal au volume de bitume effectif (V_{be}) combiné au volume de bitume absorbé (V_{ba}). Le pourcentage d'absorption d'eau des particules solides est connu (voir §3.1), mais il faut toutefois faire une estimation du coefficient d'absorption du bitume par rapport à l'eau. Une valeur de départ couramment utilisée pour ce coefficient est de 50%, mais elle est ensuite ajustée suivant la fabrication en laboratoire de l'enrobé bitumineux et la détermination de sa densité maximale réelle.

Connaissant le volume de bitume effectif et en estimant le volume de bitume absorbé, un premier enrobé a été confectionné en laboratoire en vue de déterminer l'aptitude au compactage à partir de l'essai à la PCG et de valider les proportions effectives de l'enrobé à partir d'une mesure de sa densité maximale (d_{mm}). Bien que suite au 1^{er} essai, la maniabilité de l'enrobé s'est avéré tout à fait excellente, des traces de ressuage du bitume ont été observées aux extrémités de l'éprouvette compactée. En conséquent, un 2^{ème} enrobé a été confectionné en réduisant légèrement la teneur en bitume total, établie suivant une diminution du volume de bitume absorbé (V_{ba}) estimé précédemment. Suite aux bonnes

performances obtenues à la presse à cisaillement giratoire, cette 2^{ème} formulation a été retenue à titre de mélange de référence EBHP #1 et le Tableau 3.9 qui suit présente les proportions finales utilisées.

Tableau 3.9 Proportions du mélange de référence EBHP (Réf)

	Volumique	Massique
Granulats 10-14 mm	67,08%	72,52%
Sable de verre "C"	15,18%	15,10%
Poussière de verre "M"	8,57%	8,69%
Bitume total (PG 76-28P)	9,17%	3,69%
Bitume effectif ²	8,86%	3,56%
Bitume absorbé	0,31%	0,12%
V_{be}	8,90%	
VAM	10,72%	
V_i théorique	2,00%	
D_{gb}	2,677	
D_{ge}	2,685	
D_{mm}	2,514	

Soulignons qu'après malaxage, la méthode de formulation d'EBHP permet d'obtenir un mélange qui visuellement s'apparente à un enrobé très grenu avec un très bon enrobage des particules. En observant la qualité de l'enrobage après malaxage, on remarque que l'ensemble des particules fines et intermédiaires se sont fixées à des plus grosses particules. La Figure 3.9 présente une photo de l'enrobage typique d'un gros granulat.

² La proportion volumique du bitume effectif n'est pas égale au V_{be} puisqu'il faut exclure le volume de bitume absorbé des proportions volumiques lorsqu'on calcule le V_{be} en terme de volumes absolus

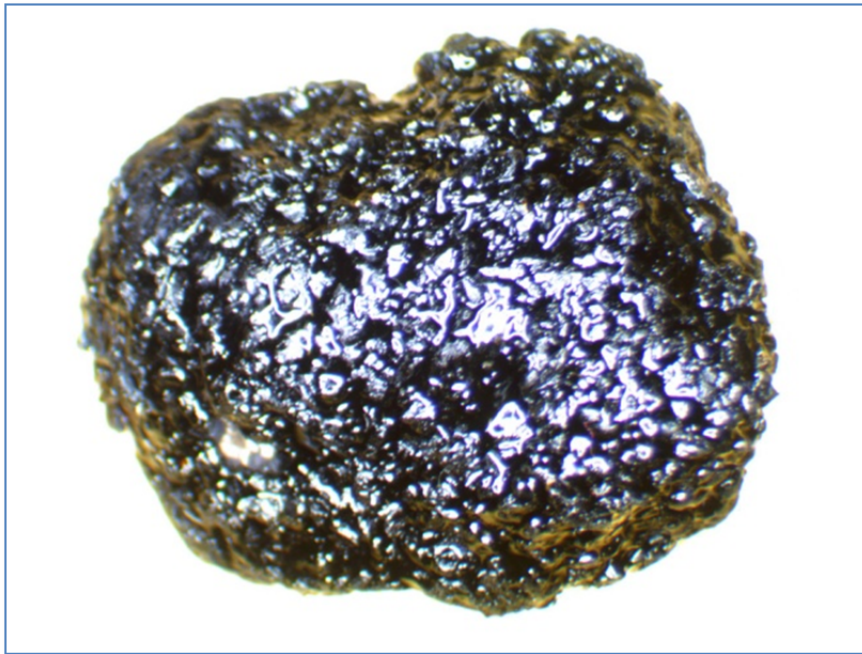


Figure 3.9 Photo de l'enrobage d'une grosse particule (10-14 mm)

3.3.2 Formulation des mélanges comparatifs

Le Tableau 3.10 qui suit présente l'ensemble des mélanges qui ont été formulés. Lorsqu'on compare les différents mélanges à la formulation de référence, un seul paramètre de formulation par mélange a été modifié afin de permettre, lors de l'analyse, de bien discerner l'influence du paramètre en question. Les cases en jaune du tableau représentent la section où a lieu la modification de la formulation par rapport à l'enrobé de référence. L'ANNEXE V présente les proportions volumiques et massiques de tous les constituants des mélanges d'enrobé bitumineux confectionnés en phase I de ce projet. La densité maximale déterminée en laboratoire pour chacun des enrobés y est également présentée.

Tableau 3.10 Présentation des mélanges comparatifs et leurs constituants

	<i>Grosses particules</i>	<i>Particules intermédiaires</i>	<i>Particules fines</i>	<i>Bitume</i>	<i>Autres ajouts</i>	<i>Paramètre</i>
EBHP (Réf)	Calcaire (10-14 mm)	Verre (Sable C)	Verre (Poussière M)	76-28 (McAsphalt)	-	-
EBHP (FS10)	Calcaire (10-14 mm)	Verre (Sable C)	Verre (Poussière M)	76-28 (McAsphalt)	10% du volume de particules fines en <u>fumée de silice</u> introduite avec les matériaux secs (remplace un volume des particules fines)	Fumée de silice
EBHP (FS20)	Calcaire (10-14 mm)	Verre (Sable C)	Verre (Poussière M)	76-28 (McAsphalt)	20% du volume de particules fines en <u>fumée de silice</u> introduite avec les matériaux secs (remplace un volume des particules fines)	Fumée de silice
EBHP (FS30)	Calcaire (10-14 mm)	Verre (Sable C)	Verre (Poussière M)	76-28 (McAsphalt)	30% du volume de particules fines en <u>fumée de silice</u> introduite avec les matériaux secs (remplace un volume des particules fines)	Fumée de silice
EBHP (Inter- Calc)	Calcaire (10-14 mm)	Calcaire (granulométrie du verre)	Verre (Poussière M)	76-28 (McAsphalt)	-	Nature du granulat
EBHP (Fines- Calc)	Calcaire (10-14 mm)	Verre (Sable C)	Calcaire (granulométrie différente du verre)	76-28 (McAsphalt)	-	Nature du granulat
EBHP (Chaux-H)	Calcaire (10-14 mm)	Verre (Sable C)	Verre (Poussière M)	76-28 (McAsphalt)	1,5% de la masse des solides en <u>chaux hydratée</u> introduite avec les granulats (remplace un volume des particules fines)	Chaux hydratée
EBHP (PG88-28)	Calcaire (10-14 mm)	Verre (Sable C)	Verre (Poussière M)	88-28 (Bitumar)	-	Nature du liant
EBHP (PG76- 28+SBS)	Calcaire (10-14 mm)	Verre (Sable C)	Verre (Poussière M)	76-28 (McAsphalt)	12.5% massique du bitume remplacé en volume par du SBS en granules	Nature du liant

3.4 Principales méthodes d'essai

Tout au long du projet, différents essais ont été réalisés au Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux, le LCMB de l'ETS. Cette section a pour objectif de présenter les différents essais réalisés autant sur les granulats que sur les enrobés bitumineux.

3.4.1 Essai d'aptitude au compactage

L'aptitude au compactage de l'enrobé est évalué à l'aide d'un outil de laboratoire appelé la presse à cisaillement giratoire (PCG). L'essai de PCG consiste à soumettre un échantillon d'enrobé à un effort de compression et de cisaillement intergranulaire en suivant un mouvement de pétrissage. Ce mode de sollicitation permet de simuler en quelque sorte l'aptitude au compactage pouvant être observé en chantier. La Figure 3.10 présente le procédé physique et mécanique de la PCG.

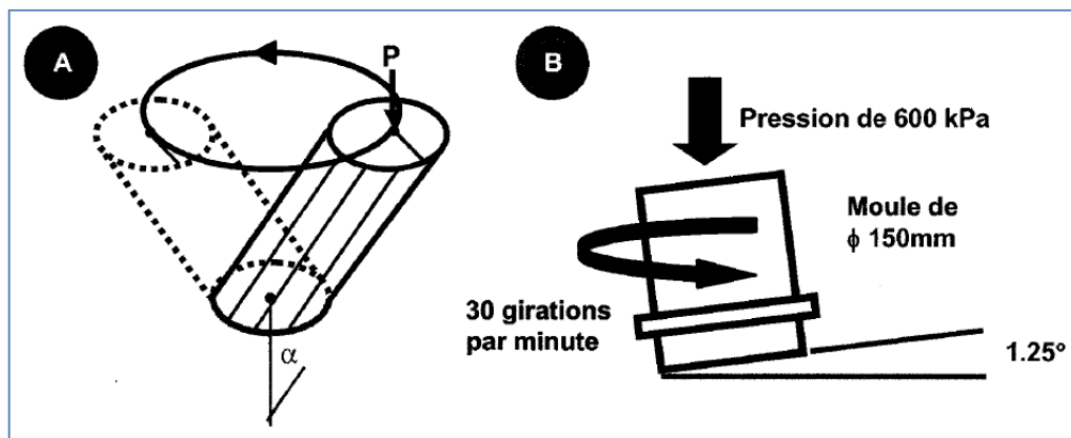


Figure 3.10 Illustrations du procédé physique (A) et mécanique (B) de la PCG
Tirée de Meunier (2005)

Sous l'effet de pétrissage, l'enrobé se densifie à l'intérieur du moule pour chacune des girations imposées, diminuant ainsi le volume des vides. La PCG permet de suivre l'évolution du volume des vides dans l'enrobé et déterminer ainsi son aptitude au compactage. L'évolution de la porosité peut être représentée sous forme graphique, voir

l'exemple de la Figure 3.11. Afin de calculer le volume des vides, il est nécessaire de déterminer préalablement la densité maximale du mélange à l'aide de l'essai LC 26-045 du MTQ, puisque la PCG ne fait que mesurer la hauteur de l'éprouvette pour chacune des girations. L'essai de PCG a été réalisé conformément à la méthode d'essai LC 26-003 du MTQ.

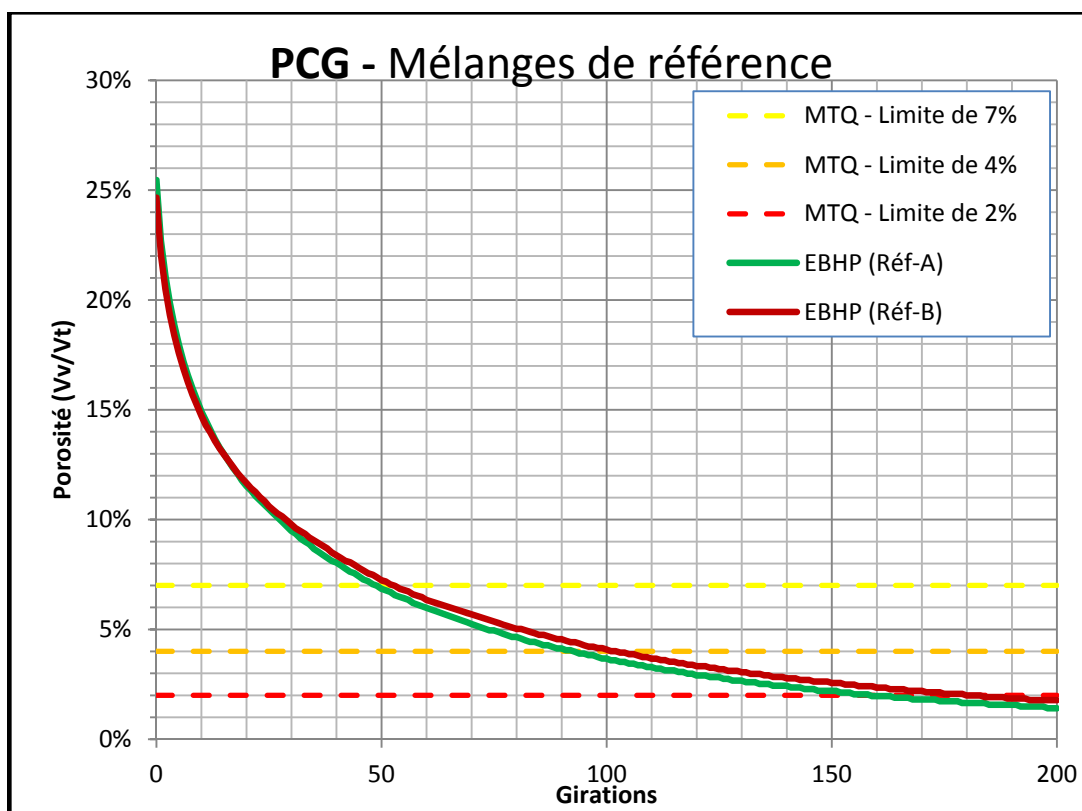


Figure 3.11 Exemple d'évolution de la teneur en vides en fonction du nombre de girations

3.4.2 Essai de module complexe

L'essai de détermination du module complexe, tel que réalisé lors de ce projet, consiste à soumettre un matériau à des sollicitations cycliques sinusoïdales de traction-compression en conditions isothermes. Les sollicitations peuvent être imposées en contrôle de force (de contraintes en conditions homogènes) ou en contrôle de déplacement (de déformations en

conditions homogènes). Des mesures de forces et de déplacements sont prises pour différents groupes de fréquences de sollicitations et températures.

La détermination du module complexe sert à caractériser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé bitumineux en petites déformations (Di Benedetto et al., 2005). Le bitume est un matériau viscoélastique et thermosusceptible, c'est-à-dire que son comportement rhéologique en petites déformations est variable en fonction de la fréquence de sollicitation et de la température. Une charge appliquée sur un matériau dit élastique engendre instantanément une déformation qui est réversible lorsque la charge est retirée. En ce qui concerne un matériau dit visqueux, une charge appliquée et maintenue constante engendre une déformation qui est différée dans le temps et qui n'est pas réversible lorsque la charge est retirée. Le caractère linéaire attribué au comportement viscoélastique de l'enrobé signifie que la déformation de ce dernier est proportionnelle à la somme des forces élémentaires appliquées, répondant ainsi au principe de superposition de Boltzmann. Cette linéarité pour l'enrobé bitumineux n'est valable que dans le domaine des petites déformations qui peuvent aller jusqu'à des amplitudes d'environ 10^{-4} m/m (Di Benedetto et al., 2005). Le comportement d'usage recherché par la mesure du module complexe se trouve dans le domaine de linéarité donc en conséquence, dans le domaine des petites déformations.

Le module complexe peut être défini comme étant le rapport entre l'amplitude complexe d'une contrainte sinusoïdale ($\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$), et l'amplitude complexe de la déformation sinusoïdale résultante ($\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$) dans un régime établi. Puisque l'enrobé bitumineux est un matériau viscoélastique, la déformation mesurée présente un retard par rapport à la contrainte. Ce retard, peut être traduit par l'angle de déphasage (φ) entre les signaux de contrainte et de déformation, voir Figure 3.12.

Figure 3.12 Représentation du retard entre la contrainte et la déformation
Adaptée de Bitume Québec (2014)

3.4.2.1 Équipements et norme utilisés pour la détermination du module complexe

Les équipements nécessaires à la réalisation de l'essai de module complexe sont une presse hydraulique MTS (voir Figure 3.13) ayant une cellule de force de 50 kN, une enceinte à température contrôlée, un capteur de force d'une précision de lecture de 5 N, trois extensomètres d'une longueur de 50 mm et d'une précision de lecture d'au moins 0,5 μm , deux capteurs de température d'une précision de 0,1 $^{\circ}\text{C}$ et un ordinateur capable de faire l'acquisition des données.

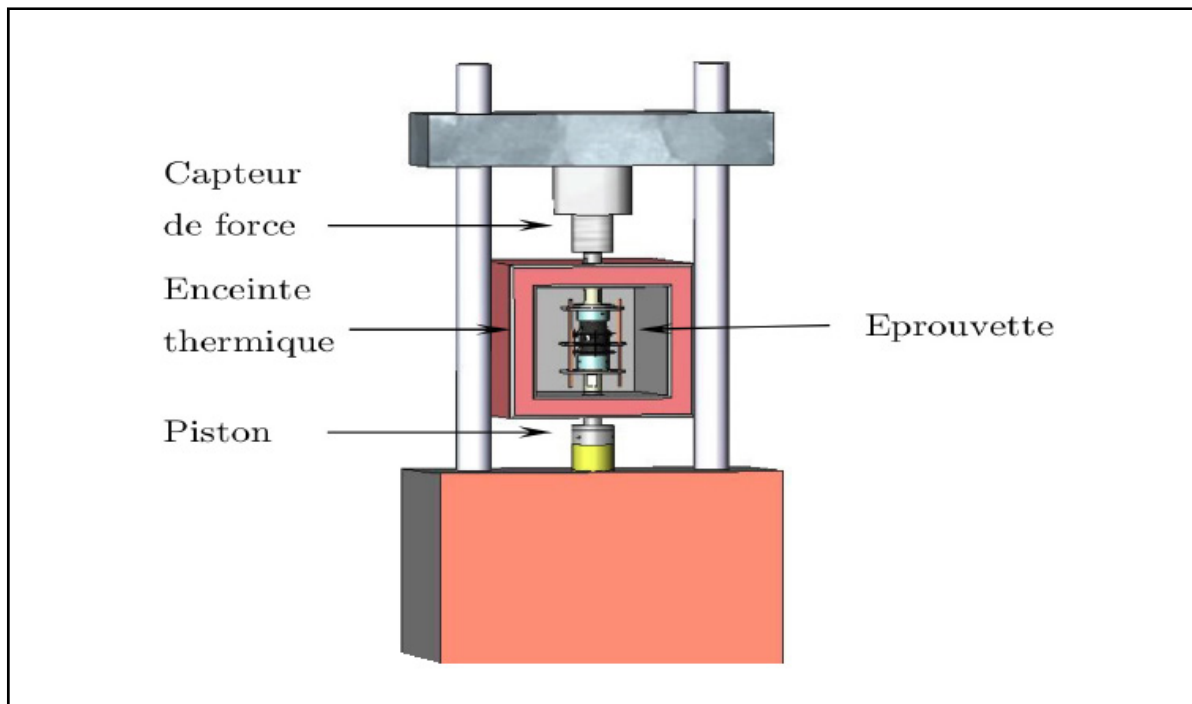


Figure 3.13 Schéma de la presse hydraulique MTS (Materials Testing System) utilisée pour l'essai de module complexe
Tirée de Nguyen (2009)

Pour chaque température d'essai, 7 niveaux de fréquences [0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10 Hz] en déformation imposée sont appliqués pour prendre des mesures et l'amplitude de ces fréquences est d'environ 50 μdef , soit dans le domaine des petites déformations. Le déroulement de l'essai suit sensiblement la norme du MTQ LC 26-700, à l'exception des éléments suivants : le modèle rhéologique utilisé est le 2S2P1D, les plages de températures d'essai sont [-35°C; -25°C; -15°C; -5°C; 5°C; 15°C; 25°C; 35°C] et les dimensions des éprouvettes testées sont différentes (voir section résultats).

3.4.2.2 Le principe d'équivalence temps et température (PETT)

En règle générale, le module varie selon deux variables indépendantes soit : la fréquence (F) de pulsation (ω) (ou le temps) et la température (T). Un matériau comme l'enrobé bitumineux est dit thermorhéologiquement simple lorsque les deux variables indépendantes du module peuvent être ramenées en une seule et même variable réduite soit :

$$E^*(\omega, T) = E^*(\omega \cdot f(T)) \quad (3.2)$$

Cette propriété est appelée le principe d'équivalence temps et température (PETT) et elle se traduit principalement par l'existence d'une courbe unique pour les représentations du module dans l'espace Cole & Cole et de Black (voir Figure 3.14 et Figure 3.15).

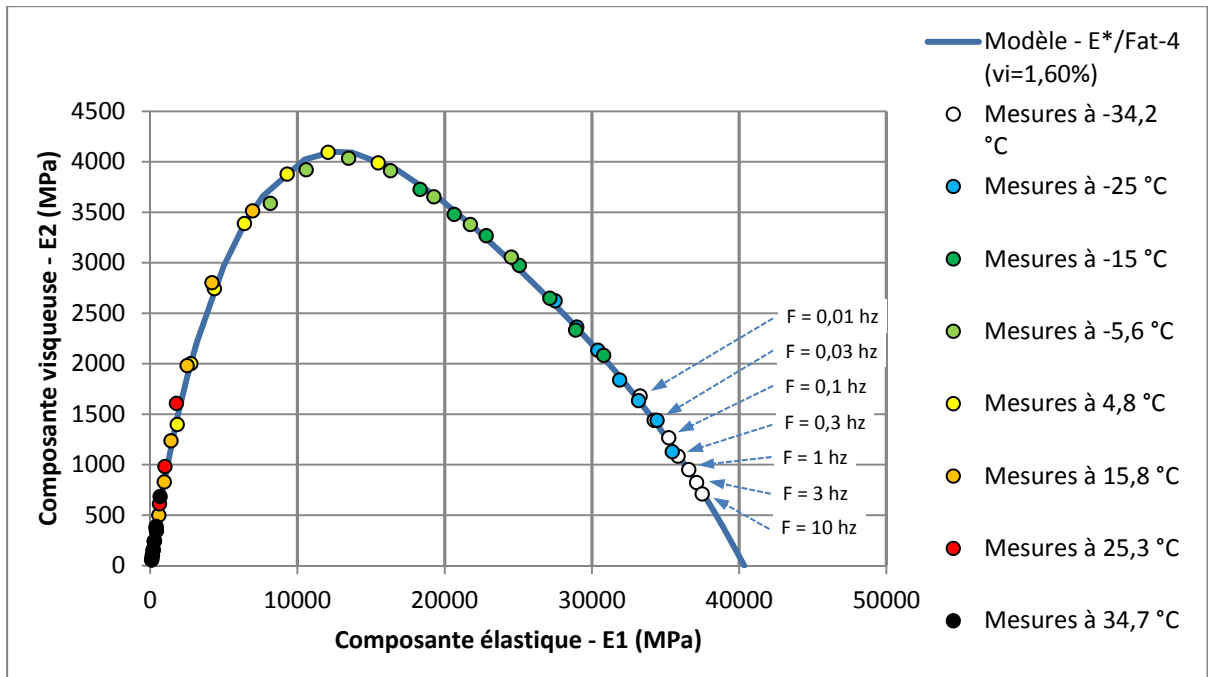


Figure 3.14 Exemple de représentation du module complexe dans l'espace Cole & Cole pour l'éprouvette EBHP (Chaux-H)

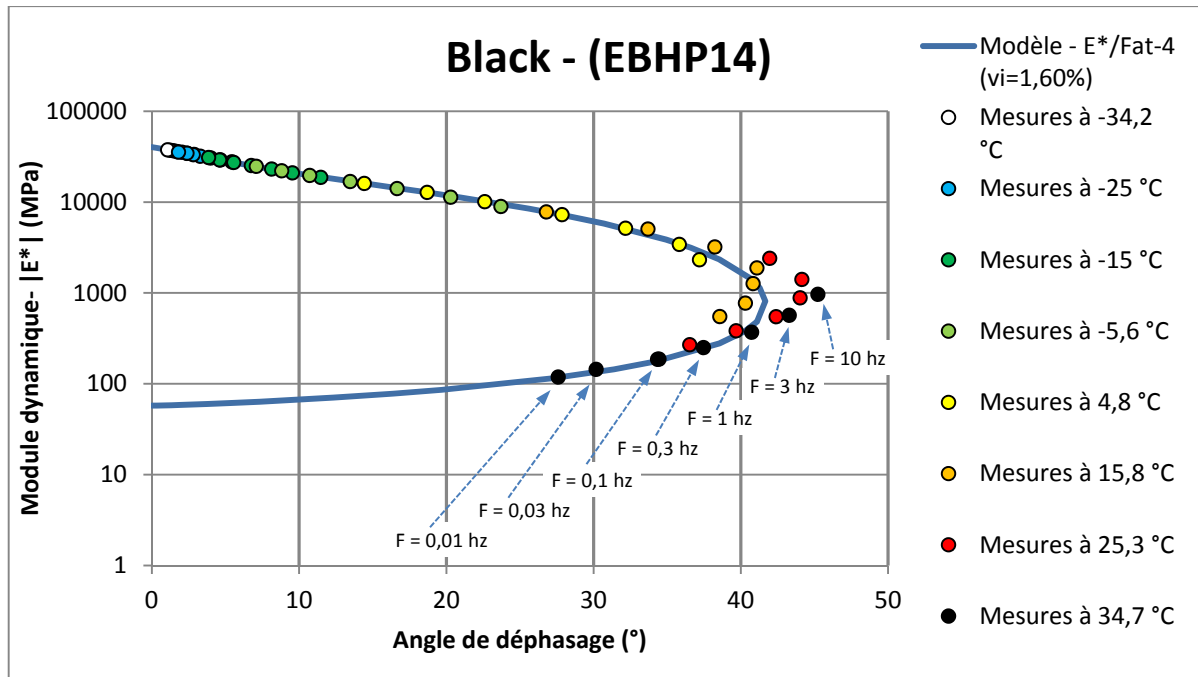


Figure 3.15 Exemple de représentation du module complexe dans l'espace de Black pour l'éprouvette EBHP (Chaux-H)

Chaque point sur la courbe unique représente le module dynamique obtenu par un couple de fréquence (F) ou pulsation (ω) et température (T). À noter que le PETT signifie aussi qu'une même valeur de module dynamique peut être attribuée à différents couples de fréquence et température. L'équation suivante décrit cette caractéristique :

$$E^*(\omega_1, T_1) = E^*(\omega_2, T_2) \text{ avec } \omega_1 \cdot f(T_1) = \omega_2 \cdot f(T_2) \quad (3.3)$$

Les mesures sont prises à plusieurs fréquences pour différentes températures. On obtient ainsi des courbes isothermes qui représentent la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence pour les différentes températures de l'essai. Ces courbes isothermes sont généralement présentées en coordonnées bilogarithmiques. Il est possible de présenter les données mesurées sous la forme d'une courbe unique appelée courbe maîtresse ($\log(Fr) = \log(2\pi/\omega)$ en abscisse et $\log(|E^*|)$ en ordonnée) en utilisant une température de référence choisie de façon arbitraire. Il suffit de déterminer les coefficients de translation ($\log(a_T)$) nécessaires pour déplacer parallèlement les différentes isothermes (T) mesurées par rapport à l'isotherme

correspondant à la température de référence (T_{ref}) choisie jusqu'à ce que les points de même ordonnée soient superposés. L'équation suivante décrit ce déplacement des courbes isothermes à l'aide du coefficient de translation (a_T) :

$$E^*(\omega, T) = E^*(a_T \cdot \omega, T_{ref}) \text{ avec } a_{T_{ref}} = 1 \text{ et } a_T = \frac{f(T)}{f(T_{ref})} \quad (3.4)$$

Il existe plusieurs fonctions analytiques pour définir la fonction de translation (a_T) dont deux qui sont les plus souvent utilisées, soit :

L'équation de William, Landel et Ferry «loi WLF» : (3.5)

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

C_1 et C_2 sont des constantes qui dépendent du matériau;

T_{ref} est la température de l'isotherme choisie comme référence;

T est la température de l'isotherme devant être translatée parallèlement;

Une équation de type Arrhenius : (3.6)

$$\log a_T = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)$$

δH est l'énergie apparente d'activation qui caractérise le matériau;

R est la constante des gaz parfaits (8,314 Joules / mol*Kelvin);

T_{ref} est la température en Kelvin de l'isotherme choisie comme référence;

T est la température en Kelvin de l'isotherme devant être translatée;

La Figure 3.16 présente une courbe maîtresse formée suite à la translation de mesures présentées sous forme d'isothermes, pour une température de référence de 15°C.

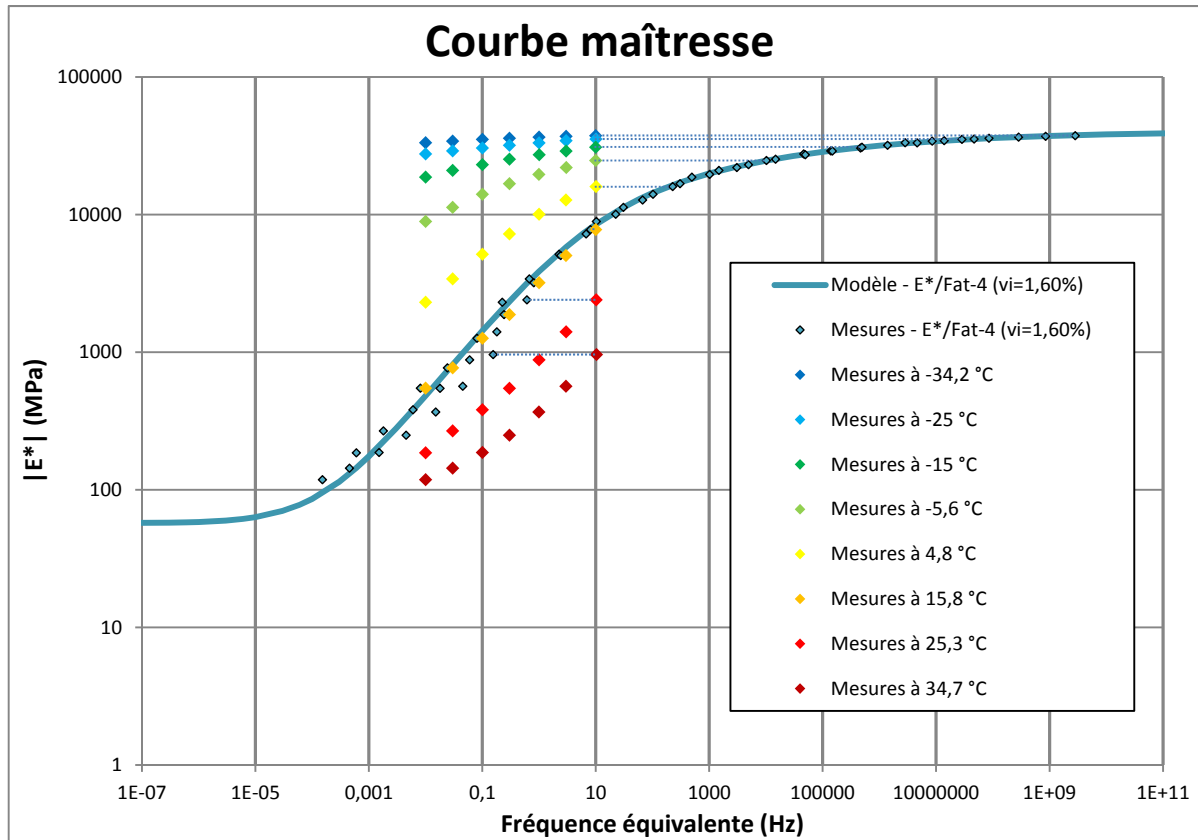


Figure 3.16 Exemple de courbe maîtresse pour une température de référence de 15°C pour l'éprouvette EBHP (Chaux-H)

Finalement, le PETT est fort utile lors de l'analyse des résultats puisqu'il permet d'obtenir des valeurs de modules pour des fréquences de chargement ou des températures inaccessibles lors de l'expérimentation dû à des contraintes opérationnelles lors des essais. À noter que le PETT est aussi valide dans le domaine non-linéaire (Di Benedetto et al., 2008), donc grandes déformations, et pour de très hautes fréquences de l'ordre de 30 kHz (Sohm, 2007).

3.4.2.3 Modélisation 2S2P1D

Il est possible de modéliser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé bitumineux en utilisant un assemblage de modèles rhéologiques élémentaires. Trois types d'éléments de base sont couramment utilisés : 1) le ressort, 2) l'amortisseur linéaire et 3) l'amortisseur variable.

Le ressort linéaire - Le ressort représente le solide Hookéen et il décrit un comportement mécanique purement élastique (Figure 3.17).

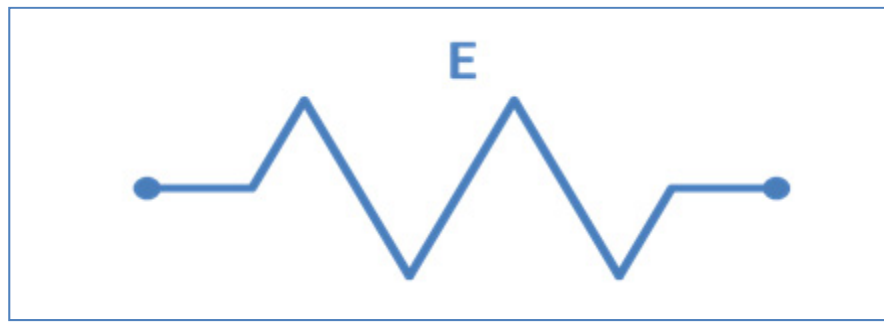


Figure 3.17 Représentation élémentaire d'un ressort

L'équation décrivant le comportement d'un ressort linéaire est la suivante :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.7)$$

Où

σ = Contrainte appliquée dans le ressort

E = Rigidité du ressort

ε = Déformation du ressort

L'amortisseur linéaire - L'amortisseur linéaire représente le fluide newtonien et il décrit un comportement visqueux newtonien (Figure 3.18).

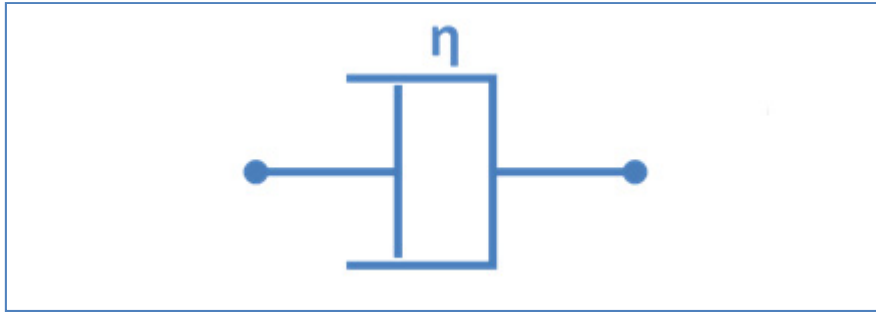


Figure 3.18 Représentation élémentaire d'un amortisseur linéaire

L'équation décrivant le comportement d'un amortisseur linéaire est la suivante :

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad (3.8)$$

Où

σ = Contrainte appliquée à l'amortisseur

η = Viscosité newtonienne de l'amortisseur linéaire

$\dot{\epsilon}$ = Taux de déformation de l'amortisseur en fonction du temps

$$E^*(i\omega\tau) = i\omega\eta \quad (3.9)$$

Où

i = Nombre complexe défini par : $i^2 = -1$

ω = La pulsation, $2\pi \cdot F$

τ = Paramètre ayant la dimension d'un temps qui varie en fonction de la température. Il est lié aussi au principe d'équivalence temps et température (PETT)

η = Viscosité newtonienne de l'amortisseur linéaire

L'amortisseur variable ou parabolique - L'amortisseur parabolique représente un élément rhéologique plus difficile à visualiser concrètement (Figure 3.19). Il décrit un comportement rhéologique situé entre le ressort linéaire ($a=0$) et l'amortisseur linéaire ($a=1$) tel que représenté à la Figure 3.20. La fonction de fluage de cet élément est de type parabolique, donc en conséquence, sa rigidité est décrite à l'aide du module complexe, E^* .

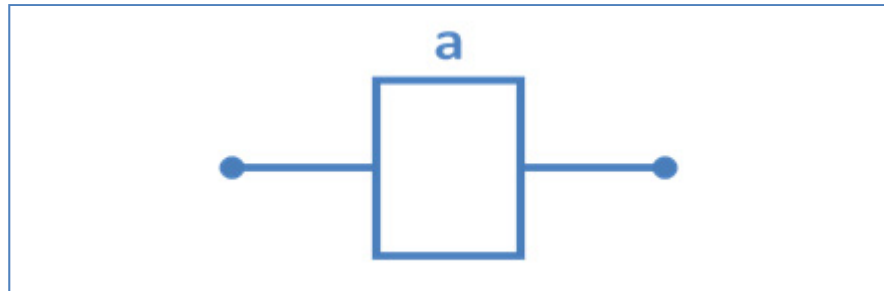


Figure 3.19 Représentation élémentaire d'un amortisseur variable

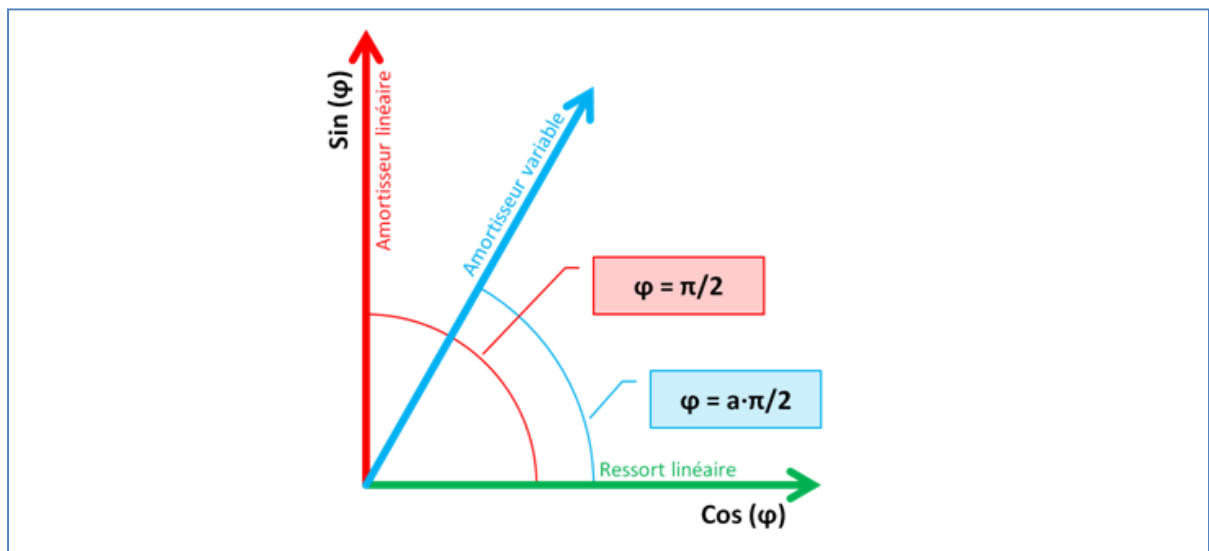


Figure 3.20 Représentation graphique d'un amortisseur variable pour chargement sinusoïdale
Adaptée de Pronk (2003)

L'équation (3.10) décrit l'évolution du module complexe sous l'action d'un chargement sinusoïdal (Olard et Di Benedetto, 2003):

$$E^*(i\omega\tau) = \frac{(i\omega\tau)^a}{c \cdot \Gamma(a + 1)} \quad (3.10)$$

Où

i = Nombre complexe défini par : $i^2 = -1$

ω = La pulsation, $2\pi \cdot \text{fréquence}$

a = Valeur variant de 0 à 1 servant à quantifier la variabilité de l'amortisseur parabolique tel que décrit précédemment

τ = Paramètre ayant la dimension d'un temps qui varie en fonction de la température. Il est lié aussi au principe d'équivalence temps et température (PETT)

c = Constante sans dimension

Γ = Fonction gamma : $\Gamma(n) = \int_0^\infty t^{n-1} e^{-t} dt$ avec $n > 0$ ou $Re(n) > 0$

Il existe plusieurs modèles rhéologiques pour décrire un comportement viscoélastique qui sont essentiellement le résultat d'un assemblage de différents modèles élémentaires tels que ceux présentés précédemment. Le but de l'utilisation de ces modèles est de décrire le plus fidèlement possible le comportement d'un matériau viscoélastique en utilisant un nombre limité de paramètres en plus de pouvoir donner un sens physique à ces paramètres. Le comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux et du bitume est couramment modélisé à l'aide du modèle 2S2P1D qui est en fait une amélioration du modèle de Huet-Sayegh. Le modèle **2S2P1D** est constitué de deux ressorts linéaires (**2** linear Springs), deux amortisseurs paraboliques (**2** Parabolic dashpots) et un amortisseur linéaire (**1** linear Dashpot), Figure 3.21.

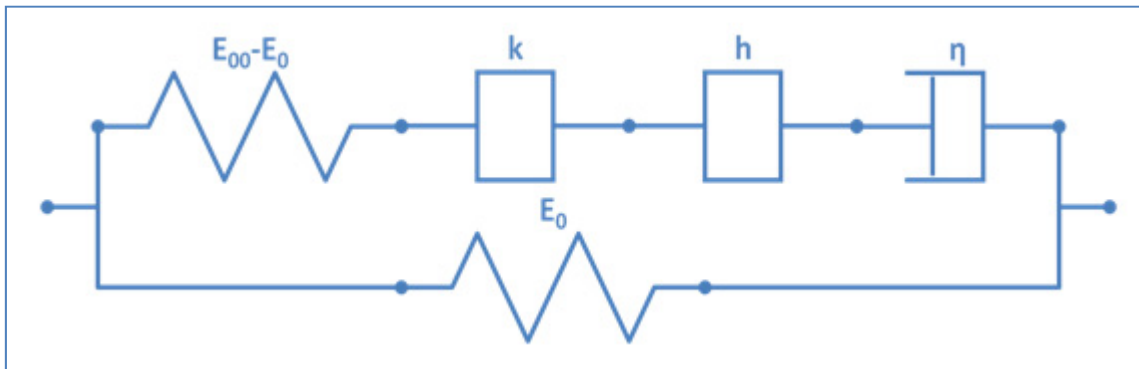


Figure 3.21 Représentation du modèle viscoélastique 2S2P1D

Par rapport au modèle de Huet-Sayegh, 2S2P1D permet de mieux modéliser les données aux faibles fréquences et/ou hautes températures (Di Benedetto et al., 2005), grâce à l'ajout d'un amortisseur linéaire en série avec les deux amortisseurs paraboliques. L'équation du module complexe associé à 2S2P1D s'écrit ainsi (Olard et Di Benedetto, 2003):

$$E^*(i\omega\tau) = E_{00} + \frac{E_{00} - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (3.11)$$

Où

E_0 = Module statique obtenu lorsque $\omega\tau$ tend vers zéro, donc pour des fréquences très faibles ou des températures très hautes

E_{00} = Module instantané obtenu lorsque $\omega\tau$ tend vers l'infini, donc pour des fréquences très élevées ou des températures très basses

i = Nombre complexe défini par : $i^2 = -1$

ω = La pulsation, $2\pi \cdot \text{fréquence}$

τ = Paramètre ayant la dimension d'un temps qui varie en fonction de la température. Il est lié aussi au principe d'équivalence temps et température (PETT)

δ, β = Constantes sans dimension

η = Viscosité newtonienne de l'amortisseur linéaire, où $\eta = (E_{00} - E_0)\beta\tau$

k, h = Valeurs servant à quantifier la variabilité des amortisseurs paraboliques tel que décrit précédemment, où $0 < k < h < 1$

Le paramètre $\tau(T)$ est le seul à varier en fonction de la température. Lorsque le principe d'équivalence temps et température (PETT) est respecté, ce paramètre peut s'exprimer en fonction du coefficient de translation $a_T(T)$ avec la relation suivante :

$$\tau(T) = a_T(T) \cdot \tau_{ref} \quad (3.12)$$

Où

$$\tau_{ref} = \tau(T_{ref})$$

a_T = Coefficient de translation déterminé à l'aide loi de WLF, Équation (3.5)

La calibration du modèle 2S2P1D aux données mesurées est une étape cruciale dans l'analyse du module complexe. Une initiative a été prise, dans le cadre de ce projet, visant à automatiser la calibration du modèle sur un outil Excel par la méthode des moindres carrés. Par le passé, les essais de module complexes du LCMB à l'ETS étaient calibrés par le

modèle 2S2P1D à l'aide d'un outil Excel par une méthode de calibration visuelle, où les paramètres sont choisis par l'utilisateur afin de visuellement caler la courbe du modèle aux données mesurées. La calibration à l'aide de l'outil Excel par la méthode du moindre carrée est plus rapide, permet d'avoir des résultats plus précis et est moins sujette à l'interprétation de l'utilisateur. Son fonctionnement général est relativement simple. Si on considère chacun des points mesurés et modélisés dans l'espace Cole & Cole, ces points forment des vecteurs et chacun des vecteurs mesurés possède un vecteur modélisé correspondant. La méthode consiste à minimiser la somme des distances au carrée entre chacun des vecteurs mesurés et modélisés en variant les paramètres du modèles 2S2P1D. La Figure 3.22 qui suit représente graphiquement d'où proviennent les distances à minimiser.

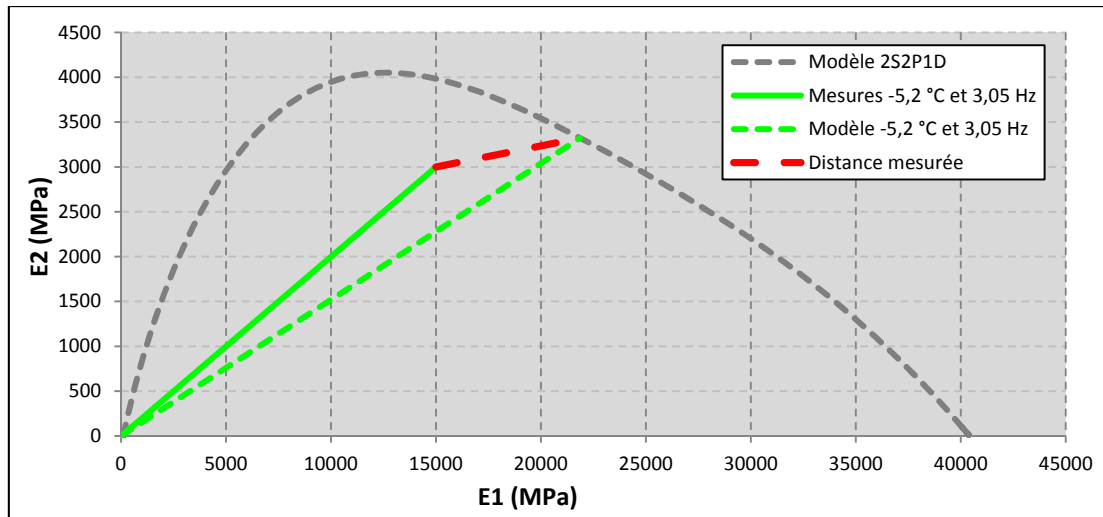


Figure 3.22 Représentation graphique de la distance à minimiser entre deux vecteurs dans l'espace Cole & Cole

La calibration du modèle peut être résumée par la minimisation de l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^{i=N} \sqrt{(E1 \text{ mod}_i - E1 \text{ mes}_i)^2 + (E2 \text{ mod}_i - E2 \text{ mes}_i)^2}^2 \\
 & = \sum_{i=1}^{i=N} (E1 \text{ mod}_i - E1 \text{ mes}_i)^2 + (E2 \text{ mod}_i - E2 \text{ mes}_i)^2
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Où

$E1\ mod_i$ = Composante élastique du modèle pour un vecteur i

$E2\ mod_i$ = Composante visqueuse du modèle pour un vecteur i

$E1\ mes_i$ = Composante élastique d'une mesure pour un vecteur i

$E2\ mes_i$ = Composante visqueuse d'une mesure pour un vecteur i

i = Identification d'un vecteur mesuré et de son vecteur modélisé correspondant

3.4.3 Essai de retrait thermique empêché (TSRST)

L'essai de retrait thermique empêché (*Thermal Strain Restained Specimen Test*) se fait en laboratoire et sert à déterminer la température basse de fissuration de l'enrobé bitumineux. L'essai est réalisé conformément à la norme AASHTO TP10-93 où une éprouvette (Longueur ≈ 250 mm et $\varnothing \approx 60$ mm) est tout d'abord conditionnée pendant 6 heures dans une enceinte thermique à 5°C. Une variation de température de -10°C/heure est ensuite imposée tout en retenant en place les deux extrémités de l'éprouvette à l'aide d'un produit d'époxy et de deux casques d'aluminium fixés sur une presse hydraulique. Cette dernière est pilotée en fonction du déplacement de trois extensomètres d'environ 165 mm positionnés dans le sens longitudinal tout autour de l'éprouvette (voir Figure 3.23) et le vérin doit moduler la force envoyée à l'éprouvette afin que le déplacement mesuré par les trois extensomètres soit nul. Le matériau cherche naturellement à se contracter lorsqu'il y a une baisse de température, mais cette contraction est empêchée mécaniquement ce qui engendre des contraintes de tensions internes. L'essai se termine lorsque le matériau atteint sa limite de résistance en traction et qu'une rupture transversale a lieu. À noter que les comportements en jeu lors de l'essai sont un couplage d'effets à la fois mécaniques et thermiques. Les efforts appliqués à l'éprouvette lors de cet essai sont similaires en quelque sorte à ce que l'enrobé bitumineux d'une chaussée subit lors d'une baisse de température. Une chaussée peut être en quelque sorte considérée dans son sens longitudinal comme un milieu continu, ce qui fait que le matériau peut difficilement se contracter dans cet axe puisque les contraintes de tensions

agissent autant d'un côté que de l'autre. On peut souvent observer dans des régions plus hivernales l'apparition de fissurations transversales dues à ce phénomène.

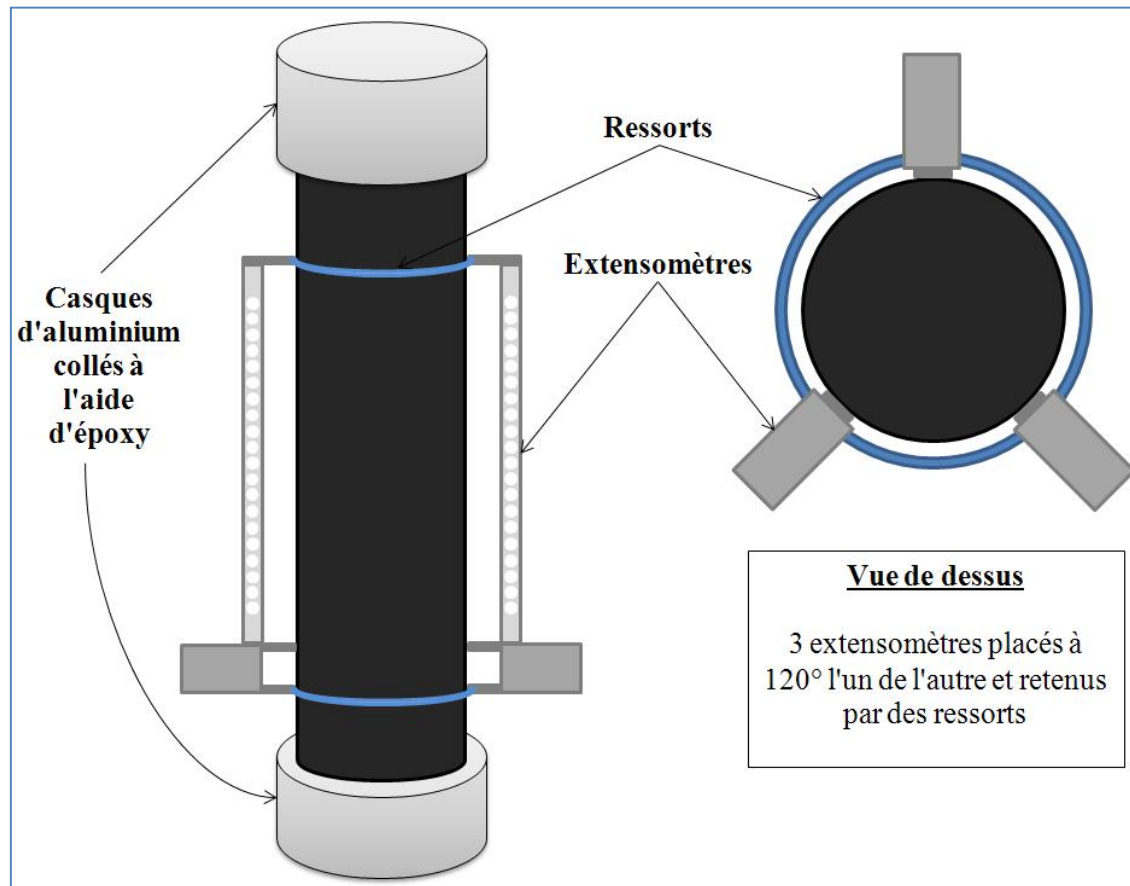


Figure 3.23 Localisation des trois extensomètres sur l'éprouvette pour l'essai de TSRST
Tirée de Malo (2012)

Les données sont recueillies à l'aide d'un système d'acquisition qui enregistre en fonction du temps la température, la force induite par le vérin et le déplacement des trois extensomètres. Les paramètres qui sont généralement déduits de ces données (Meunier, 2005) sont les suivants :

- La température de rupture (°C)
- La contrainte de rupture (MPa)
- La pente #1 d'évolution de la contrainte pour la phase linéaire durant la période de relaxation (MPa/°C)

- La pente #2 d'évolution de la contrainte pour la phase linéaire du comportement à basse température (MPa/°C)
- La température à partir de laquelle la relation est considérée quasi-linéaire correspond à la température de transition vitreuse (T_g)
- La température de transition bissectrice qui indique la jonction entre la droite de la pente #1 et la pente #2

La Figure 3.24 ci-dessous représente un exemple de résultats et la signification des paramètres déduits.

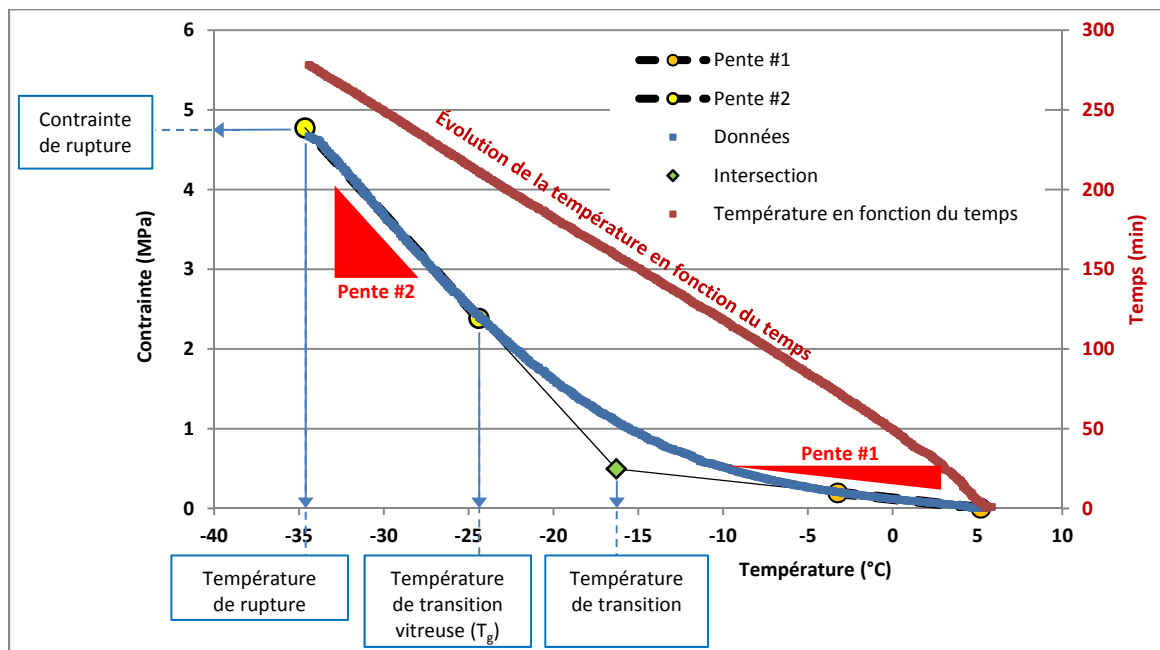


Figure 3.24 Détermination des paramètres analysés pour un exemple de résultats TSRST

3.4.4 Essai de fatigue

Fondamentalement, l'enrobé bitumineux utilisé sur nos chaussées est soumis à des charges de courte durée à chaque passage de véhicule. Les couches d'enrobés sous-jacentes aux roues de l'essieu subissent des efforts de flexion. Chaque couche ou ensemble de couches subit

donc des contraintes de traction et compression de façon répétitive à chaque passage d'essieu. Bien que ces contraintes ne soient pas suffisamment élevées pour fissurer la chaussée instantanément, elles peuvent être suffisantes pour faire apparaître des réseaux de microfissures qui évoluent à chaque passage d'essieu. Ces microfissures ont un effet notable sur le module de rigidité de l'enrobé en l'abaissant, donc l'enrobé est de plus en plus facile à déformer. Cette perte progressive de rigidité, qu'on peut qualifier d'endommagement, peut mener éventuellement à la rupture puisque les réseaux de microfissures forment éventuellement des macrofissures. Ces dernières se propagent rapidement étant donné que leurs apparition initie une concentration brutale de contraintes (Baaj, 2002). Lors d'un essai de fatigue en laboratoire, on peut distinguer trois phases de comportement dans l'évolution du module de rigidité en fonction du nombre de cycles de sollicitation. La Figure 3.25 présente ces trois phases, soit :

- **Phase I (Échauffement)** - Chute rapide du module de rigidité, beaucoup de chaleur dissipée et apparition des microfissures. Une proportion importante de la chute du module observé en phase I n'est pas attribuable à l'endommagement proprement dit, mais plutôt aux effets biaisant (échauffement et thixotropie du bitume)
- **Phase II (Fatigue)** - Chute lente du module de rigidité, progression des microfissures, évolution stable et presque linéaire
- **Phase III (Rupture)** - 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

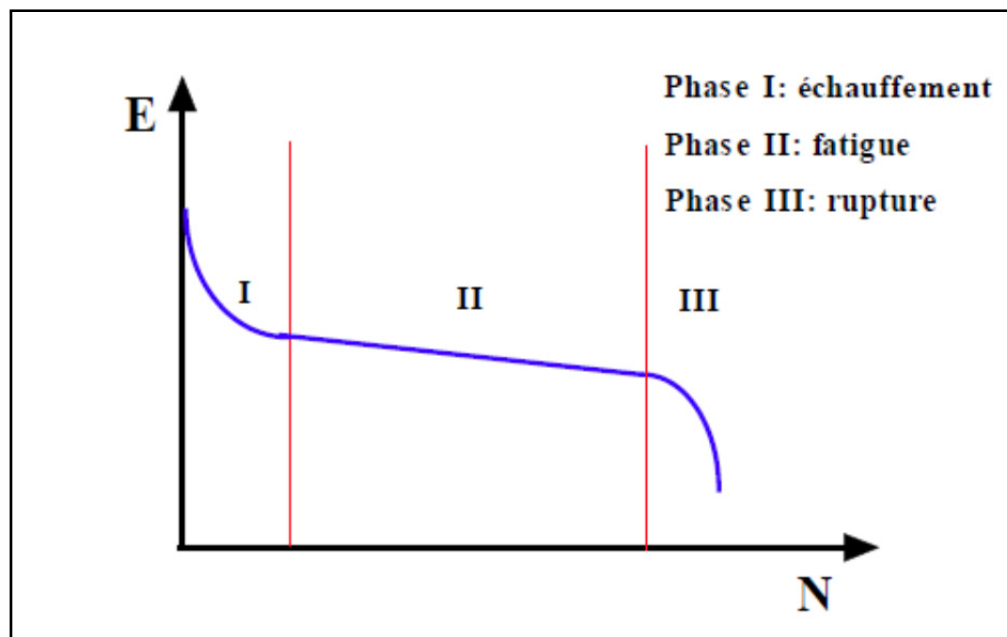


Figure 3.25 Distinction des trois phases d'un essai de fatigue
Tirée de Baaj (2002)

Il existe plusieurs essais en laboratoire servant à caractériser la résistance en fatigue des enrobés bitumineux. Ces essais vont imposer à une éprouvette d'enrobé des sollicitations répétées afin de simuler le comportement mécanique de fatigue. Ces essais peuvent être classés en trois grands types (Di Benedetto et al., 2005), soit :

- Essai de flexion (2,3 et 4 points)
- Essai de cisaillement
- Essai de traction-compression (avec ou sans confinement)

L'essai de traction-compression sur éprouvette cylindrique (déformation imposée) a été retenu pour ce projet puisqu'il permet de bien caractériser les propriétés de fatigue intrinsèques du matériau étant donné son caractère homogène. Un essai homogène permet d'obtenir directement la loi de comportement du matériau testé. Le dispositif pour tester en fatigue les éprouvettes d'enrobé est le même que celui utilisé pour l'essai de module complexe. En termes de procédure, l'essai de fatigue est plus simple que l'essai de module complexe. Il s'agit de piloter la presse hydraulique en déformation imposée à une

température de 10°C pour une fréquence de sollicitation de 10 Hz. Tout d’abord, l’éprouvette doit être conditionnée pendant 4 heures à 10°C avant de débiter. La presse hydraulique induit ensuite des cycles sinusoïdaux de sollicitations jusqu’à ce qu’il y ait rupture totale de l’éprouvette. Les trois extensomètres et le capteur de force permettent de mesurer les paramètres pour calculer le module de rigidité à chacun des cycles de sollicitation, permettant ainsi de suivre l’évolution de l’endommagement durant l’essai de fatigue.

3.4.4.1 Critères de rupture

Un des principaux objectifs de l’essai de fatigue est de déterminer précisément le moment où il y a rupture de l’enrobé. Il est donc important d’utiliser un critère d’analyse permettant d’identifier cet instant avec rigueur. Essentiellement, deux types de critères sont utilisés lors d’une analyse de fatigue, soit les critères :

1. Globaux (concernent l’ensemble des mesures prises par les extensomètres, E^* et φ)
2. Locaux (concernent les mesures prises localement sur un extensomètre, Δ_{ext} et $\Delta\varphi_{\text{ext}}$)

Notons que les critères de type locaux visent à identifier le moment où le champ de contraintes/déformations au sein de l’éprouvette devient non-homogène traduisant ainsi l’apparition d’un endommagement ponctuel marqué. Il existe plusieurs critères de rupture servant à analyser un essai de fatigue, mais les plus récurrents sont les suivants (Baaj, 2002) :

- **Critère classique ($N_{f50\%}$)** - L’éprouvette testée est considérée avoir atteint la rupture au nombre de cycles correspondant à une perte de 50% de la norme du module complexe initial.
- **Critère de fin de phase II ($N_{II/III}$)** – Ce critère vise à identifier le moment où il y a un changement dans le mode d’endommagement de l’éprouvette d’enrobé. En d’autres termes, les réseaux de microfissures forment des macrofissures et cette transition est marquée par un passage de la phase II d’endommagement à la phase III. Il existe des sous-critères permettant d’identifier cette transition. En voici deux couramment utilisés :

- **Écarts des extensomètres ($N_{f\Delta ext}$)** – Les écarts des extensomètres décrivent l'état d'homogénéité du champ de déformation de l'éprouvette tout au long de l'essai. L'apparition des macrofissures perturbe le champ de déformation le rendant ainsi non-homogène. Le nombre de cycles correspondant à l'atteinte d'un écart de 25% pour la déformation d'un des extensomètres est généralement reconnu comme étant la valeur du $N_{f\Delta ext}$.
- **Angle de phase maximum ($N_{fmax\phi}$)** – Cette analyse propose de suivre l'évolution de la norme du module complexe dans l'espace de Black tout au long de l'essai de fatigue. La fin de la durée de vie, soit le début de la phase III, se manifeste au nombre de cycles ($N_{fmax\phi}$) correspondant au point où la valeur de l'angle de phase subit un changement rapide en fin de phase II (Baaj, 2002).

3.4.5 Essai d'orniérage

L'essai de détermination de la résistance à l'orniérage est un essai de simulation qui sert à évaluer le comportement aux déformations permanentes des enrobés bitumineux d'une chaussée (Di Benedetto et al., 2005). L'appareil utilisé pour cet essai est l'orniéreur MLPC (Figure 3.26), qui répond aux caractéristiques requises par la méthode d'essai LC 26-410 du MTQ. Dans le cadre de ce projet, des plaques d'enrobé bitumineux ($180 \times 500 \times 100 \text{ mm}^3$) ont été confectionnées à l'aide du compacteur de plaque LCPC (Figure 3.27), tel que recommandé par la méthode d'essai LC 26-400 du MTQ, pour ensuite être testées à l'orniéreur.



Figure 3.26 Ornièreur MLPC



Figure 3.27 Compacteur de plaque LCPC

L'essai d'orniérage consiste à appliquer à répétition une charge roulante de 5 kN pour une fréquence de 1 Hz dans un milieu isotherme, où la température de conditionnement de l'éprouvette est choisie en fonction du type de bitume. Étant donné les bitumes utilisés pour ce projet (PG 76-28P et PG 88-28), une température de conditionnement des éprouvettes de $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ a été choisie. Des mesures de l'évolution de l'ornière doivent être prises tout au long de l'essai et les résultats sont exprimés en traçant l'évolution de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles de chargement.

La norme 4202 du Ministère des Transports du Québec datant de 2013 a fixé des critères maximum d'orniérage pour les différents types d'enrobé bitumineux. En ce qui concerne ce projet, les enrobés bitumineux pouvant être utilisés comme couche de base ne doivent pas avoir un pourcentage d'ornièrisme supérieur à 10% après 30000 cycles.

3.4.6 Récapitulatif des essais

Cette section fait une synthèse des essais réalisés durant les deux phases de ce projet. La présentation du Tableau 3.11 et du Tableau 3.12 est inspirée de Meunier (2005).

Tableau 3.11 Synthèse des essais réalisés pour la première phase du projet

Essai	Norme ou méthodologie	Dimension des éprouvettes			Conditions de l'essai
		Épaisseur ou diamètre (mm)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	
PHASE I					
Densité et absorption	LC 21-065 / LC 21-067	n/a	n/a	n/a	• LC 21-065 pour les granulats fins < 5mm • LC 21-067 pour les gros granulats > 5mm
Granulométrie	LC 21-040	n/a	n/a	n/a	• Dimension supérieure à 80 µm
Sédimentométrie	BNQ 25011-025	n/a	n/a	n/a	• Dimension inférieure à 80 µm
Presse à cisaillement giratoire (PCG)	LC 26-003	Ø150	125	n/a	• Pression verticale de 600 kPa • Angle de giration de 1,25° • Vitesse de 30 girations par minute
Module complexe (E*)	LC 26-700 avec modèle 2S2P1D	Ø60	120	n/a	• Chargement cyclique sinusoïdale • Traction/compression alternée (contrainte moyenne nulle) • Pilotage : déformation de 50 µdef • Stabilisation de température : 4h • T°essais (°C) : -35; -25; -15; -5; 5; 15; 25; 35 • Fréquences (Hz) : 10; 3; 1; 0,3; 0,1; 0,03; 0,01 • 3 extensomètres de 50mm espacés à tous les 120° du centre

Tableau 3.12 Synthèse des essais réalisés pour la deuxième phase du projet

Essai	Norme ou méthodologie	Dimension des échantillons			Conditions de l'essai
		Épaisseur ou diamètre (mm)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	
PHASE II					
Module complexe (E*)	LC 26-700 avec modèle 2S2P1D	Ø60	120	n/a	• Idem à la PHASE I
Fatigue	ETS	Ø80	160	n/a	• Chargement cyclique sinusoïdale • Traction/compression alternée (contrainte moyenne nulle) • Pilotage : déformation imposée • Stabilisation de température : 4h • T°_{essais} (°C) : 10 • Fréquences (Hz) : 10 • 3 extensomètres de 50mm espacés à tous les 120° du centre
Retrait thermique empêché (TSRST)	AASHTO TP 10-93	Ø60	240	n/a	• T°_{départ} : 5°C • 6h de conditionnement thermique en gardant la force à 0 • Taux de refroidissement : 10°C/h • 3 extensomètres de 165mm espacés à tous les 120° du centre
Résistance à l'orniérage	LC 26-410	100	500	180	• T°_{essais} (°C) : 60 • Charge roulante : 5 kN • Fréquence de sollicitation : 1 Hz • Nombre de cycles à froid : 1000 • Nombre de cycles cumulés à chaud : 100; 300; 1000; 3000; 10 000; 30 000; 100 000

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET ANALYSES - PHASE I DU PROJET

La première phase du projet vise à explorer différentes avenues, en fonction des éléments ressortis dans la littérature, qui pourraient aider à formuler un enrobé bitumineux optimisé du point de vue de sa rigidité tout en ayant de bonnes performances pour les autres propriétés d'usage. Dans cette optique, plusieurs enrobés ont été formulés, malaxés et finalement compactés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire (PCG). Lors de ce projet, quatre paramètres de formulation en lien avec le contexte de formulation d'EBHP sont évalués, soit :

- L'influence de nanoparticules (fumée de silice) remplaçant un volume du filler
 - Mélanges d'EBHP : FS10, FS20 et FS30
- L'influence de la nature des granulats (comparaison verre et calcaire)
 - Mélanges d'EBHP : Inter-Calc, Fines-Calc
- L'influence de l'utilisation de chaux hydratée remplaçant un volume du filler
 - Mélanges d'EBHP : Chaux-H
- L'influence de différents liants
 - Mélanges d'EBHP : PG88-28, PG76-28+SBS

Les paramètres de formulation sont différents pour chacun des enrobés et l'analyse vise essentiellement à faire ressortir l'influence de ces paramètres sur deux points spécifiques, soit : 1) son aptitude au compactage (PCG) et, 2) sa rigidité (E^*). Les conclusions de cette phase servent à orienter le choix de l'enrobé à caractériser lors de la phase II. Le détail des constituants des enrobés formulés en phase I se trouve à la §3.3.2.

4.1 Essais d'aptitude au compactage

4.1.1 Densité maximale (d_{mm}) pour l'essai de PCG

Les résultats de l'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) sont généralement utilisés en tant que critères de formulation afin d'évaluer l'aptitude au compactage des enrobés

confectionnés. Il faut toutefois déterminer préalablement la densité maximale du mélange (d_{mm} – méthode d’essai LC 26-045) puisque cette donnée est cruciale pour déterminer l’évolution de la teneur en vides durant l’essai de PCG. La mesure de la d_{mm} a donc été réalisée deux fois pour chacun des enrobés étudiés dans la phase I du projet. Le Tableau 4.1 présente la moyenne des valeurs de d_{mm} obtenues pour chacun des enrobés.

Tableau 4.1 Moyenne des résultats de densité maximale pour les différents enrobés étudiés dans le cadre de la phase I

Mélanges	<i>EBHP (Réf-A)</i>	<i>EBHP (Réf-B)</i>	<i>EBHP (FS10)</i>	<i>EBHP (FS20)</i>	<i>EBHP (FS30)</i>
d_{mm}	2,514	2,521	2,515	2,514	2,506
Mélanges	<i>EBHP (Inter-Calc)</i>	<i>EBHP (Fines-Calc)</i>	<i>EBHP (Chaux-H)</i>	<i>EBHP (PG88-28)</i>	<i>EBHP (PG76-28+SBS)</i>
d_{mm}	2,553	2,545	2,514	2,520	2,526

4.1.2 Calcul de la teneur en vides

Tel que mentionné à la §3.4.1, les données collectées par l’équipement représentent la hauteur de l’éprouvette compactée pour chacune des girations appliquées à cette éprouvette. La densité maximale de l’enrobé sert notamment à calculer, suivant le principe des volumes absolus, la teneur en vides à chaque giration et tracer ainsi son évolution en fonction du nombre de girations appliquées. L’équation (4.1) permet de calculer la teneur en vides à chaque giration (ng).

$$V_i(\%) = 100 \times \frac{h(ng) - h(min.)}{h(ng)} \quad (4.1)$$

Où

$V_i(\%)$ = Pourcentage de vides interstitiels dans l’enrobé

$h(ng)$ = Hauteur de l’éprouvette à un nombre de girations donné (mm)

$h(min.)$ = Hauteur théorique de l’éprouvette pour 0% de vides interstitiels

4.1.3 Comportement à la PCG de l'enrobé de référence

Afin d'assurer une certaine fidélité des résultats de la formulation de référence, deux essais à la PCG ont été effectués puisque cette formulation servira de comparatif tout au long de l'analyse. La Figure 4.1 présente l'évolution de la teneur en vides en fonction des girations sur les deux échantillons du mélange de référence EBHP (Réf).

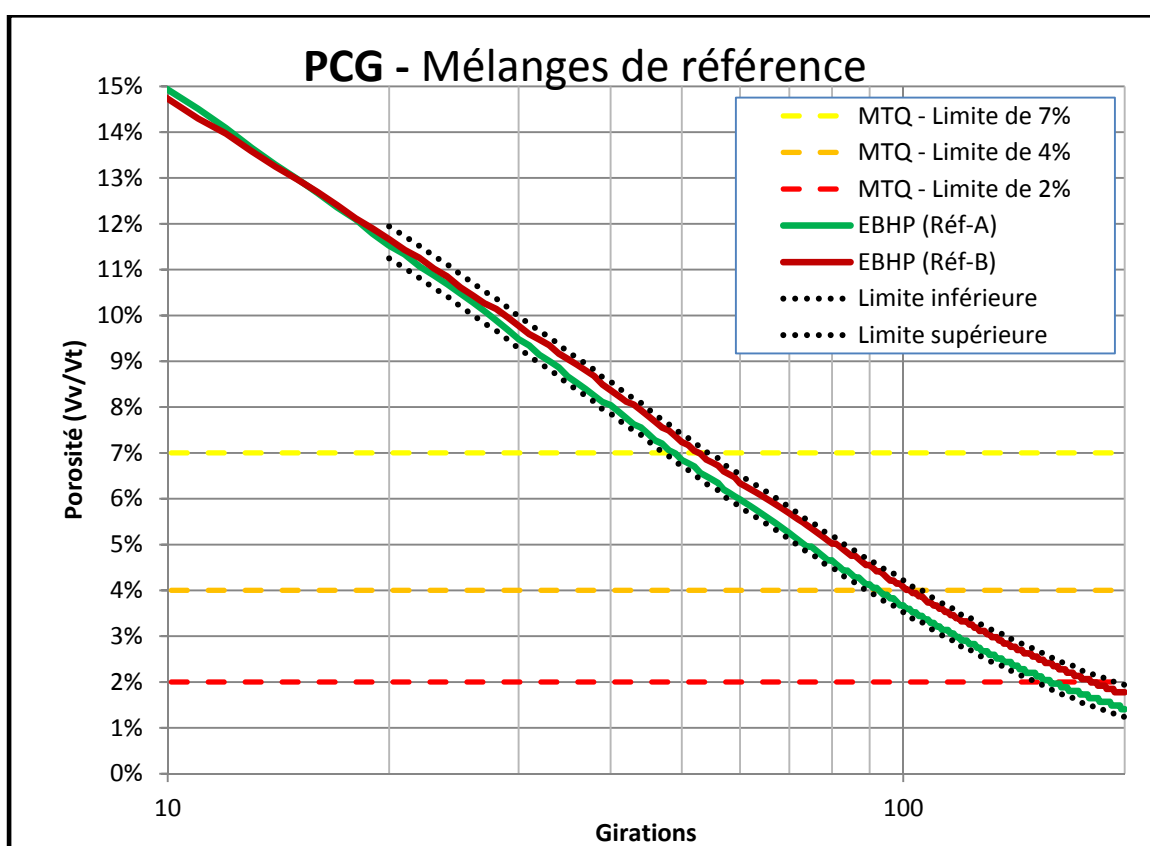


Figure 4.1 Évolution de la teneur en vides des deux échantillons d'EBHP (Réf)

La Figure 4.1 comporte des limites de teneur en vides du MTQ. Ces limites sont utilisées par la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées du MTQ, norme 4202. Dans cette norme, la teneur en vides doit être supérieure ou égale à 11% pour la 10^{ème} giration. Elle doit être située entre 4% et 7% au nombre de girations de design (n_{design}) qui est fonction du type d'enrobé. Finalement, la teneur en vides ne doit pas être inférieure ou égale à 2% à 200

girations afin d'éviter le ressuage et une plus grande vulnérabilité à l'orniérage. Ce dernier critère n'est pas respecté par le mélange de référence EBHP (Réf). Notons cependant que l'EBHP est formulé différemment des autres enrobés de la méthode LC du MTQ et qu'aucune trace de ressuage n'a pu être observée après 200 girations.

La méthode d'essai de PCG du MTQ, LC 26-003, fait mention de quelques critères d'acceptabilité pouvant servir à vérifier ou comparer les résultats d'essais effectués par un seul opérateur pour des girations supérieures ou égales à 20. Parmi ces critères, il y a l'intervalle d'acceptation de 0,7% de vides utilisé pour comparer deux échantillons. L'intervalle d'acceptation représente la limite admissible de l'écart entre les résultats de deux essais correctement exécutés par un seul opérateur. Il y a aussi une valeur de 0,25% de vides d'écart-type qui est jugée acceptable lorsque plus de deux essais sont effectués par un seul opérateur. À la Figure 4.1, l'intervalle d'acceptabilité de 0,7% de vides a été tracé par rapport à la moyenne des deux échantillons. La figure met en évidence que les deux échantillons restent confinés dans l'intervalle d'acceptabilité, ce qui témoigne de la bonne exécution des deux essais. La moyenne de ces résultats pourrait donc être utilisée pour représenter le comportement général à la PCG de la formulation du mélange de référence, EBHP (Réf). Pour des raisons de logistique, un seul échantillon a été testé à la PCG pour les autres formulations. L'écart-type de 0,25% de vides sera, quant à lui, utilisé dans la section destinée à l'analyse pour comparer les résultats des différentes formulations à la moyenne des résultats à la PCG du mélange de référence.

4.1.4 Résultats et analyses pour les différents paramètres de formulation évalués à l'essai de PCG

Les différentes formulations ont toutes subi un essai à la PCG. Dans le cas du mélange de référence, c'est la moyenne des résultats de deux essais à la PCG qui a été utilisée dans l'analyse. Les résultats sont présentés pour 10, 60, 120 et 200 girations. Bien que la teneur en vides à 10 girations soit intéressante puisqu'elle peut donner un indice de la compacité qu'aurait l'enrobé en sortant de la paveuse, ce sont plutôt les résultats à 60, 120 et 200

girations qui sont étudiés lors de cette analyse afin d'avoir une énergie de compaction de l'ordre de grandeur de ce que subirait un enrobé après le passage de rouleaux. En considérant un écart-type par échantillon de $\pm 0,25\%$ de vides, les résultats entre deux échantillons sont comparés en prenant comme hypothèse qu'une différence de teneur en vides supérieure à deux fois l'écart-type, soit $0,50\%$ de vides, est significative.

La Figure 4.2 qui suit présente les résultats des différents mélanges testés à la PCG. Des barres d'erreurs ont été ajoutées à l'histogramme pour être en mesure de visualiser un écart-type de $\pm 0,25\%$ de vides.

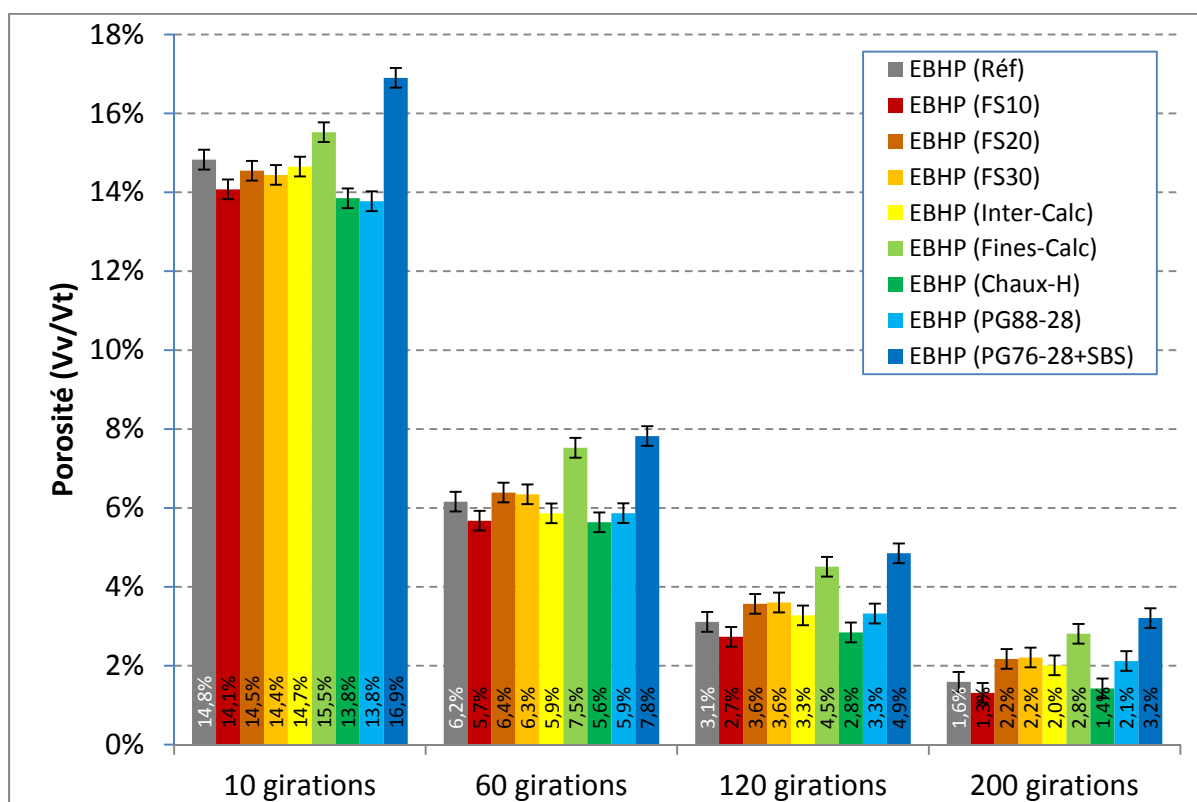


Figure 4.2 Résultats graphiques de teneur en vides à la PCG des mélanges confectionnés en Phase I (Barres d'erreur représentant l'écart-type : $\pm 0,25\%$)

Les résultats sont aussi présentés sous forme tabulaire au Tableau 4.2. Afin de faciliter l'analyse des données, une colonne a été ajoutée à ce tableau avec pour objectif de vérifier si

les différences de compacité, par rapport au mélange de référence, sont significatives ou non. L'écart est donc jugé significatif si la différence de teneur en vides ($V_i - V_{i_{\text{réf}}}$) est plus grande que 0,50% ou plus petite que -0,50%, soit deux fois l'écart-type jugé acceptable lorsque qu'on compare deux essais de PCG censés avoir le même comportement au niveau de la maniabilité (Méthode d'essai LC26-003 du MTQ).

Tableau 4.2 Résultats de la teneur en vides à la PCG des enrobés confectionnés en Phase I

Mélanges	10 girations		60 girations		120 girations		200 girations	
	Porosité (V_i)	$V_i - V_{i_{\text{Réf}}}$	Porosité (V_i)	$V_i - V_{i_{\text{Réf}}}$	Porosité (V_i)	$V_i - V_{i_{\text{Réf}}}$	Porosité (V_i)	$V_i - V_{i_{\text{Réf}}}$
EBHP (Réf)	14,8%	0,00%	6,2%	0,00%	3,1%	0,00%	1,6%	0,00%
EBHP (FS10)	14,1%	-0,75%	5,7%	-0,48%	2,7%	-0,38%	1,3%	-0,28%
EBHP (FS20)	14,5%	-0,28%	6,4%	0,23%	3,6%	0,46%	2,2%	0,58%
EBHP (FS30)	14,4%	-0,39%	6,3%	0,19%	3,6%	0,49%	2,2%	0,62%
EBHP (Inter-Calc)	14,7%	-0,18%	5,9%	-0,30%	3,3%	0,16%	2,0%	0,42%
EBHP (Fines-Calc)	15,5%	0,69%	7,5%	1,37%	4,5%	1,40%	2,8%	1,22%
EBHP (Chaux-H)	13,8%	-0,98%	5,6%	-0,52%	2,8%	-0,27%	1,4%	-0,17%
EBHP (PG88-28)	13,8%	-1,05%	5,9%	-0,29%	3,3%	0,21%	2,1%	0,53%
EBHP (PG76-28+SBS)	16,9%	2,07%	7,8%	1,66%	4,9%	1,74%	3,2%	1,62%

4.1.4.1 Analyse de l'influence de l'ajout de fumée de silice sur la maniabilité (PCG)

Le premier paramètre étudié est l'influence de la fumée de silice sur la maniabilité de la formulation d'EBHP. Les formulations concernées du Tableau 4.2 sont : l'enrobé de référence (Réf) ainsi que les enrobés contenant respectivement 10%, 20% et 30% des particules fines remplacées par de la fumée de silice (FS10, FS20 et FS30).

Après analyse des résultats du Tableau 4.2, on peut constater une légère augmentation de la maniabilité de l'EBHP (FS10) par rapport à l'EBHP (Réf), mais l'écart n'est pas significatif puisque les différences de teneur en vides ($V_i - V_{i_{\text{réf}}}$) sont supérieures à -0,50% pour 60, 120 et 200 girations. Par ailleurs, l'EBHP (FS20) et (FS30) présentent tous les deux un comportement légèrement moins maniable que l'EBHP (Réf). Les écarts deviennent

significatifs ($V_i - V_{i_{ref}} > 0,50\%$) lorsqu'on observe notamment les teneurs en vides pour 200 girations. L'influence de la fumée de silice sur la maniabilité de l'enrobé dans ces proportions d'ajouts reste toutefois très faible. Il est plutôt difficile d'attribuer un phénomène précis aux écarts observés étant donné leur insignifiance ainsi que le petit nombre d'essais réalisés. La substitution des particules fines par de la fumée de silice pour les proportions à l'étude de ce projet a donc très peu ou pas d'influence sur la maniabilité de l'EBHP, puisque les essais ont permis de voir que les variations de maniabilité (PCG) suite à l'ajout de fumée de silice ne sont qu'à une très petite échelle.

4.1.4.2 Analyse de l'influence de la nature des granulats sur la maniabilité (PCG)

Le deuxième paramètre à l'étude est l'influence de la nature minéralogique du granulat sur la maniabilité de l'EBHP. Plus précisément, une analyse comparative est faite entre un enrobé contenant des particules de verre et un autre enrobé où les particules de verre sont remplacées par des particules de calcaire. Les formulations concernées du Tableau 4.2 sont : l'enrobé de référence (Réf) ainsi que les enrobés (Inter-calc) et (Fines-calc) où une portion des particules de verre est remplacée par un même volume de particules de calcaire.

Suite à l'analyse des résultats du Tableau 4.2, on remarque une légère diminution de la maniabilité de l'EBHP (Inter-calc) par rapport à l'EBHP (Réf), mais l'écart n'est pas significatif puisque les différences de teneur en vides ($V_i - V_{i_{ref}}$) restent inférieures à 0,50% pour 60, 120 et 200 girations. Cependant, l'EBHP (Fines-calc) présente un comportement significativement moins maniable ($V_i - V_{i_{ref}} > 0,50\%$) que l'EBHP (Réf) sur l'ensemble des girations observées. Il est probable que le faible taux d'absorption en bitume du verre y soit pour quelque chose. Tel que vu dans le Chapitre 3, les particules de calcaire vont absorber d'avantage le bitume que les particules de verre. Étant donnée que le volume de bitume total est identique pour tous les mélanges comparés, le volume de bitume effectif devrait diminuer si l'un des matériaux utilisés pour un des mélanges d'enrobé a un taux d'absorption plus élevé. En l'occurrence, une diminution du volume de bitume effectif pour les enrobés (Inter-calc et Fines-calc) pourrait expliquer en partie les pertes de maniabilité observées par rapport

à la formulation de référence (Réf) qui contenait d'avantage de particules de verre. Tel que vu à la §1.4.1, la faible conductivité thermique des particules de verre pourrait également expliquer la diminution de la maniabilité du mélange lorsqu'une plus petite quantité de particules de verre est utilisée. En effet, une conductivité thermique plus faible signifie que l'enrobé contenant le plus de particules de verre conserve sa chaleur plus longtemps, facilitant donc sa mise en place. Quoiqu'il en soit, l'utilisation exclusive de particules fines de verre (Inter-calc) semble augmenter d'avantage la maniabilité de l'enrobé que l'utilisation exclusive de particules intermédiaires de verre (Fines-calc). L'utilisation de particules fines et intermédiaires de verre (Réf) reste toutefois supérieure en termes de maniabilité à la PCG. Un plus grand nombre d'essais serait nécessaire pour confirmer les deux hypothèses expliquant en quoi le verre augmenterait la maniabilité de l'enrobé, soit : le faible taux d'absorption du verre et sa faible conductivité thermique.

4.1.4.3 Analyse de l'influence de l'ajout de chaux hydratée sur la maniabilité (PCG)

Le troisième paramètre étudié est l'influence de l'ajout de chaux hydratée sur la maniabilité dans un contexte de formulation d'EBHP. Les formulations concernées du Tableau 4.2 sont : l'enrobé de référence (Réf) ainsi que l'enrobés (Chaux-H) où de la chaux hydratée a été utilisée. La quantité de chaux hydratée utilisée pour la formulation d'EBHP (Chaux-H) représente une proportion de 1,5% de la masse totale des solides. La chaux-hydratée a été ajoutée en substituant à volume égal une portion des particules fines de verre du mélange de référence.

En analysant les résultats du Tableau 4.2, il y a une légère augmentation de la maniabilité de l'EBHP (Chaux-H) par rapport à l'EBHP (Réf). L'écart reste léger puisque la différence de teneur en vides ($V_i - V_{i_{ref}}$) est à peine inférieure à -0,50% pour 60 girations. Cet écart de maniabilité se resserre à 120 et 200 girations et ne peut ainsi plus être considéré comme étant significatif ($V_i - V_{i_{ref}} > -0,50\%$). Il n'y a pas de surprise réelle dans ces résultats étant donné que seulement 1,5% de la masse totale des granulats a été ajoutée en chaux hydratée pour substituer un même volume de particules fines de verre. Cette petite proportion de chaux

hydratée est celle qui est ressortie le plus dans la revue de la littérature et semble donc augmenter très peu la maniabilité de l'enrobé. Davantage d'essais seraient toutefois nécessaires pour confirmer ce résultat.

4.1.4.4 Analyse de l'influence de la nature du liant sur la maniabilité (PCG)

Le dernier paramètre à l'étude est l'influence de la nature du liant sur la maniabilité de la formulation d'EBHP. Les formulations concernées du Tableau 4.2 sont : l'enrobé de référence (Réf) contenant un bitume PG76-28 ainsi que les enrobés (PG88-28) et (PG76-28+SBS). Rappelons que ce dernier contient le même bitume que l'enrobé de référence, soit un PG76-28, mais un additif de styrène-butadiène-styrène (SBS) substituant 12.5% de la masse de bitume (même volume total de liant) a aussi été ajouté sous forme de granules.

Suivant l'analyse des résultats du Tableau 4.2, il n'y a généralement pas de différence significative entre le comportement de maniabilité de l'enrobé EBHP (PG88-28) et l'EBHP (Réf) puisque lorsqu'on observe les différences de teneur en vides ($V_i - V_{i_{ref}}$), ces dernières sont presque toujours inférieures à $\pm 0,50\%$. La différence de teneur en vides de l'EBHP (PG88-28) à 200 girations est de 0,53% ce qui signifie que le mélange est légèrement moins maniable vers la fin de l'essai comparativement au mélange de référence. Ceci peut toutefois s'expliquer par le fait que l'EBHP (PG88-28) nécessite une température de compaction plus élevée que l'EBHP (Réf) pour que les deux enrobés aient une viscosité semblable. La légère perte de maniabilité vers la fin de l'essai pourrait être attribuée à une plus grande dissipation d'énergie thermique du mélange d'EBHP (PG88-28) compacté initialement à plus haute température que le mélange de référence. En ce qui concerne l'EBHP (PG76-28+SBS), il présente un comportement moins maniable que l'EBHP (Réf) pour l'ensemble des girations observées. L'ajout de particules de SBS n'est pas nécessairement un problème pour la maniabilité du mélange, mais l'approche utilisée dans ce projet pour incorporer ces particules ne semble pas être tout à fait au point étant donné la perte de maniabilité observée. Il faudrait faire davantage d'essais dans ce sens pour être en mesure de sortir des conclusions plus concrètes en ce qui concerne l'effet de l'ajout de particules de SBS sur la maniabilité de

l'enrobé. La faible teneur en bitume des mélanges d'EBHP pourrait possiblement être en cause.

4.2 Essais de module complexe

4.2.1 Confection des corps d'épreuve

Les essais de module complexe ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques prélevées par carottage dans des briquettes de PCG. Puisque les essais de PCG sont des essais de compaction et que les briquettes de PCG ont chacune subi un total de 200 girations, les corps d'épreuve prélevés dans ces briquettes ont tous des teneurs en vides très faibles, mais semblables les uns par rapport aux autres. Le Tableau 4.3 présente les caractéristiques physiques des éprouvettes testées.

Tableau 4.3 Caractéristiques géométriques des éprouvettes testées au module complexe

Identification	Hauteurs (mm)			Diamètres			Masse (g)	d _{mb}	d _{mm}	% vides ³
	H1	H2	H3	D1	D2	D3				
EBHP (Réf)	117,19	117,39	117,04	58,84	58,86	58,88	803,8	2,520	2,514	-0,2%
EBHP (FS10)	117,72	117,49	117,59	58,85	58,83	58,84	804,8	2,517	2,515	-0,1%
EBHP (FS20)	113,47	113,34	113,60	58,90	58,82	58,87	775,2	2,510	2,514	0,1%
EBHP (FS30)	113,70	113,66	113,61	58,87	58,86	58,90	773,3	2,499	2,501	0,1%
EBHP (Inter-calc)	112,04	111,96	112,17	58,89	58,90	58,87	779,3	2,554	2,553	0,0%
EBHP (Fines-calc)	114,68	114,61	114,56	58,91	58,91	58,92	792,1	2,535	2,545	0,4%
EBHP (Chaux-H)	111,92	111,52	112,03	59,10	59,13	59,14	767,2	2,499	2,514	0,6%
EBHP (PG88-28)	117,79	117,49	118,06	59,30	59,08	59,09	810,2	2,503	2,520	0,7%
EBHP (PG76-28+SBS)	104,58	104,70	104,63	59,75	59,71	59,67	734,0	2,505	2,526	0,8%

³ Les teneurs en vides négatives sont interprétées comme étant très près de 0%. Elles peuvent être expliquées par la limite de précision des appareils de mesure, créant ainsi une certaine variance au niveau de la teneur en vides calculée.

4.2.2 Résultats de module complexe pour l'enrobé de référence

L'ensemble des résultats de module complexe a été calé en utilisant le modèle rhéologique 2S2P1D présenté à la §3.4.2.3. Tel que mentionné précédemment, le calage des paramètres 2S2P1D a été effectué en utilisant la fonction « solver » de l'outil Excel de façon à répartir et minimiser les écarts entre les données mesurées et les données modélisées. Cette section présente en détail les résultats ainsi que le modèle 2S2P1D paramétré aux données obtenues lors d'un essai de module complexe sur le mélange de référence EBHP (Réf). Le Tableau 4.4 présente les paramètres 2S2P1D de l'enrobé de référence.

Tableau 4.4 Paramètres 2S2P1D de l'EBHP (Réf)

Enrobé	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ_{0E} (T=15°C) (s)	β	C_1	C_2
EBHP (Réf)	78	43669	0,173	0,523	1,79	0,0100	4350	28	168

Une fois les paramètres de 2S2P1D déterminés, les résultats et le modèle peuvent être représentés dans l'espace Cole-Cole (Figure 4.3) et dans l'espace de Black (Figure 4.4).

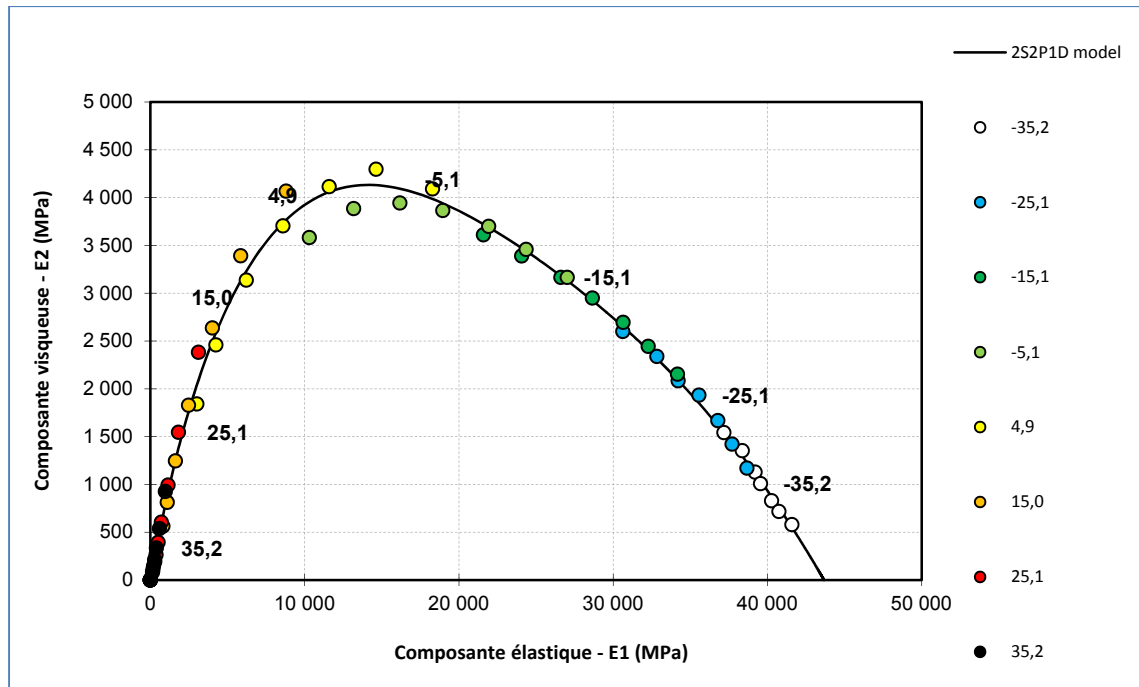


Figure 4.3 Résultats et modèle de l'EBHP (Réf) dans l'espace Cole-Cole (PG76-28P)

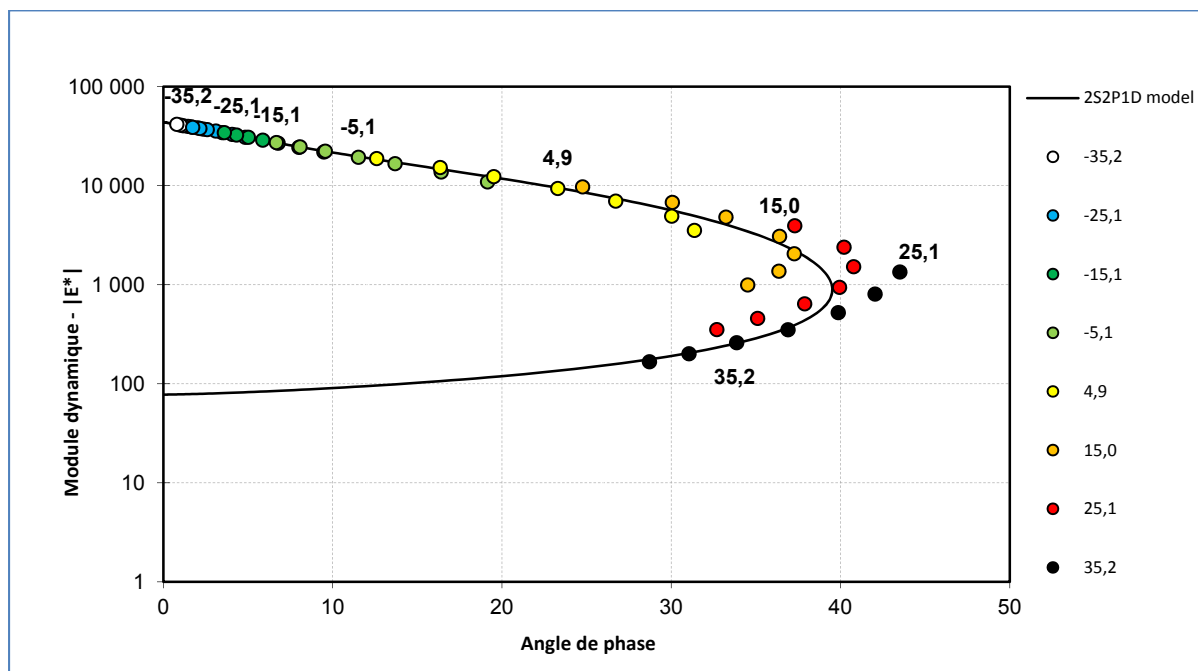


Figure 4.4 Résultats et modèle de l'EBHP (Réf) dans l'espace de Black (PG76-28P)

On remarque à la Figure 4.4 que le modèle 2S2P1D ne semble pas représenter très bien l'angle de phase pour les températures élevées. En effet, les résultats pour ces températures ne semblent pas former une courbe unique, mais plutôt ce qui pourrait s'apparenter à des « virgules ». Le principe d'équivalence temps-température n'est donc pas respecté. On peut souvent constater ce phénomène pour des enrobés composés de bitume pur à forte teneur en paraffine ou certains bitumes polymères (Di Benedetto et al., 2005). On dit que l'enrobé respecte partiellement le PETT puisque les résultats forment tout de même une courbe unique pour les températures plus froides. Ce comportement a pu être constaté tout au long de ce programme de recherche pour les essais où l'enrobé contenait du bitume PG76-28P de McAsphalt et de façon un peu moins marquée pour le bitume PG88-28 de Bitumar. La corrélation entre le modèle 2S2P1D et les mesures est donc moins bonne pour les températures chaudes des enrobés confectionnés avec un bitume polymère.

La Figure 4.5 et la Figure 4.6 présentent les écarts relatifs $\left(\frac{\text{mesuré} - \text{modélisé}}{\text{modélisé}} * 100\% \right)$ pour la norme du module complexe $|E^*|$ et l'angle de phase (φ_E) du mélange de référence suivant la calibration du modèle 2S2P1D aux données mesurées. Les écarts pour l'évolution de la norme du module complexe $|E^*|$ ainsi que l'angle de phase (φ_E) sont tracés en fonction de la fréquence équivalente déterminée pour une température de 15°C selon le principe d'équivalence temps-température (PETT). On remarque que ces écarts sont plus importants pour la zone de températures élevées et/ou fréquences très basses ce qui indique que le modèle utilisé a un plus faible pouvoir de prédiction dans cette zone.

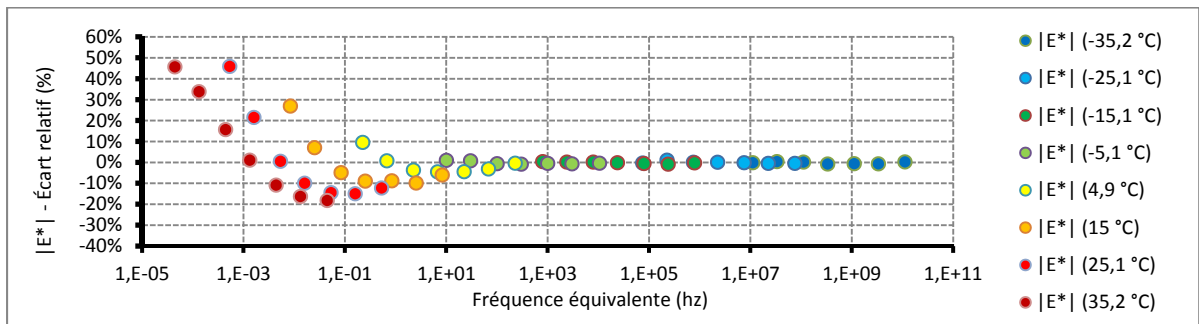


Figure 4.5 Écarts relatifs de la norme du module complexe $|E^*|$ sur l'ensemble des fréquences équivalentes ($T_{ref}=15^\circ\text{C}$) de l'EBHP (Réf)

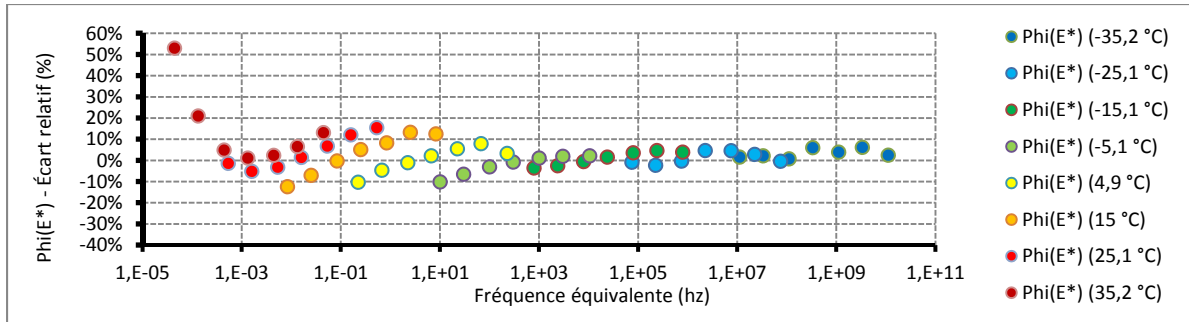


Figure 4.6 Écarts relatifs de l'angle de déphasage sur l'ensemble des fréquences équivalentes ($T_{ref}=15^{\circ}C$) de l'EBHP (Réf)

Afin d'évaluer la qualité du modèle calé aux données mesurées, les valeurs modélisées et mesurées ont été tracées dans un espace logarithmique pour les composantes élastiques ($\log E_1$) et visqueuses ($\log E_2$). Le fait de travailler dans un environnement logarithmique permet de mieux comparer les écarts entre le modèle et les mesures en mettant en évidence les variations relatives. Puisque l'ensemble des valeurs de rigidité ont des ordres de grandeur très différents, l'analyse de ces valeurs dans l'espace logarithmique permet donc d'amplifier l'importance des écarts pour les valeurs plus faibles et de la réduire pour les valeurs plus élevées. Dans un premier temps, le coefficient de détermination (R^2) a été évalué entre les valeurs modélisées et mesurées de la composante élastique ($\log E_1$) ainsi que la composante visqueuse ($\log E_2$). Notons que plus la valeur du coefficient de détermination (R^2) est près de 1, meilleure est la corrélation linéaire entre les données modélisées et mesurées. Toujours dans un espace logarithmique, l'erreur de prédiction moyenne (RMSE) a été calculée sur l'écart (*mesuré - modélisé*) des valeurs ($\log E_1$) et ($\log E_2$). Cette façon d'évaluer la qualité du modèle est utilisée par la méthode d'essai du MTQ LC 26-700, mais le modèle utilisé n'est pas le 2S2P1D, mais plutôt celui de Huet-Sayegh. Le Tableau 4.5 présente les paramètres statistiques évalués ainsi que le pourcentage de vides interstitiels de l'éprouvette testée. À noter que la teneur en vides de l'ensemble des éprouvettes sont très près de 0% étant donné qu'elles ont été carottées dans des briquettes de PCG ayant elles-mêmes environ 2% de vides à chaud. Un pourcentage de vides négatif est dû à l'erreur des mesures, soit celle des hauteurs de PCG en cours de giration, des dimensions mesurées sur l'éprouvette carottée et des mesures effectuées pour déterminer la valeur de d_{mm} . Le Tableau 4.6 présente la norme

du module complexe du mélange de référence pour deux températures couramment utilisées dans la littérature.

Tableau 4.5 Paramètres statistiques évalués sur la qualité du calage de l'EBHP (Réf)

Enrobé	$R^2_{\text{Log}(E1)}$	$R^2_{\text{Log}(E2)}$	$\text{RMSE}_{\text{Log}(E1)}$	$\text{RMSE}_{\text{Log}(E2)}$	V_i (%)
EBHP (Réf)	1,00	0,99	0,055	0,057	-0,24%

Tableau 4.6 Norme du module complexe de l'EBHP (Réf) modélisée à 15°C et 10°C pour une fréquence de 10Hz

Enrobé	$ E^* _{15^\circ\text{C}, 10\text{ Hz}} \text{ (MPa)}$	$ E^* _{10^\circ\text{C}, 10\text{ Hz}} \text{ (MPa)}$
EBHP (Réf)	10 946	14 980

4.2.3 Résultats et analyses comparative du module complexe des formulations testées

Cette section compare les résultats de module complexe pour l'ensemble des enrobés testés aux résultats de l'EBHP (Réf). Ces comparaisons ont pour objectif de faire ressortir l'influence des différents paramètres de formulation étudiés sur la rigidité des enrobés dans un contexte de formulation d'EBHP. C'est en considérant les conclusions de l'analyse de ces résultats qu'un EBHP est formulé et est caractérisé de façon plus complémentaire lors de la phase II de ce programme de recherche.

Une fois les essais de module complexe réalisés pour chacun des mélanges, le calage du modèle aux données mesurées a été effectué. Le Tableau 4.7 présente les paramètres 2S2P1D des enrobés testés pour la première phase de ce projet. L'ANNEXE VI présente également les données mesurées (espace Cole-Cole) pour tous les enrobés testés en phase I ainsi que le modèle 2S2P1D correspondant aux données.

Tableau 4.7 Paramètres 2S2P1D des enrobés testés en phase I

Enrobé	E_{∞} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ_{0E} (T=15°C) (s)	β	C_1	C_2
EBHP (Réf)	78	43 669	0,173	0,523	1,79	0,0100	4 350	28	168
EBHP (FS10)	54	40 541	0,180	0,531	1,87	0,0050	4 350	27	174
EBHP (FS20)	66	40 779	0,168	0,543	1,63	0,0056	4 350	23	171
EBHP (FS30)	62	41 662	0,170	0,530	1,57	0,0074	4 350	26	163
EBHP (Inter-Calc)	72	44 854	0,168	0,507	1,74	0,0072	4 350	32	199
EBHP (Fines-Calc)	65	41 812	0,166	0,517	1,55	0,0046	4 350	30	185
EBHP (Chaux-H)	75	43 684	0,160	0,505	1,61	0,0073	4 350	28	173
EBHP (PG88-28)	203	43 588	0,151	0,465	2,10	0,0986	2 751	32	193
EBHP (PG76-28+SBS)	109	41 771	0,147	0,456	1,50	0,0067	4 478	27	170

Tout comme à la §4.2.2, la qualité du calage du modèle 2S2P1D aux données mesurées a été évaluée dans un espace logarithmique pour les composantes élastiques ($\log E_1$) et visqueuses ($\log E_2$) en identifiant le coefficient de détermination (R^2) ainsi que l'erreur de prédiction moyenne (RMSE) des enrobés testés. Le Tableau 4.8 présente les paramètres statistiques ainsi que le pourcentage de vides interstitiels des éprouvettes testées. Afin de comparer les différents résultats de module complexe, le Tableau 4.9 présente la norme du module complexe des mélanges étudiés pour deux groupes de température et fréquence couramment utilisées dans la littérature, soit 15°C;10 Hz et 10°C;10Hz.

Tableau 4.8 Paramètres statistiques de la qualité du calage et vides interstitiels des enrobés testés en phase I

Enrobé	$R^2_{\text{Log}(E1)}$	$R^2_{\text{Log}(E2)}$	$\text{RMSE}_{\text{Log}(E1)}$	$\text{RMSE}_{\text{Log}(E2)}$	Vi (%)
EBHP (Réf)	1,00	0,99	0,055	0,057	-0,24%
EBHP (FS10)	1,00	0,99	0,058	0,057	-0,08%
EBHP (FS20)	1,00	0,99	0,040	0,042	0,14%
EBHP (FS30)	1,00	0,99	0,053	0,053	0,09%
EBHP (Inter-Calc)	0,99	0,99	0,060	0,056	-0,02%
EBHP (Fines-Calc)	0,99	0,99	0,061	0,055	0,38%
EBHP (Chaux-H)	0,99	0,99	0,058	0,053	0,60%
EBHP (PG88-28)	1,00	0,99	0,035	0,030	0,69%
EBHP (PG76-28+SBS)	0,99	0,99	0,053	0,045	0,82%

Tableau 4.9 Norme du module complexe des enrobés testés en phase I avec le modèle 2S2P1D à 15°C et 10°C pour une fréquence de 10Hz

Enrobé	$ E^* _{15^\circ\text{C}, 10\text{ Hz}} \text{ (MPa)}$	$ E^* _{10^\circ\text{C}, 10\text{ Hz}} \text{ (MPa)}$
EBHP (Réf)	10 946	14 980
EBHP (FS10)	8 331	11 849
EBHP (FS20)	9 226	12 957
EBHP (FS30)	10 335	14 322
EBHP (Inter-Calc)	10 542	14 657
EBHP (Fines-Calc)	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

Il reste toutefois difficile de comparer les résultats de module complexe des différents mélanges pour l'ensemble des températures-fréquences. Afin de mieux quantifier ces écarts, le coefficient complexe de rigidité (C^*) est introduit pour permettre de mieux cerner l'effet rigidifiant de certains paramètres de formulation sur toute la gamme de températures et fréquences. Le C^* est un rapport entre le module complexe de l'enrobé à comparer (E^*_i) et celui de l'enrobé de référence ($E^*_{\text{Réf}}$). Le calcul du C^* exploite le principe d'équivalence temps-température et il est donc défini à une fréquence équivalente (f_e) par l'équation suivante (Delaporte et al., 2007; Lamothe, 2014) :

$$C^* = \frac{E^*_{i(f_{\acute{e}})}}{E^*_{Réf(f_{\acute{e}})}} \quad (4.2)$$

Il est important de mentionner que C^* est un nombre complexe qui n'a pas d'unité. Le C^* peut donc être défini dans un espace vectoriel complexe. Chacun des vecteurs correspondant à une fréquence équivalente ($f_{\acute{e}}$) pour une température donnée peut être identifié par la norme du coefficient complexe de rigidité $|C^*|$ ainsi que l'angle de phase du coefficient complexe de rigidité (φ_C).

À partir de l'équation (4.2), on peut écrire :

$$C^* = \frac{E^*_i}{E^*_{Réf}} = \frac{|E^*_i|e^{i\varphi_{E,i}}}{|E^*_{Réf}|e^{i\varphi_{E,Réf}}} \quad (4.3)$$

La norme du coefficient complexe de rigidité $|C^*|$ peut donc être déterminée ainsi :

$$|C^*| = \frac{|E^*_i|}{|E^*_{Réf}|} \quad (4.4)$$

Le coefficient complexe de rigidité peut également s'écrire ainsi :

$$C^* = |C^*|e^{i(\varphi_{E,i}-\varphi_{E,Réf})} \quad (4.5)$$

L'angle de phase du coefficient complexe de rigidité s'écrit donc :

$$\varphi_C = \varphi_{E,i} - \varphi_{E,Réf} \quad (4.6)$$

C'est donc en utilisant les équations (4.4) et (4.6) qu'il est possible de décrire l'évolution des écarts entre les modules complexes analysés en fonction d'une fréquence équivalente ($f_{\acute{e}}$) pour une température donnée. De façon générale, une norme du coefficient complexe de rigidité $|C^*|$ supérieure à 1 signifie que l'enrobé « i » étudié est plus rigide que l'enrobé de

référence et vice-versa. Dans le même ordre d'idées, un angle de phase du coefficient complexe de rigidité (ϕ_C) positif signifie que l'enrobé « i » étudié est plus visqueux que l'enrobé de référence et vice-versa. L'utilisation du coefficient complexe de rigidité (C^*) servira donc de pilier pour l'analyse de l'influence des différents paramètres de formulation sur la rigidité.

4.2.3.1 Analyse de l'influence de l'ajout de fumée de silice sur le module complexe

Le premier paramètre étudié est l'influence de la fumée de silice sur le module complexe de la formulation d'EBHP. Dans le but de déterminer l'influence de l'ajout de fumée de silice sur la rigidité de l'enrobé, l'évolution du coefficient complexe de rigidité (C^*) a été évaluée en comparant les E^* de l'enrobé de référence aux résultats de E^* des trois formulations contenant de la fumée de silice. La Figure 4.7 présente l'évolution de la norme du coefficient complexe de rigidité $|C^*|$.

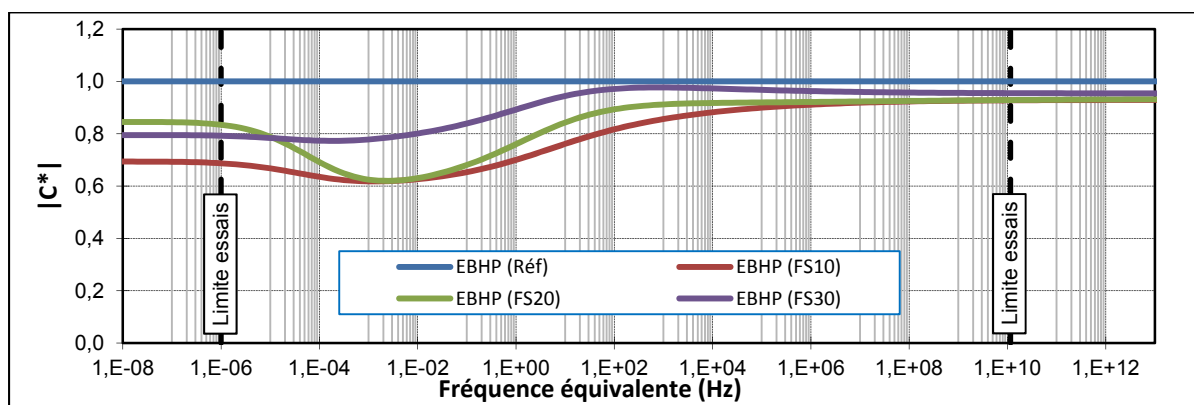


Figure 4.7 Évolution de la norme du coefficient complexe $|C^*|$ pour les enrobés avec ajout de fumée de silice ($T_{ref}=15^{\circ}C$)

Les limites d'essais à hautes et basses fréquences représentent respectivement les mesures prises à $-35^{\circ}C$ / 10 Hz (à droite) et $35^{\circ}C$ / 0,01 Hz (à gauche). En observant les résultats du $|C^*|$ de la Figure 4.7, il peut être constaté que pour l'ensemble des fréquences et températures, les enrobés ayant été formulés avec de la fumée de silice sont moins rigides que l'enrobé de référence. Curieusement, c'est l'EBHP (FS30) contenant 30% des particules

fines en fumée de silice qui semble avoir été le moins affecté au niveau de la rigidité. L'EBHP (FS10) contenant 10% des particules fines en fumées de silice est au contraire celui qui semble avoir subi les plus grosses pertes de rigidité. L'ajout de fumée de silice semble également diminuer la rigidité de façon plus marquée lorsque l'enrobé est sollicité à température élevée et/ou basse fréquence puisque le $|C^*|$ des trois enrobés avec fumée de silice est situé entre 0,6 et 0,85. Ce coefficient est toutefois plus élevé pour les hautes fréquences, soit environ entre 0,9 et 0,98 ce qui signifie que la rigidité est très près de celle de l'EBHP (Réf).

La Figure 4.8 présente l'évolution de l'angle de phase (φ_C) du coefficient complexe de rigidité.

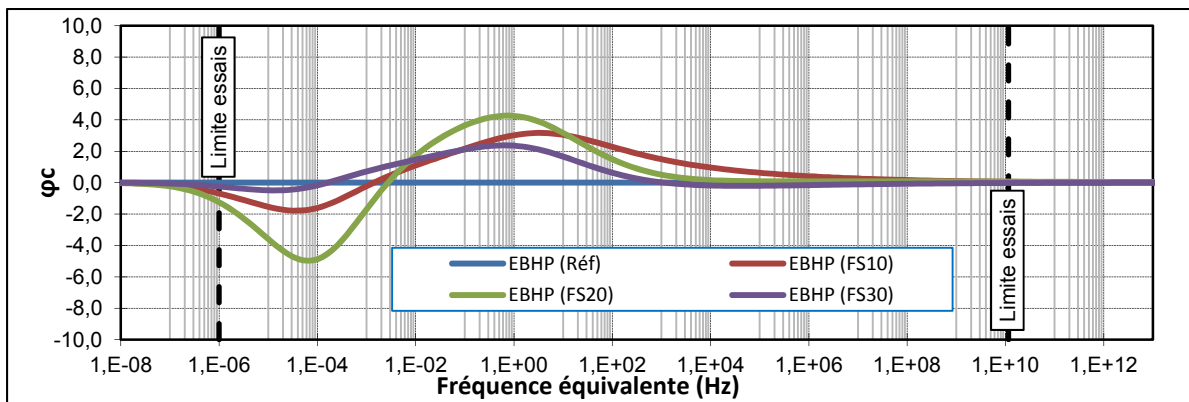


Figure 4.8 Évolution de l'angle de phase (φ_C) pour les enrobés avec ajout de fumée de silice ($T_{ref}=15^{\circ}C$)

En observant les résultats de la Figure 4.8, il peut être constaté que pour les enrobés avec fumée de silice, l'angle de phase (φ) est généralement un peu plus faible aux basses fréquences ($f_e < 1E-3$ Hz). En ce qui concerne les plus hautes fréquences ($1E-3$ Hz $< f_e$), l'angle de phase des enrobés avec fumée de silice est un peu plus élevé que pour l'enrobé de référence. Toutefois, les écarts restent relativement faibles ce qui mène à l'hypothèse que l'ajout d'une certaine proportion de fumée de silice n'influence pas de façon importante le comportement visqueux de l'EBHP. Notons également que c'est l'EBHP (FS30) qui est le

plus semblable à l'enrobé de référence sans fumée de silice en terme de comportement visqueux.

En définitive, aucune des différentes proportions d'ajout de fumée de silice n'a permis de rigidifier l'EBHP (Réf). Les résultats obtenus sont plutôt surprenants puisque, selon la littérature, la surface spécifique importante des particules de fumée de silice aurait dû avoir un effet rigidifiant sur l'enrobé bitumineux. Cet effet rigidifiant serait étroitement lié à la surface spécifique des particules et au phénomène d'adsorption, §1.3.3.2. Une hypothèse fort intéressante pourrait peut-être expliquer les résultats obtenus. Bien qu'en théorie les particules de fumée de silice permettent de développer une surface spécifique très importante, les particules sont difficiles à bien disperser dans le mélange et ont plutôt tendance à s'agglomérer, réduisant ainsi la surface spécifique effective. Une meilleure dispersion des particules aurait pu permettre de mieux observer l'effet rigidifiant de la fumée de silice.

4.2.3.2 Analyse de l'influence de la nature minéralogie des granulats sur le module complexe

Le deuxième paramètre consiste à étudier l'influence de la nature minéralogique des granulats (verre VS calcaire) sur le module complexe de la formulation d'EBHP. Afin de mieux cerner cette influence, l'évolution du coefficient complexe de rigidité (C^*) a été évaluée en comparant les E^* de l'enrobé de référence à ceux de l'EBHP (Inter-Calc) et l'EBHP (Fines-Calc). La Figure 4.9 présente l'évolution de la norme du coefficient complexe de rigidité $|C^*|$.

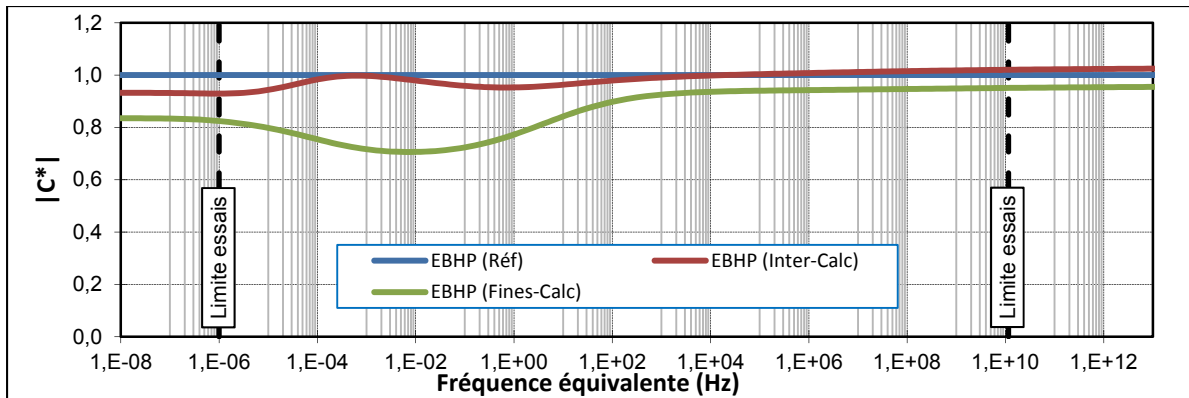


Figure 4.9 Évolution de la norme du coefficient complexe $|C^*|$ pour les enrobés servant à déterminer l'influence de la nature des granulats ($T_{ref}=15^\circ C$)

Les résultats du $|C^*|$ montrent que sur toute la gamme de fréquences-températures, l'EBHP (Fines-Calc) est moins rigide que l'EBHP (Réf) sur toute la gamme de fréquences-températures. Cette perte de rigidité est d'avantage marquée pour les basses fréquences ($f_e < 1E-1$ Hz). En ce qui concerne les résultats obtenus pour l'EBHP (Inter-Calc), la rigidité est légèrement inférieure par rapport à l'EBHP (Réf) pour les basses fréquences, mais l'écart avec l'enrobé de référence est faible puisque le $|C^*|$ est presque égal à 1 (0,90 à 0,99).

La Figure 4.10 présente l'évolution de l'angle de phase (φ_C) du coefficient complexe de rigidité.

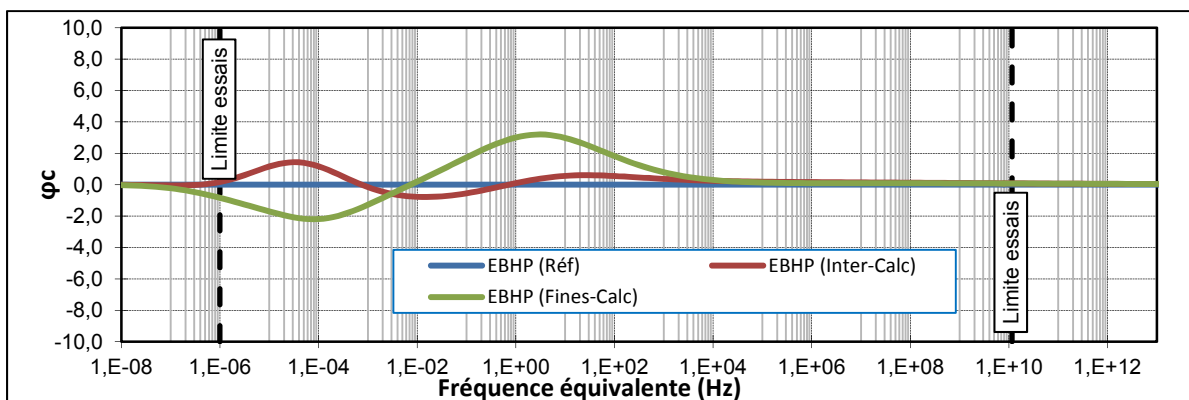


Figure 4.10 Évolution de l'angle de phase (φ_C) pour les enrobés servant à déterminer l'influence de la nature des granulats ($T_{ref}=15^\circ C$)

Les résultats montrent que pour l'EBHP (Inter-Calc), l'angle de phase ($\varphi_{E,i}$) varie très peu par rapport à l'enrobé de référence ($\pm 1^\circ$) et présente donc essentiellement le même comportement visqueux que l'EBHP (Réf). Quoiqu'un peu plus importantes, les valeurs de φ_C restent relativement faibles pour l'EBHP (Fines-Calc). Ce dernier présente donc un comportement légèrement moins visqueux pour les basses fréquences, hautes températures ($f_e < 1E-3$ Hz) et un peu plus visqueux pour les plus hautes fréquences, basses températures ($1E-3$ Hz $< f_e$). De façon générale, la nature des granulats utilisés (verre ou calcaire) ne semble pas, ou très peu, avoir de l'influence sur le comportement visqueux de l'EBHP puisqu'il n'y a pas d'écarts importants lorsqu'on compare l'évolution des angles de phases (φ).

Globalement, c'est l'EBHP (Réf) formulé avec des particules fines et intermédiaires de verre qui a permis d'obtenir l'enrobé le plus rigide, plus particulièrement pour les basses fréquences et/ou hautes températures. C'est la substitution des particules fines de verre par des particules fines de calcaire ($< 80\mu\text{m}$) qui semble avoir le plus d'impact sur la rigidité. Il faut cependant souligner que, pour des raisons de logistique, les particules fines de calcaire utilisées avaient une granulométrie légèrement plus grossière que les particules fines de verre, donc la nature du granulat n'était pas réellement le seul paramètre à avoir été changé lorsque l'EBHP (Fines-Calc) est comparé à l'enrobé de référence. Les résultats obtenus pourraient s'expliquer en partie par le fait que l'enrobé contenant le plus de verre est aussi celui qui a le volume de bitume effectif le plus élevé. En effet, puisque le volume de bitume est le même pour tous les enrobés testés et que le calcaire absorbe davantage de bitume que le verre, une plus grande partie du bitume est absorbée pour les mélanges contenant une plus grande proportion de calcaire. Un volume de bitume effectif insuffisant peut nuire à la cohésion entre les particules de l'enrobé. On pouvait d'ailleurs remarquer lors du malaxage qu'il semblait y avoir un meilleur enrobage des grosses particules pour l'enrobé de référence qui contenait la plus grande proportion de verre.

4.2.3.3 Influence de la chaux hydratée sur le module complexe

Le troisième paramètre étudié est l'influence de la chaux hydratée sur le module complexe de la formulation d'EBHP. Dans le but d'être en mesure de déterminer l'influence de la chaux hydratée sur la rigidité de l'enrobé, l'évolution du coefficient complexe de rigidité (C^*) a été évaluée en comparant le E^* l'enrobé de référence à celui de l'EBHP (Chaux-H). La Figure 4.11 présente l'évolution de la norme du coefficient complexe de rigidité $|C^*|$.

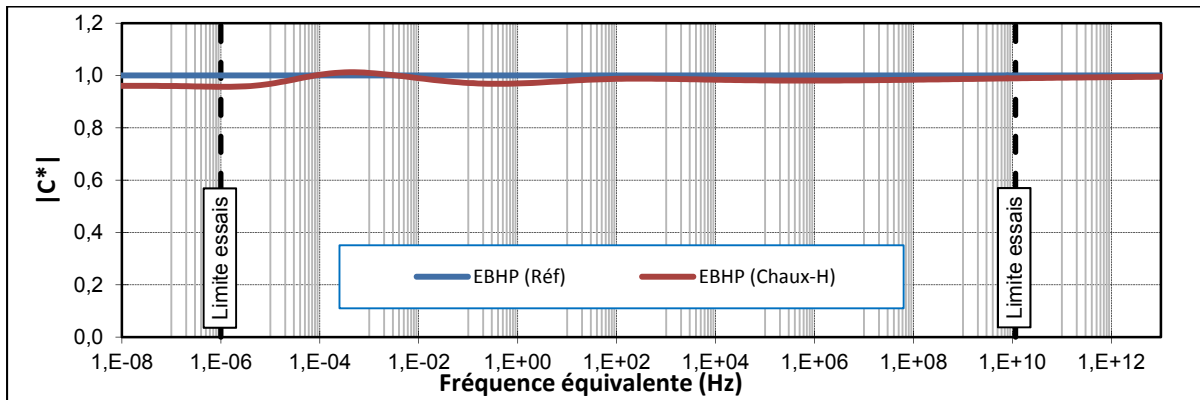


Figure 4.11 Évolution de la norme du coefficient complexe $|C^*|$ pour l'enrobé servant à déterminer l'influence de la chaux hydratée ($T_{ref}=15^{\circ}C$)

En observant les résultats, il peut être constaté que sur toute la gamme de fréquences-températures, l'EBHP (Chaux-H) présente une rigidité très semblable à l'EBHP (Réf). Les écarts de la norme du coefficient sont peu significatifs donc presque égaux à 1, soit une variation de 0,96 à 1,01 pour sur l'ensemble des fréquences équivalentes (f_e) à $15^{\circ}C$.

La Figure 4.12 présente l'évolution de l'angle de phase (ϕ_C) du coefficient complexe de rigidité de l'enrobé servant à déterminer l'influence de la chaux hydratée.

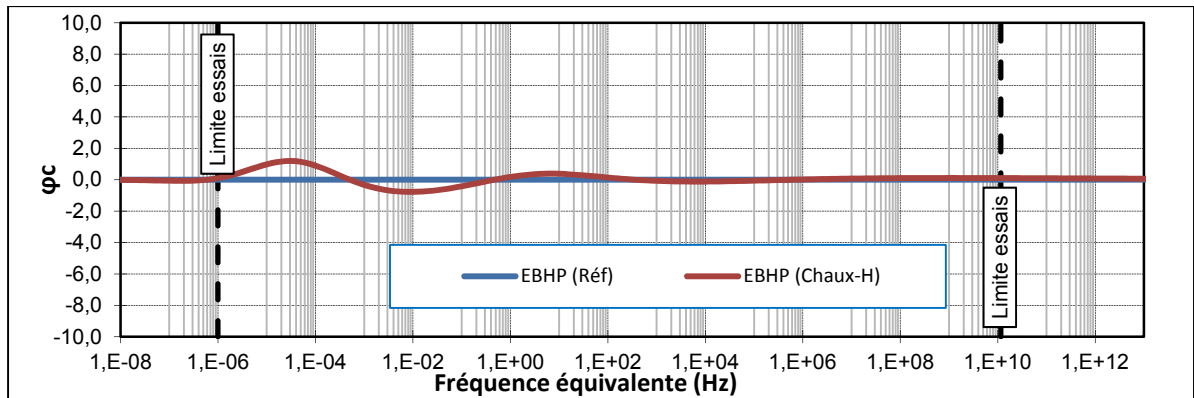


Figure 4.12 Évolution de l'angle de phase (φ_c) pour les enrobés servant à déterminer l'influence de la chaux hydratée ($T_{ref}=15^\circ C$)

En observant les résultats, il peut être constaté que pour l'enrobé contenant de la chaux hydratée, le comportement visqueux pour l'ensemble des fréquences équivalentes est essentiellement le même que pour le mélange de référence. En effet, l'angle de phase ($\varphi_{E,i}$) du EBHP (Chaux-H) varie très peu par rapport à l'enrobé de référence ($\pm 1^\circ$).

En définitive, un changement au niveau de la rigidité suite à l'utilisation de chaux hydratée n'a pu être observé. La proportion ajoutée de chaux hydratée de 1,5% de la masse des solides, tel que suggéré par la littérature, n'est pas très élevée. Les bénéfices mentionnés de la chaux ne sont pas particulièrement reliés à une augmentation de la rigidité. La littérature mentionne surtout une meilleure résistance au désenrobage ainsi qu'une meilleure résistance en fatigue et au vieillissement chimique. Il est aussi mentionné que ces bénéfices sont encore plus marqués lorsque des proportions plus importantes sont utilisées. L'utilisation de la chaux hydratée reste toutefois intéressante pour ce projet puisqu'elle ne semble pas nuire à la rigidité globale de l'enrobé et qu'elle pourrait aider à favoriser le lien bitume-verre.

4.2.3.4 Influence de la nature du liant sur le module complexe

Le dernier paramètre étudié est l'influence de la nature du liant sur le module complexe de la formulation d'EBHP. Afin d'être en mesure de déterminer l'influence de la nature des liants

utilisés sur le module complexe des enrobés, l'évolution du coefficient complexe de rigidité (C^*) a été évaluée en comparant le E^* de l'enrobé de référence à celui de l'EBHP (PG88-28) et de l'EBHP (PG76-28+SBS). La Figure 4.13 présente l'évolution de la norme du coefficient complexe de rigidité $|C^*|$.

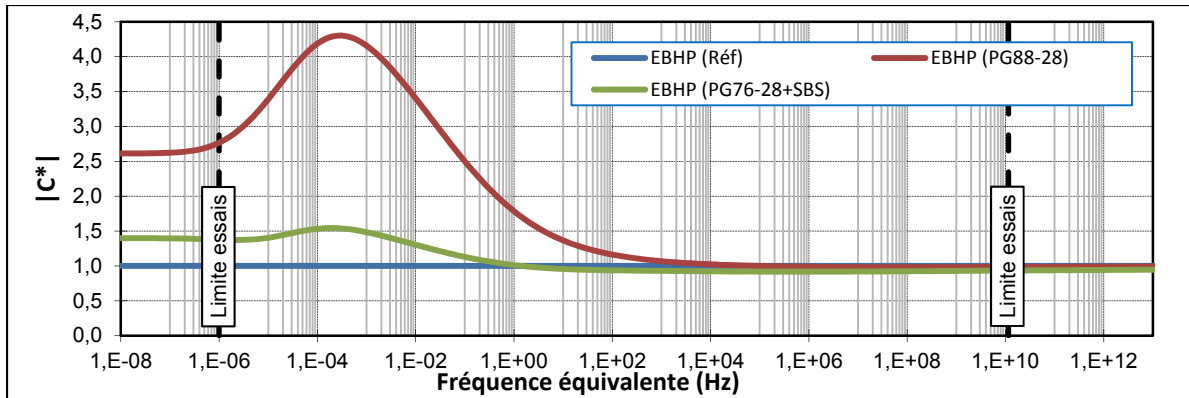


Figure 4.13 Évolution de la norme du coefficient complexe $|C^*|$ pour l'enrobé servant à déterminer l'influence de la nature du liant ($T_{ref}=15^{\circ}C$)

En observant les résultats, il peut être constaté que la norme du module complexe de l'EBHP (PG-88-28) est 2,5 à 4,3 fois plus élevée que celle de l'EBHP (Réf) aux basses fréquences ($f_e < 1E-3$) ce qui n'est pas négligeable. Pour ces mêmes fréquences, l'EBHP (PG76-28+SBS) a également mieux performé que l'enrobé de référence avec une norme du module complexe 1,5 fois plus élevée. Notons cependant que pour les plus hautes fréquences ($1E+02 < f_e$), l'EBHP (PG88-28) est de rigidité équivalente à l'enrobé de référence contrairement à l'EBHP (PG76-28+SBS) qui est très légèrement plus faible.

La Figure 4.14 présente l'évolution de l'angle de phase (φ_C) du coefficient complexe de rigidité de l'enrobé servant à déterminer l'influence de la nature du liant.

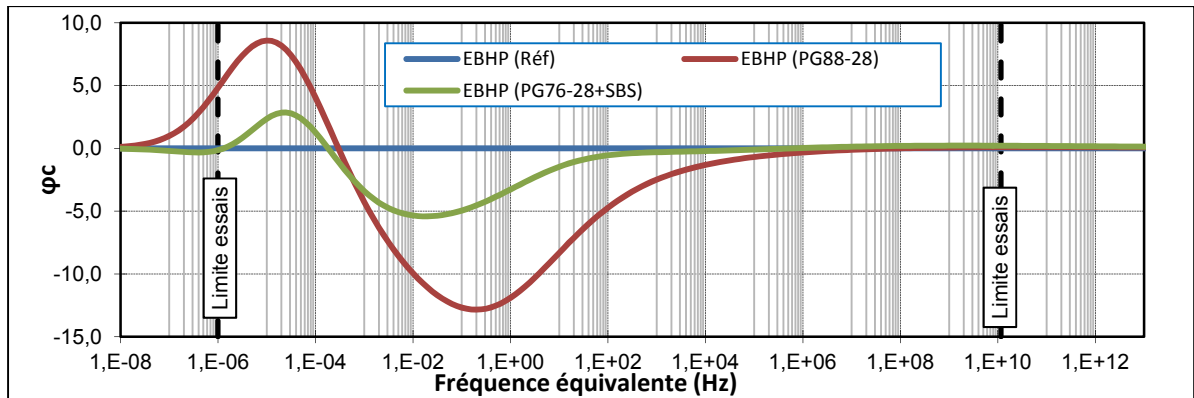


Figure 4.14 Évolution de l'angle de phase (φ_c) pour les enrobés servant à déterminer l'influence de la nature du liant ($T_{ref}=15^\circ C$)

Les résultats montrent que pour l'EBHP (PG88-28) et l'EBHP (PG76-28+SBS), l'angle de phase (φ) varie de façon non négligeable par rapport à l'enrobé de référence ($> 5^\circ$) ce qui pourrait traduire un changement au sein du comportement visqueux des enrobés testés. L'EBHP (PG88-28) est celui qui présente le comportement le plus visqueux pour les basses fréquences ($f_e < 1E-4$) suivi de l'EBHP (PG76-28+SBS). En ce qui concerne les fréquences intermédiaires ($1E-4 \text{ Hz} < f_e < 1E+4 \text{ Hz}$), c'est l'EBHP (PG88-28) qui présente le comportement le moins visqueux suivi encore une fois par l'EBHP (PG76-28+SBS). Finalement, les trois enrobés ne présentent pas de différences significatives au niveau du comportement visqueux pour les plus hautes fréquences.

Globalement, la nature du liant est le paramètre le plus important parmi ceux qui ont été étudiés dans ce programme de recherche quant au module complexe de l'enrobé. L'EBHP (PG88-28) est le plus prometteur en ce qui concerne l'atteinte d'une rigidité élevée. Son module, d'environ 14 948 MPa à $15^\circ C$ et 10Hz, le classe dans la catégorie des enrobés à module élevé (EME) selon les valeurs de spécification des normes AFNOR (France). L'autre enrobé modifié avec des granules de SBS, soit l'EBHP (PG76-28+SBS), n'a pas aussi bien performé que l'enrobé de référence au niveau de la rigidité pour les fréquences intermédiaires et plus hautes. Cependant, le but premier des granules de SBS est d'augmenter la résistance à la fatigue de l'enrobé par l'ajout d'élastomères thermoplastiques. L'utilisation

de granules de SBS reste donc une voie intéressante malgré les résultats plus faibles au niveau du module complexe lorsqu'on compare à l'EBHP (PG88-28).

4.3 Conclusion de la phase I

Suite à l'analyse des résultats des essais de maniabilité et de rigidité présentée dans ce chapitre, trois formulations d'enrobé se sont démarquées en termes de performances, soit : l'EBHP (Réf), l'EBHP (Chaux-H) et l'EBHP (PG88-28). Dans tous les cas, l'analyse des résultats de la phase I a mis clairement en évidence la pertinence d'utiliser du verre vis-à-vis la maniabilité et la rigidité d'une formulation d'EBHP. En ce qui concerne la maniabilité, les trois enrobés retenus ont clairement montré une bonne facilité de mise en place à l'essai de PCG. L'EBHP (Chaux-H) est également celui qui a obtenu les meilleures performances à ce niveau. En ce qui concerne la rigidité de ces enrobés, les résultats indiquent que l'EBHP (Réf) et l'EBHP (Chaux-H) sont à toutes fins pratiques identiques. L'EBHP (PG88-28) se démarque quant aux modules complexes (14948 MPa à 15°C-10Hz, comparativement à 10946 MPa pour l'enrobé de référence). Pour appuyer notre réflexion quant au choix de l'enrobé à caractériser pour la suite du projet, des essais exploratoires de fatigue ont été réalisés sur l'EBHP (PG88-28). Étonnamment, les résultats obtenus témoignent d'une performance mitigée en fatigue ($\epsilon_6 \approx 80 \mu\text{def}$). Il faut rappeler que la résistance en fatigue de l'enrobé est fortement tributaire de la nature et la teneur en bitume, cette dernière étant très faible. L'EBHP (PG88-28) ne semble pas à priori atteindre les performances en fatigue escomptées. De nouveaux essais visant à optimiser la composition du liant PG88-28 seraient nécessaires afin d'améliorer ses performances en fatigue. Finalement, c'est l'EBHP (Chaux-H) qui a été sélectionné pour être caractérisé dans la deuxième phase de ce projet de recherche. Bien que la chaux hydratée ne semble pas avoir affecté de façon significative les performances de maniabilité et de module complexe par rapport à l'EBHP (Réf), la chaux hydratée reste tout à fait intéressante quand on pense aux bénéfices de son utilisation mentionnés au chapitre 1, soit un renforcement potentiel de la résistance à la fissuration, à la fatigue et au désenrobage (granulats riches en silice comme le verre).

CHAPITRE 5

CARACTÉRISATION DE L'ENROBÉ SÉLECTIONNÉ : EBHP (CHAUX-H)

La deuxième phase de ce projet de recherche consiste à évaluer les performances globales d'un EBHP sélectionné pour ces bonnes performances lors de la première phase. Ainsi, c'est l'enrobé contenant de la chaux hydratée, soit l'EBHP (Chaux-H), qui a été sélectionné pour être caractérisé. Les essais de caractérisation réalisés en phase II sur la formulation d'EBHP (Chaux-H) sont :

- L'essai de retrait thermique empêché (TSRST)
- L'essai de fatigue
- L'essai de résistance à l'orniérage
- L'essai de module complexe

5.1 Confection et présentation des corps d'épreuve testés

Afin d'être en mesure d'exécuter tous les essais de la deuxième phase de ce projet, 3 plaques d'enrobé bitumineux de la formulation EBHP (Chaux-H) ont été confectionnées. La préparation, le malaxage et la compaction des plaques d'enrobé sont réalisés suivant la méthode d'essai LC 26-400 du MTQ en visant une compacité de 98% plutôt que 95%. Deux plaques (500 x 180 x 100 mm³) ont été utilisées pour mesurer la résistance à l'orniérage et la troisième plaque (600 x 400 x 125 mm³) a été carottée pour en retirer plusieurs éprouvettes cylindriques. Ces éprouvettes ont servi à réaliser les essais de module complexe, de fatigue et de retrait thermique empêché (TSRST). Les dimensions des éprouvettes carottées ont été mesurées minutieusement et leur teneur en vides a ensuite été calculée de façon volumétrique. Le Tableau 5.1 présente les caractéristiques géométriques des différentes carottes.

Tableau 5.1 Caractéristiques géométriques des éprouvettes carottées, formulation EBHP (Chaux-H)

# Éprouvettes	Hauteurs (mm)			Diamètres			Masse (g)	d _{mb}	d _{mm}	% vides
	H1	H2	H3	D1	D2	D3				
Fat-1	112,98	113,25	113,01	59,90	59,89	59,91	788,50	2,474	2,514	1,6%
E*/Fat-2	113,13	113,26	113,55	59,92	59,85	59,89	790,40	2,476	2,514	1,5%
E*/Fat -3	112,82	112,44	112,50	59,88	59,83	59,91	782,20	2,468	2,514	1,9%
E*/Fat -4	111,57	111,70	111,84	59,84	59,85	59,90	777,80	2,474	2,514	1,6%
E*/Fat -5	110,79	110,52	110,82	59,91	59,94	59,89	770,05	2,467	2,514	1,9%
Fat-6	114,11	114,40	114,12	59,91	59,84	59,85	796,30	2,477	2,514	1,5%
Fat-7	111,40	111,21	111,37	59,93	59,92	59,91	771,70	2,458	2,514	2,2%
TSRST-9	244,32	244,11	244,41	59,89	59,92	59,92	1684,70	2,447	2,514	2,7%
TSRST-10	238,48	238,30	238,34	59,87	59,95	59,90	1654,50	2,462	2,514	2,1%
TSRST-11	237,05	236,90	237,19	59,93	59,93	59,87	1647,40	2,465	2,514	1,9%
TSRST-12	241,03	240,87	240,82	59,86	59,88	59,92	1671,30	2,463	2,514	2,0%

5.2 Essais de retrait thermique empêché (TSRST)

5.2.1 Présentation des résultats d'essais TSRST

Les essais de retrait thermique empêché (TSRST) ont été réalisés suivant la norme AASHTO TP10-93. En tout, 4 éprouvettes ont été testées pour évaluer la performance à basse température de l'EBHP (Chaux-H) en ayant des résultats le plus représentatif possible. La Figure 5.1 présente graphiquement les résultats des 4 éprouvettes.

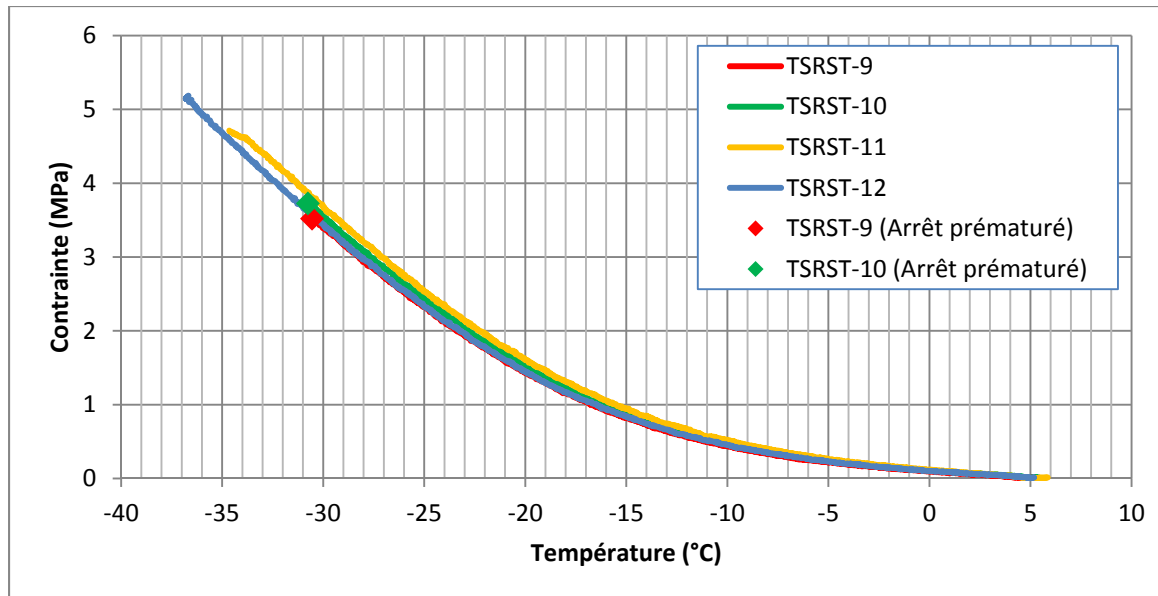


Figure 5.1 Évolution de la contrainte en fonction d'une baisse de température de 10°C/h de 4 éprouvettes de l'EBHP (Chaux-H)

À noter que les essais des éprouvettes TSRST-9 et TSRST-10 ont été arrêtés prématurément suite à un bris mécanique au niveau des vis servant à fixer les casques d'éprouvettes sur la presse hydraulique.

5.2.2 Données d'essais TSRST analysées

Les principaux paramètres issus de l'essai TSRST sont présentés au Tableau 5.2.

Tableau 5.2 Synthèse des paramètres analysés pour les essais de TSRST

Éléments analysés	TSRST-9	TSRST-10	TSRST-11	TSRST-12	Moyenne
Contrainte maximale (MPa)	3,5	3,7	4,7	5,2	5,0
Température associée à contrainte maximale (°C)	-30,6	-30,8	-34,7	-36,7	-35,7
Pente #1 (MPa/°C)	-0,019	-0,020	-0,023	-0,019	-0,021
Pente #2 (MPa/°C)	-0,220	-0,229	-0,235	-0,246	-0,241
Température de transition vitreuse (T_g) (°C)	-25,7	-25,7	-25,6	-27,4	-26,5
Température de transition bissectrice (°C)	-16,4	-16,4	-16,4	-17,9	-17,1
Vides (%)	2,7%	2,1%	1,9%	2,0%	2,0%
* Les données des éprouvettes en rouge ne sont pas représentatives puisque ces essais ont été arrêtés prématurément suite à un bris dans le filet des vis servant à fixer sur la presse un des casques d'éprouvette. Ces valeurs ne sont donc pas comptabilisées dans la moyenne.					

La pente #1 indique le taux d'évolution de la contrainte en fonction de la température de l'enrobé en début d'essai. La température de transition vitreuse (T_g) représente l'instant où l'enrobé adopte un comportement dit « fragile » suivant la période de relaxation de l'enrobé au cours de l'essai. La contrainte évolue de façon plutôt linéaire pour les températures inférieures au T_g . La pente #2 indique le taux d'évolution de la contrainte en fonction de la température de l'enrobé pour les températures inférieures au T_g . Finalement, la température de transition bissectrice se trouve à l'intersection des deux pentes. En analysant les résultats des essais au TSRST, la température de rupture est souvent comparée approximativement à la limite de température inférieure de la classe du bitume, soit -28°C dans le cas du bitume utilisé (PG 76-28P). La formulation d'EBHP (Chaux-H) dépasse les attentes de performance à basse température en présentant une température moyenne de rupture inférieure à -35°C. En définitive, cette formulation est prometteuse en ce qui concerne la susceptibilité à la fissuration aux basses températures.

5.3 Essais de fatigue

5.3.1 Présentation des essais réalisés

Les essais de fatigue ont tous été réalisés sur la presse MTS810, soit la même presse qui a été utilisée pour les essais de module complexe (E^*) et de retrait thermique empêché (TSRST) lors de ce projet. Ces essais de fatigue ont été réalisés en contrôle de déformation, c'est-à-dire que la presse déforme l'éprouvette de façon constante selon une amplitude ciblée. Une attention particulière a été portée sur la teneur en vides des éprouvettes testées en fatigue, de manière à constituer un échantillon relativement homogène ($V_i = 1,9 \pm 0,3\%$). En effet, il est bien reconnu qu'une bonne compacité de l'enrobé permet généralement d'avoir de meilleurs résultats en fatigue ainsi qu'une plus petite dispersion des résultats (Bazin et Saunier, 1967). Afin de réduire davantage la dispersion des résultats d'analyse de la fatigue, certains essais n'ont pas été retenus pour l'analyse puisque le bon déroulement desdits essais n'a pu être validé en considérant les critères suivants :

1. Température initiale de l'essai $10 \pm 0,7^\circ\text{C}$ (Lamothe, 2014).
2. Indices de qualité (IQ) pour chacun des signaux inférieurs à 15% durant l'essai (Lamothe, 2014), tel que défini à la §5.3.2.3.
3. L'écart de déformation d'un extensomètre par rapport à la moyenne des trois extensomètres doit rester inférieur à 25%. Autrement, l'essai n'est plus considéré comme étant déformé par un champ de contraintes homogènes (Baaj, 2002). Il arrive cependant qu'un écart d'extensomètre puisse dépasser 25% suite à un grand nombre de sollicitations, mais son évolution reste très lente. Le cas échéant, l'essai sera tout de même analysé puisque rien n'indique l'apparition subite d'instabilité qui pourrait être due à l'initiation de macrofissures.
4. Un minimum de 60 000 cycles de sollicitation avant rupture (Lamothe, 2014).
5. Doit pouvoir distinguer sommairement les 3 phases de fatigue en traçant l'évolution de la rigidité $|E^*|$ par rapport aux cycles de sollicitations.

Le Tableau 5.3 présente une synthèse des éprouvettes testées. Une validation du bon déroulement des essais y est aussi incluse et les essais considérés non valides sont identifiés en rouge.

Tableau 5.3 Synthèse des essais de fatigue réalisés sur l'EBHP (Chaux-H) en phase II

Identification des éprouvettes	% vides	Déformation : ϵ_{Aax} (μdef)		Validation des essais	
		Ciblée	Mesurée	Essai retenu	Commentaires
Fat-1	1,6%	170	170	Oui	-
E*/Fat-2	1,5%	170	170	Non	Rupture partielle en début d'essai (voir critère 5)
E*/Fat-3	1,9%	160	160	Oui	La phase III de fatigue n'est jamais atteinte (Prédiction possible avec DGCB, voir §5.3.4)
E*/Fat-4	1,6%	160	136	Non	Indices de qualité dépassant les 40%, essai invalide (voir critère 2)
E*/Fat-5	1,9%	160	158	Non	Écarts d'extensomètres supérieurs à 25% dès le début de l'essai et leur évolution est linéaire, mais très rapide (voir critère 3)
Fat-6	1,5%	160	158	Oui	Écart d'extensomètres dépassant 25% après plus de 150 000 cycles, mais leur évolution reste lente et linéaire (voir critère 3)
Fat-7	2,2%	180	177	Oui	-

5.3.2 Présentation des résultats types d'un essai de fatigue

5.3.2.1 Introduction

La méthodologie utilisée pour valider et exploiter des résultats de fatigue a été appliquée de façon minutieuse pour toutes les éprouvettes testées en fatigue. L'ensemble des résultats de tous les essais de fatigue se trouve à l'ANNEXE III. Étant donné la nature répétitive de l'exercice, les sections qui suivent concernent la présentation et l'exploitation des résultats de

l'éprouvette Fat-1. Les résultats qui y sont présentés s'intéressent plus précisément aux éléments relatifs à l'évolution, en fonction des cycles de sollicitation, de :

- La température et l'échauffement en surface de l'éprouvette
- L'indice de qualité des signaux (IQ)
- La déformation (amplitude, écarts de déformation et valeur centrée)
- La contrainte (amplitude et valeur centrée)
- L'angle de phase
- La norme du module complexe
- L'énergie dissipée

5.3.2.2 Évolution de la température et de l'échauffement en surface de l'éprouvette

La température est un élément important à considérer puisqu'elle influence directement la rigidité et la durée de vie en fatigue de l'enrobé. Tout au long de l'essai de fatigue, l'évolution de la température de l'éprouvette est mesurée à l'aide d'une sonde de température collée au centre de la paroi de l'éprouvette et recouverte par un mastic de fixation (gommette bleu). De plus, l'enceinte thermique où l'éprouvette est installée, tente constamment de stabiliser la température de l'air. C'est ce qu'on appelle la consigne de conditionnement de l'enceinte thermique qui doit donc être proche de 10°C pour les essais de fatigue de ce projet. En traçant l'évolution de la température en fonction des cycles de sollicitation, il est possible de :

- Valider si l'exigence de température au début de l'essai de $10 \pm 0,7^\circ\text{C}$ est respectée
- Valider si la consigne de conditionnement de l'enceinte thermique est appropriée
- Tracer ensuite l'évolution de l'échauffement de l'éprouvette

La Figure 5.2 présente l'évolution de la température en surface de l'éprouvette Fat-1 en fonction du nombre de cycles de sollicitation. La température de l'air dans l'enceinte thermique est également tracée.

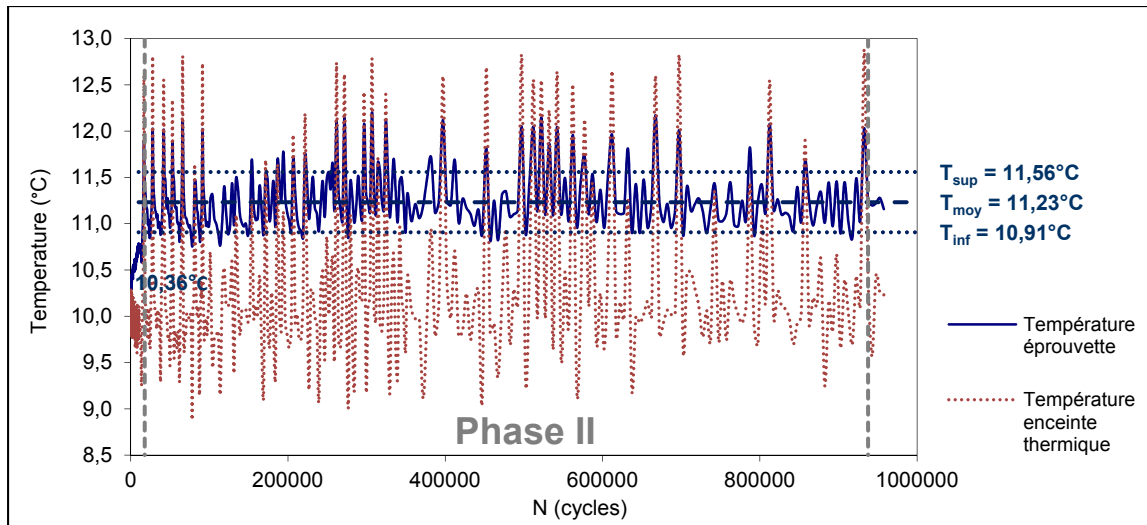


Figure 5.2 Évolution de la température pour l'essai de fatigue de l'éprouvette Fat-1

Dans le cas de l'éprouvette Fat-1, l'acquisition des données commence au 7^{ième} cycle avec une température de 10,36°C, ce qui respecte l'exigence de $10 \pm 0,7^\circ\text{C}$. Cette température initiale augmente ensuite très rapidement jusqu'au cycle 10020, où l'augmentation de la température moyenne semble se stabiliser (fin de la phase I de fatigue). En calculant la moyenne des températures du cycle 10020 jusqu'à la fin de l'essai, on obtient une moyenne de 11,23°C, ce qui n'est vraiment pas négligeable comme augmentation de température par rapport au 10°C visé. Cet écart peut s'expliquer en partie par l'échauffement élevé de l'éprouvette en début d'essai, dû à l'importance des déformations imposées (170 μdef). Une correction prenant en compte cet écart de température peut être éventuellement appliquée lors du calcul de la durée de vie (§5.3.3.1). Par ailleurs, un écart-type élevée de la température en surface a aussi pu être identifié ($\pm 0,33^\circ\text{C}$). On remarque cependant que la température moyenne au niveau de l'enceinte thermique (10,28°C) est très proche de 10°C, mais elle est relativement instable tout au long de l'essai avec un écart-type très élevé ($\pm 0,84^\circ\text{C}$). L'importance de ces écart-types indique une lacune au niveau du contrôle de la température de l'air dans l'enceinte thermique. Des ajustements au niveau de l'équipement seraient nécessaires pour les futurs essais de fatigue, mais aucune modification n'a été effectuée dans le cadre de ce projet.

La Figure 5.3 illustre l'évolution en cours d'essai de l'échauffement en surface de l'éprouvette Fat-1. On remarque un comportement très similaire à celui de l'évolution de la température. L'échauffement est calculé par rapport à la température initiale, soit 10,36°C pour l'éprouvette Fat-1.

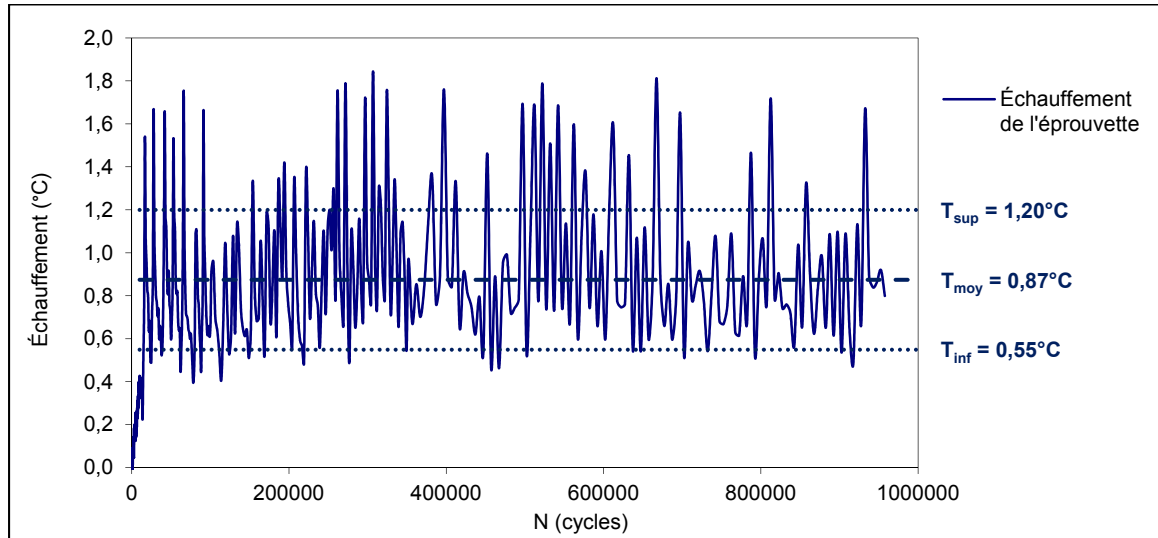


Figure 5.3 Évolution de l'échauffement pour l'essai de fatigue de l'éprouvette Fat-1 (Température initiale de 10,36°C)

Étant donné le lien étroit entre l'évolution de la température et l'évolution de l'échauffement, on remarque à nouveau l'augmentation marquée jusqu'au cycle 10020, suivie d'une stabilisation de l'échauffement moyen (0,87°C) avec des écarts-types importants ($\pm 0,33^\circ\text{C}$).

5.3.2.3 Évolution de l'indice de qualité des signaux

L'indice de qualité des signaux (IQ) indique la qualité des sollicitations mécaniques imposées à l'éprouvette testée. Un indice de qualité doit être déterminé pour chacun des extensomètres servant à mesurer la déformation appliquée ($\text{IQ}_{\epsilon_{\text{ext}\#}}$), pour l'amplitude de déformation axiale ciblée ($\text{IQ}_{\epsilon_{\text{Aax}}}$) et pour la contrainte (IQ_{σ}). L'IQ représente l'écart entre l'évolution de la consigne (ici défini suivant une fonction sinusoïdale ciblée) et l'évolution des mesures (ce que l'on obtient). Il s'agit essentiellement de calculer l'écart relatif entre les

points expérimentaux et la fonction sinusoïdale approximée par la méthode des moindres carrés. Un indice de qualité de 0% signifie qu'il n'y a aucun écart. L'IQ est calculé en considérant 200 points d'acquisition, soit sur deux (2) cycles, et est décrite par l'équation suivante (Lamothe, 2014) :

$$IQ(\%) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_m - X_c|}{X_A} \right) \times 100\% \quad (5.1)$$

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

La Figure 5.4 présente l'évolution des IQ en fonction des cycles de sollicitation pour l'éprouvette Fat-1.

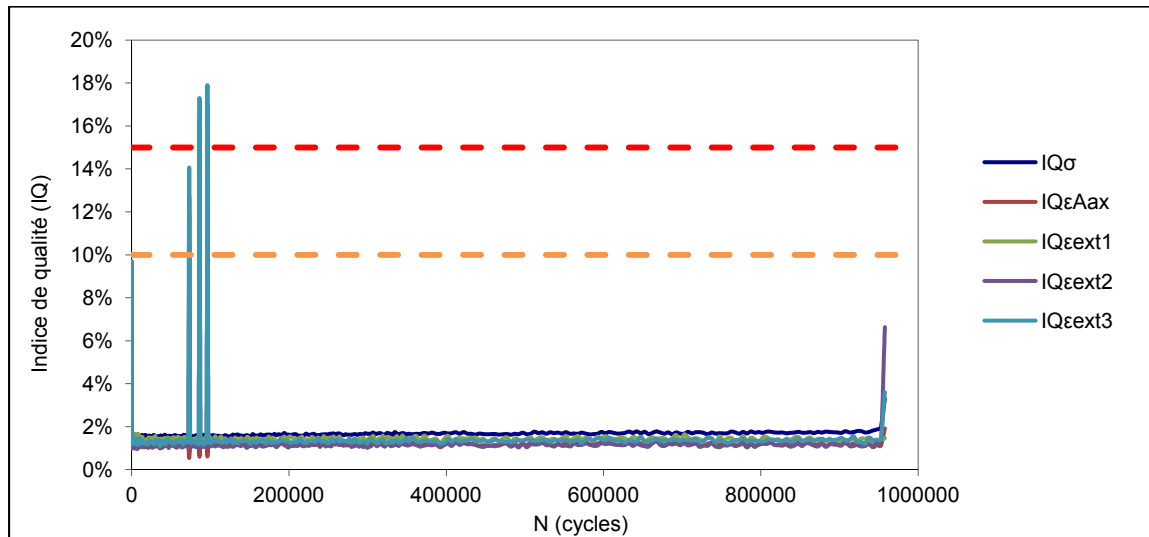


Figure 5.4 Évolution de l'indice de qualité des signaux de l'éprouvette Fat-1

L'essai de fatigue est considéré comme étant bon ou acceptable lorsque l'IQ est inférieur à 10% (ligne pointillée en **orange**) et 15% (ligne pointillée en **rouge**) respectivement

(Lamothe, 2014). Un indice de qualité élevée implique que la presse s'ajuste continuellement, ce qui découle d'un état d'instabilité. Un ajustement des paramètres d'asservissement de la presse (paramètres PIDF) pourrait être requis dans le cas où l'échantillon n'a pas subi de rupture. Dans l'ensemble, l'éprouvette Fat-1 a été sollicitée de façon stable, excepté au moment de la rupture et un peu après le début de l'essai à environ 73000 cycles. Cet état d'instabilité après le début de l'essai est difficilement explicable, mais elle s'est rapidement réajustée ayant donc peu d'impact sur la suite de l'essai.

5.3.2.4 Évolution de la déformation

L'amplitude de la déformation axiale imposée (ϵ_{Aax}) est déterminée par la moyenne des déformations axiales mesurées à l'aide des 3 extensomètres. Son évolution tout au long de l'essai de fatigue de l'éprouvette Fat-1 est présentée à la Figure 5.5.

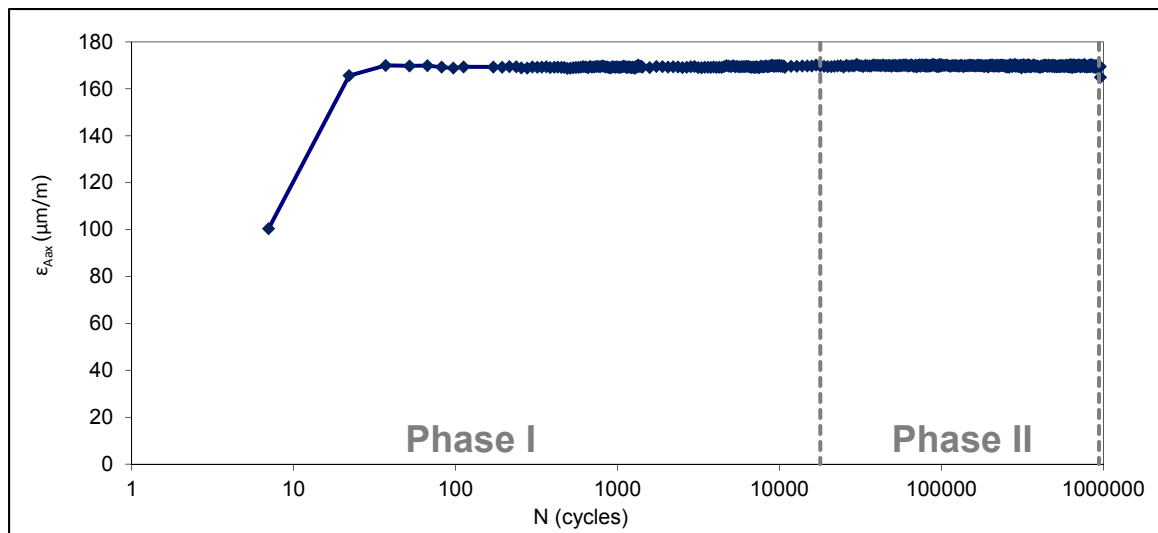


Figure 5.5 Évolution de l'amplitude de déformation axiale moyenne de l'éprouvette Fat-1

L'amplitude de déformation cible imposée pour cet essai était de 170 μdef . Elle a été atteinte après environ 22 cycles de sollicitation. Pour tous les cycles suivants, l'amplitude de déformation est restée relativement constante jusqu'à la rupture, tel qu'on pourrait s'attendre d'un essai de fatigue exécuté en mode contrôle de déformation.

Il faut aussi considérer les écarts de déformation des trois extensomètres ($\epsilon_{\text{ext}\#}$) par rapport à la moyenne (ϵ_{Aax}). Ces données servent en quelque sorte à mesurer l'état d'homogénéité des contraintes au sein de l'éprouvette testée. Il est donc recommandé que l'écart pour chacun des extensomètres ($\Delta\epsilon_{\text{ext}\#}$) soit inférieur à 25%, autrement l'éprouvette n'est plus considérée comme étant déformée par un champ de contraintes homogène (Baaj, 2002). La Figure 5.6 présente l'évolution des écarts de déformations mesurées tout au long de l'essai de fatigue pour l'éprouvette Fat-1.

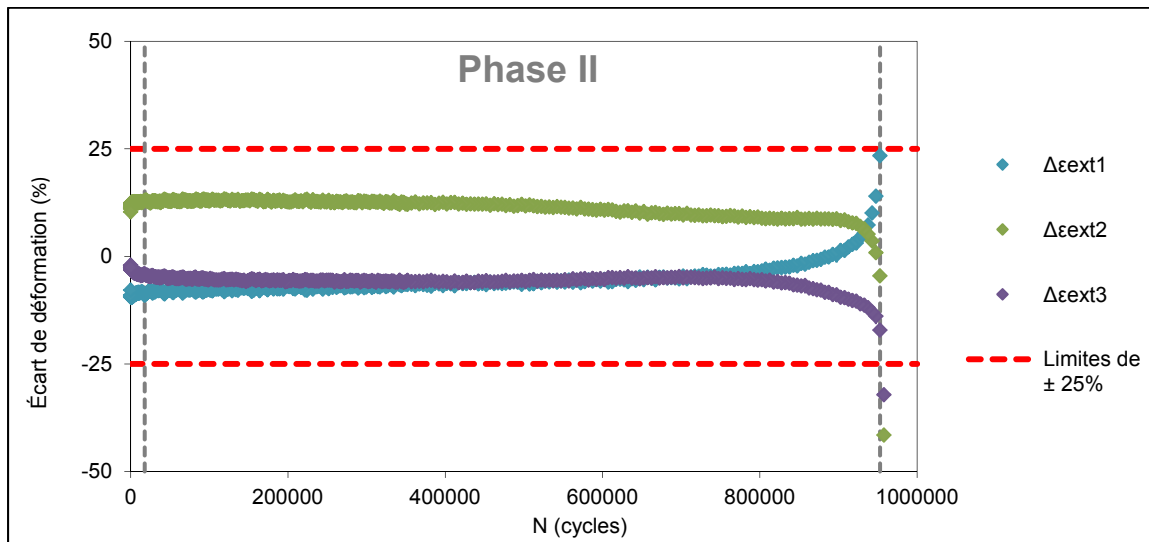


Figure 5.6 Évolution des écarts de déformation mesurés pour l'éprouvette Fat-1

Les écarts de déformation des trois extensomètres sont tous inférieurs à $\pm 25\%$ ce qui permet de considérer que le champ de contraintes est homogène tout au long de l'essai. La rupture en fin de phase II vient marquer un changement brusque dans l'évolution des écarts pour chacun des extensomètres ($\Delta\epsilon_{\text{ext}\#}$). Ce changement brusque indique donc une variation importante du champ de contraintes au sein de l'éprouvette ce qui est un bon indice de l'apparition d'une macrofissure et de l'éventuelle rupture de l'éprouvette associée à la phase III. La durée de vie de l'éprouvette peut être établie à partir du nombre de cycles où un des écarts d'extensomètres dépasse 25% ($\Delta\epsilon_{\text{ext}}$), soit 952793 cycles dans le cas de l'éprouvette Fat-1 ($N_{f\Delta\epsilon_{\text{ext}}} = 952793$ cycles).

La déformation sinusoïdale imposée en cours d'essai est déterminée de manière relative en considérant la valeur centrée ($\epsilon_{0ax\#}$), propre à chacun des extensomètres. Or, cette valeur centrée évolue au cours de l'essai pour chacun des extensomètres. Cette évolution représente en quelque sorte la déformation permanente mesurée par chacun des extensomètres en cours d'essai. La Figure 5.7 représente cette évolution pour l'éprouvette Fat-1.

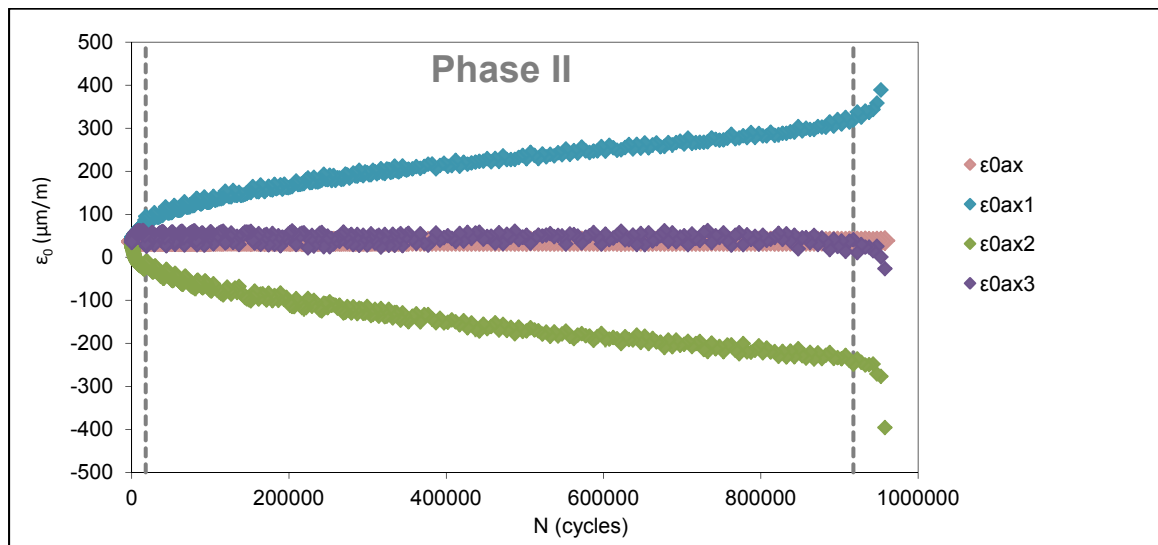


Figure 5.7 Évolution du centre de déformation mesuré de l'éprouvette Fat-1

Le pilotage de la presse se fait à l'aide du signal moyen des trois extensomètres. Il peut donc être observé que la valeur centrée moyenne de déformation (ϵ_{0ax}) ne fluctue pas et est très près d'une valeur nulle tout au long de l'essai. Cependant, les valeurs centrées de déformation des trois extensomètres (ϵ_{0ax1} , ϵ_{0ax2} et ϵ_{0ax3}) évoluent généralement assez rapidement durant l'essai. En ce qui concerne l'éprouvette Fat-1, on observe un allongement du côté de l'extensomètre #1 (ϵ_{0ax1} jusqu'à 319 μdef), une contraction du côté de l'extensomètre #2 (ϵ_{0ax2} jusqu'à -249 μdef) ainsi qu'un allongement minime du côté de l'extensomètre #3 (ϵ_{0ax3} jusqu'à 41 μdef). Ces valeurs observées d'extension et de contraction sont considérées comme étant relativement faibles (Baaj, 2002). La Figure 5.7 permet également de cerner la fin de la phase II où il y a un changement brusque dans l'évolution des valeurs centrées de déformation ($\epsilon_{0ax\#}$), soit à environ 917607 cycles.

Cependant, cette valeur n'est pas en soit considérée dans l'établissement de la durée de vie en fatigue de l'éprouvette.

5.3.2.5 Évolution de la contrainte

La contrainte appliquée en cours d'essai évolue suivant une amplitude sinusoïdale. La Figure 5.8 illustre l'évolution de l'amplitude de contrainte (σ_A) d'un essai de fatigue sur l'éprouvette Fat-1.

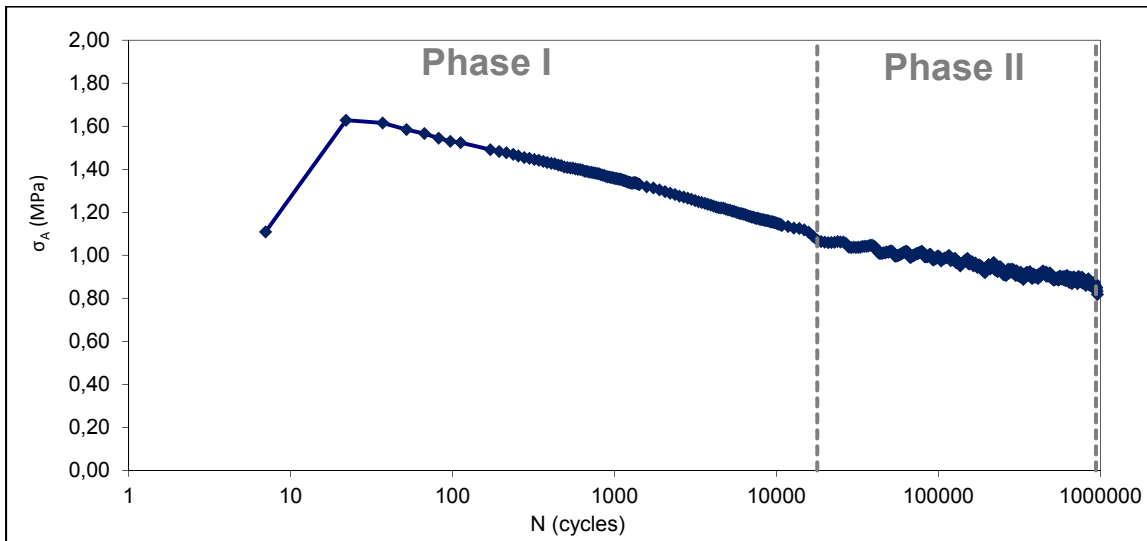


Figure 5.8 Évolution de l'amplitude de contrainte de l'éprouvette Fat-1

Puisque l'essai a été réalisé en mode de contrôle de déformation, l'amplitude de la contrainte devant être appliquée pour respecter la consigne de déformation n'évolue pas de façon constante. En effet, puisqu'il y a un endommagement en plus des effets biaisants qui engendrent conséquemment une perte de rigidité, l'éprouvette devient de plus en plus facile à déformer au fur et à mesure qu'elle est sollicitée (phénomène de fatigue). On remarque tout d'abord une progression très rapide de l'amplitude de contrainte (σ_A) pour les 22 premiers cycles. La déformation appliquée (ϵ_{Aax}) doit tout d'abord se stabiliser et atteindre ainsi l'amplitude de déformation ciblée. Suivant les 22 premiers cycles, l'amplitude de déformation ciblée est atteinte et l'amplitude de contrainte (σ_A) chute progressivement de

façon à maintenir l'amplitude de déformation appliquée (ϵ_{Aax}) constante jusqu'à la fin de l'essai.

Tout comme pour l'évolution du centre de déformation des extensomètres, il est également intéressant d'observer l'évolution de la valeur centrée de la contrainte (σ_0) en cours de sollicitation. La Figure 5.9 illustre cette évolution.

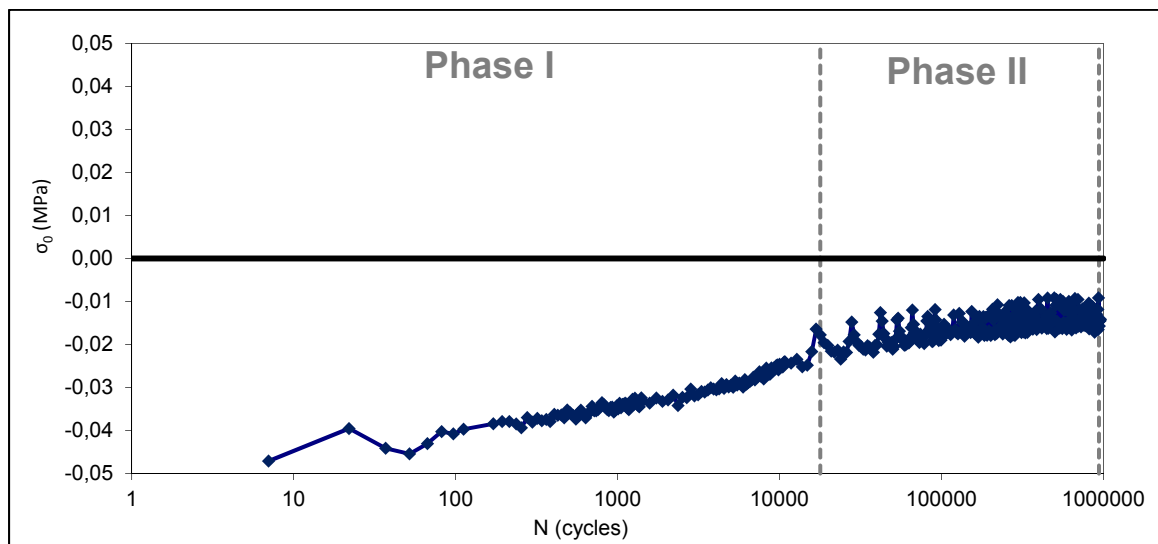


Figure 5.9 Évolution de la valeur centrée de la contrainte pour l'éprouvette Fat-1

Tout au long de l'essai, la valeur centrée de la contrainte est négative (σ_0), ce qui signifie que pour atteindre la valeur de déformation ciblée, il faut appliquer une contrainte légèrement plus importante en compression qu'en traction. Ceci est dû notamment à la rigidité de l'enrobé bitumineux qui est légèrement plus élevée en compression (Lamothe, 2014). La valeur centrée de la contrainte en compression semble devenir de moins en moins importante au fur et à mesure que l'éprouvette s'échauffe (majoritairement en phase I). La progression est donc beaucoup moins importante en phase II et III, tout comme pour l'échauffement.

5.3.2.6 Évolution de l'angle de phase

L'angle de phase du module complexe (φ_E) est le déphasage entre le signal de contrainte (φ_σ) et la déformation axiale moyenne ($\varphi_{\varepsilon_{ax}}$). La Figure 5.10 illustre l'évolution de l'angle de phase (φ_E) en cours d'essai. Au cours de la phase I, il y a une augmentation très rapide de l'angle de phase jusqu'à ce qu'il y ait stabilisation de l'échauffement. Cette augmentation importante de l'angle de phase (Phase I) est principalement due à l'échauffement et à la thixotropie du bitume. En phase II, l'angle de déphasage (φ_E) augmente progressivement de façon presque linéaire, jusqu'au début de la phase de rupture (phase III). Le début de cette dernière est marqué par une augmentation ou une diminution subite de l'angle de phase (φ_E), traduisant ainsi l'importance de l'endommagement dans l'éprouvette (Baaj, 2002). En ce qui concerne l'éprouvette Fat-1, ce changement rapide marquant le début de la phase III se produit à environ 937630 cycles de sollicitation. Une durée de vie (critère de rupture) est associée à ce nombre de cycles, laquelle est ici désignée $N_{f\varphi_{max}}$.

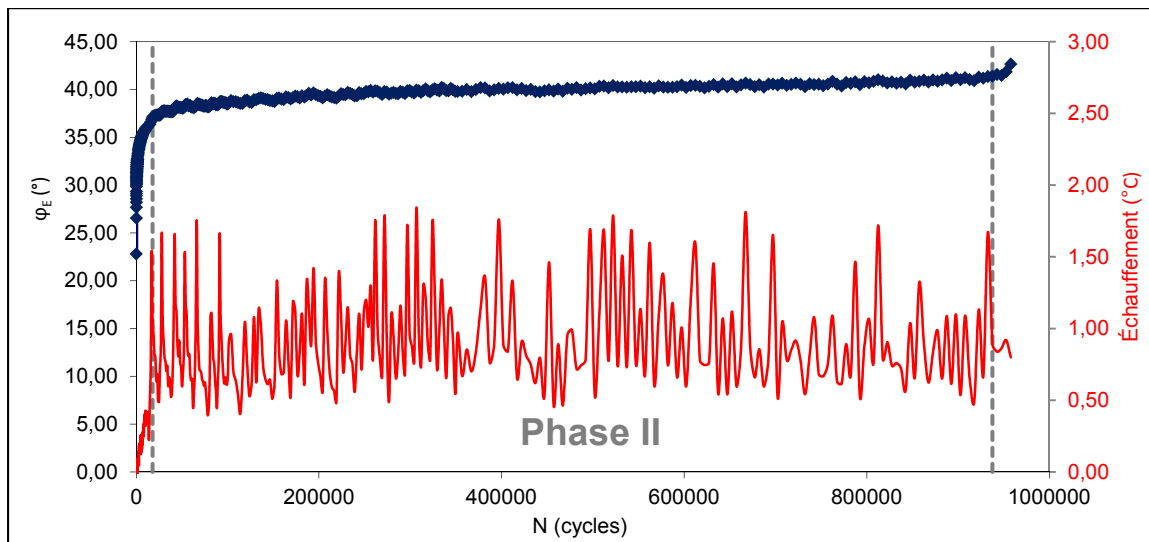


Figure 5.10 Évolution de l'angle de phase de l'éprouvette Fat-1

5.3.2.7 Évolution de la norme du module complexe

Connaissant l'évolution de l'amplitude de déformation et celle de l'amplitude de contrainte en cours d'essai, l'évolution de la norme du module complexe ($|E^*|$) à la température et la fréquence d'essai (10°C et 10Hz) peut être calculée. La Figure 5.11 représente l'évolution de la norme du module complexe de l'éprouvette Fat-1.

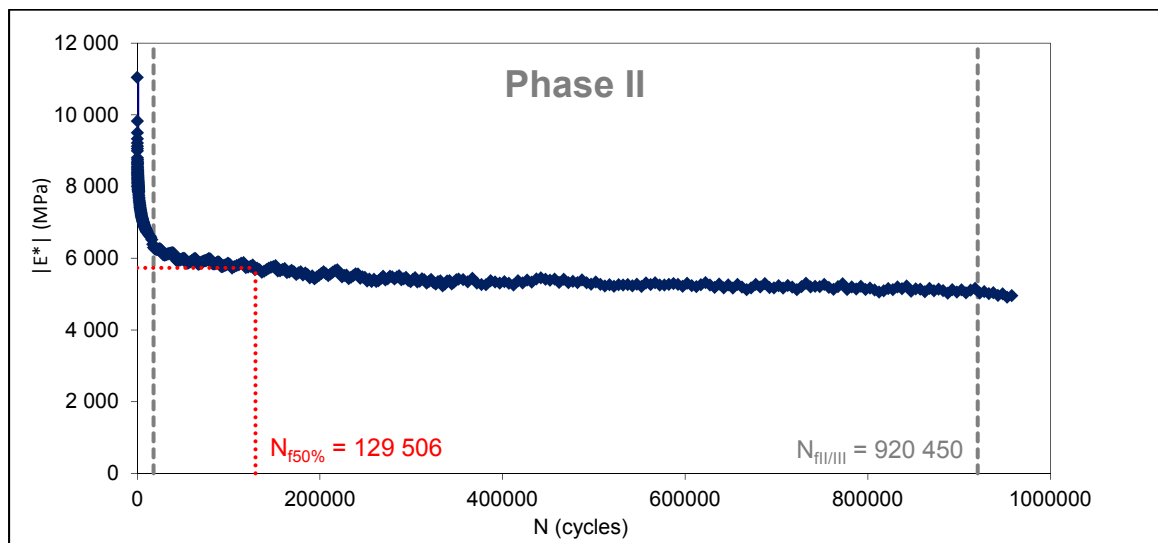


Figure 5.11 Évolution de la norme du module complexe de l'éprouvette Fat-1

La chute de rigidité durant les 22 premiers cycles est très drastique. Ceci peut être attribué en partie à la non-linéarité de l'enrobé bitumineux. En effet, l'amplitude de déformation au 7^{ième} cycle est de 100 μdef pour une rigidité de 11050 MPa, tandis qu'au 22^{ième} cycle elle est de 166 μdef pour une rigidité de 9829 MPa. Suivant ces premiers cycles de stabilisation de l'amplitude de déformation, une chute rapide de la norme du module se poursuit jusqu'à la fin de la phase I. Cette chute est grandement influencée par des effets biaisants comme l'échauffement et la thixotropie du bitume. En phase II, la norme du module complexe $|E^*|$ augmente progressivement de façon presque linéaire, jusqu'à la phase de rupture (phase III). Dans la littérature, la durée de vie peut souvent être établie avec le critère de rupture classique qui est égal au nombre de cycles correspondant à une chute de 50% du $|E^*|$ ($N_{150\%}$). Dans le cas de l'éprouvette Fat-1, la durée de vie selon le critère classique a été établie à

129506 cycles, mais l'allure de la courbe ne semble pas indiquer un comportement de rupture (changement de pente). Le critère classique est un critère arbitraire et n'est pas adapté à tous les matériaux. Il arrive en effet dans certain cas qu'il soit atteint durant la phase II, soit bien avant la rupture (Baaj, 2002). La durée de vie peut aussi être établie en considérant le comportement global de l'éprouvette sous sollicitation. Il s'agit d'identifier, sur la courbe de l'évolution de $|E^*|$, le nombre de cycles correspondant au point d'inflexion ($N_{fII/III}$) caractérisant le changement de la phase II vers la phase III de fatigue. En ce qui concerne l'éprouvette Fat-1, le point d'inflexion n'est pas très prononcé et il est localisé à environ 920450 cycles, soit le point de transition des phases II/III.

5.3.2.8 Évolution de l'énergie dissipée

Étant donné la nature viscoélastique des enrobés bitumineux, ceux-ci présentent un caractère dissipatif. En effet, l'énergie qui est dissipée par viscosité durant un essai de fatigue en continu, peut conduire à de l'échauffement au sein de l'éprouvette. La densité d'énergie locale (W_i) produite par dissipation visqueuse au cours d'un cycle " i " de sollicitation est donnée par l'équation suivante (Di Benedetto et al., 2005) :

$$W_i = \pi \varepsilon_{Aaxi} \sigma_{Ai} \sin \varphi_{Ei} \quad (5.2)$$

Où

ε_{Aaxi} = Amplitude de la déformation au cycle " i "

σ_{Ai} = Amplitude de la contrainte au cycle " i "

φ_{Ei} = Déphasage entre la contrainte et la déformation au cycle " i "

L'énergie totale cumulée et dissipée au $N^{i\text{ème}}$ cycle de sollicitation (W_N) en cours d'essai de fatigue peut aussi être calculée avec l'équation suivante (Di Benedetto et al., 2005) :

$$W_N = \sum_{i=1}^n W_i \quad (5.3)$$

La Figure 5.12 illustre l'évolution de l'énergie locale dissipée (W_i) en fonction du nombre de cycles de sollicitation sur l'éprouvette Fat-1.

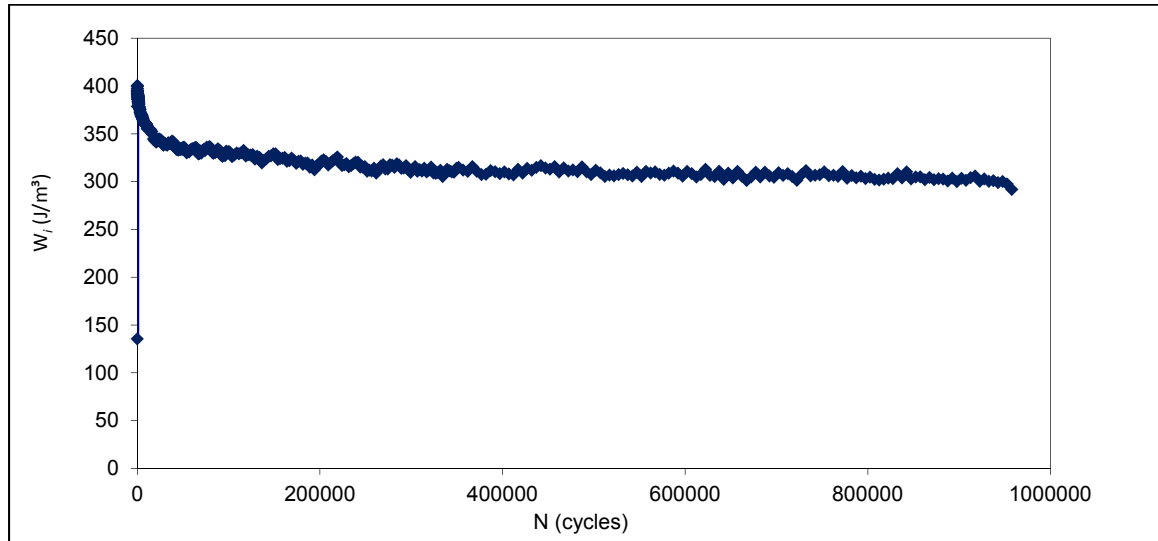


Figure 5.12 Évolution de l'énergie dissipée par cycle pour l'éprouvette Fat-1

Puisqu'il s'agit d'un essai piloté en contrôle de déformation imposée, l'amplitude de déformation reste constante et l'amplitude de contrainte diminue durant l'essai (phénomène de fatigue). L'évolution de l'énergie locale dissipée (W_i) est donc décroissante malgré l'augmentation de l'angle de phase. Bien que certaines méthodes aient été proposées pour évaluer la durée de vie de l'enrobé en considérant l'évolution de l'énergie locale dissipée (W_i), cette dernière n'est pas directement reliée à l'énergie nécessaire à la rupture des liaisons au sein du matériau. Il y a en effet une bonne portion de l'énergie locale (W_i) qui est simplement dissipée en chaleur. Il serait donc plus pertinent d'établir la durée de vie en suivant l'évolution de la norme du module complexe $|E^*|$ pour décrire le processus d'endommagement de fatigue (Di Benedetto et al., 2005). L'énergie locale dissipée (W_i) reste tout de même utile pour expliquer une partie des effets biaisant (augmentation de la température) lorsqu'utilisée pour évaluer la durée de vie d'un enrobé avec la méthode DGCB (§5.3.4).

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

La durée de vie des éprouvettes testées en fatigue est déterminée en fonction d'un critère de rupture (N_f), ce dernier servant à identifier le nombre de cycles menant à l'initiation d'une rupture au sein de l'éprouvette. Deux critères de rupture couramment utilisés ont été présentés à la §3.4.4.1, soit le critère classique ($N_{f50\%}$) et le critère de transition phase II/III ($N_{fII/III}$). En ce qui concerne l'établissement d'une durée de vie pour la formulation d'EBHP (Chaux-H) à l'aide du critère classique ($N_{f50\%}$), la Figure 5.11 vue précédemment semble indiquer que ce critère n'est pas bien adapté pour identifier l'initiation de la rupture au sein de l'éprouvette testée. Conséquemment, la durée de vie des éprouvettes a seulement été déterminée en considérant le critère de transition de phase II/III ($N_{fII/III}$).

La transition de phase II/III correspond à la naissance des macrofissures dans l'enrobé (Baaj, 2002). Cet instant peut être identifié par un changement marqué du comportement sous sollicitations de l'éprouvette testée. Le critère servant à l'identifier découle habituellement d'une moyenne de deux sous-critères de rupture, soit : le critère d'écart des extensomètres ($N_{f\Delta ext}$) et le critère d'angle de phase maximum ($N_{f\phi max}$). Cependant, il n'y a que le critère $N_{f\phi max}$ qui a été considéré pour déterminer $N_{fII/III}$ puisque dans certains cas, les valeurs du $N_{f\Delta ext}$ ne semblent vraiment pas indiquer un point de rupture. Le critère $N_{f\Delta ext}$ (où $\Delta ext > 25\%$) reste un critère arbitraire d'homogénéité et n'est peut-être pas toujours bien approprié comme critère de rupture. Il arrive donc parfois que l'écart d'un extensomètre continue de progresser lentement en dépassant 25% et un changement de pente brusque ne se produit que beaucoup plus tard dans l'essai. L'évolution des écarts d'extensomètres de l'éprouvette Fat-6 témoigne de ce type de comportement (Figure 5.13). Cette observation pourrait être dû au fait que les écarts d'extensomètres sont très élevés dès le départ ($> 20\%$), ce qui témoigne d'un manque d'homogénéité initiale du champ de déformations sur les surfaces mesurées par les extensomètres.

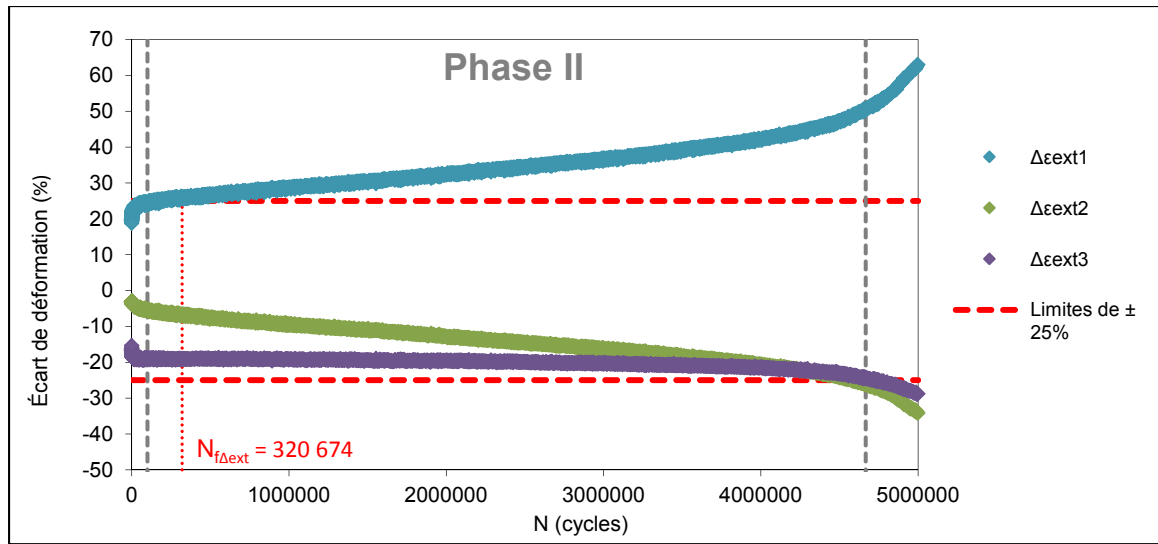


Figure 5.13 Évolution des écarts de déformations mesurées de l'éprouvette Fat-6

Une autre méthode a toutefois aussi été utilisée en parallèle afin d'identifier le point de transition de phase II/III ($N_{fl/III}$). Dans un premier temps, il s'agit d'observer l'évolution des écarts d'amplitude de déformation des trois extensomètres et d'identifier géométriquement les points d'inflexion de la transition de phase II/III. La moyenne du nombre de sollicitations correspondant aux points d'inflexion identifiés ainsi donne un premier critère de rupture appelé $N_{f-inf\Delta ext}$. La Figure 5.14 illustre la méthode utilisée pour identifier les points d'inflexions à l'aide de deux droites dont la fonction est corrélée linéairement avec les données mesurées.

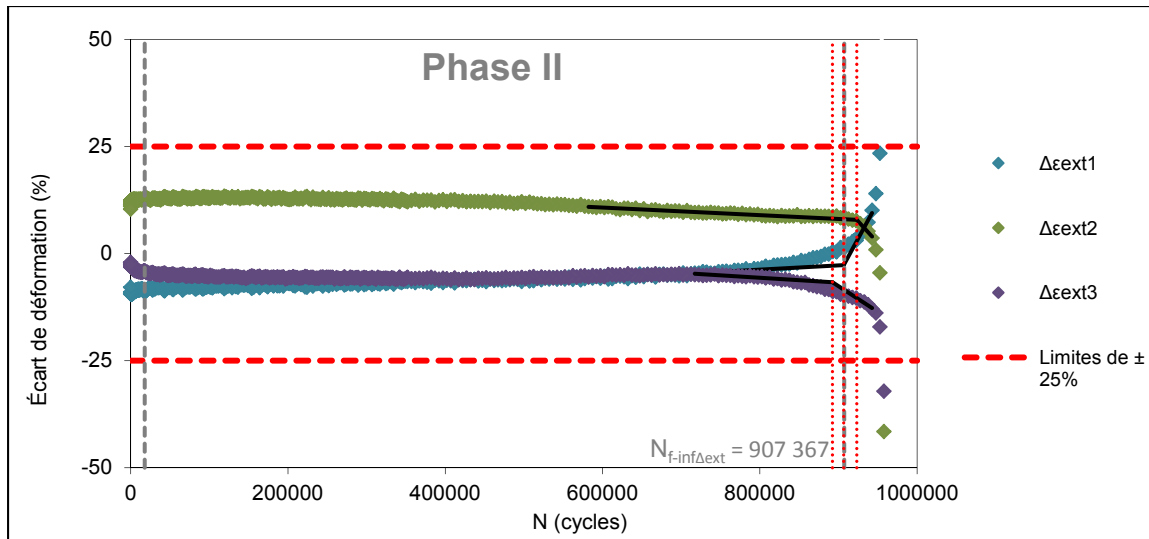


Figure 5.14 Points d'inflexion des écarts d'extensomètres de l'éprouvette Fat-1

Dans un deuxième temps, la même procédure d'identification d'un point d'inflexion est appliquée, mais cette fois ce sont plutôt les données correspondant à l'évolution de la norme du module complexe ($|E^*|$) qui sont observées. Le deuxième critère de rupture ainsi obtenu est appelé $N_{F-inf|E^*|}$. La Figure 5.15 illustre la méthode utilisée pour identifier les points d'inflexions à l'aide de deux droites dont la fonction est encore une fois corrélée linéairement avec les données mesurées.

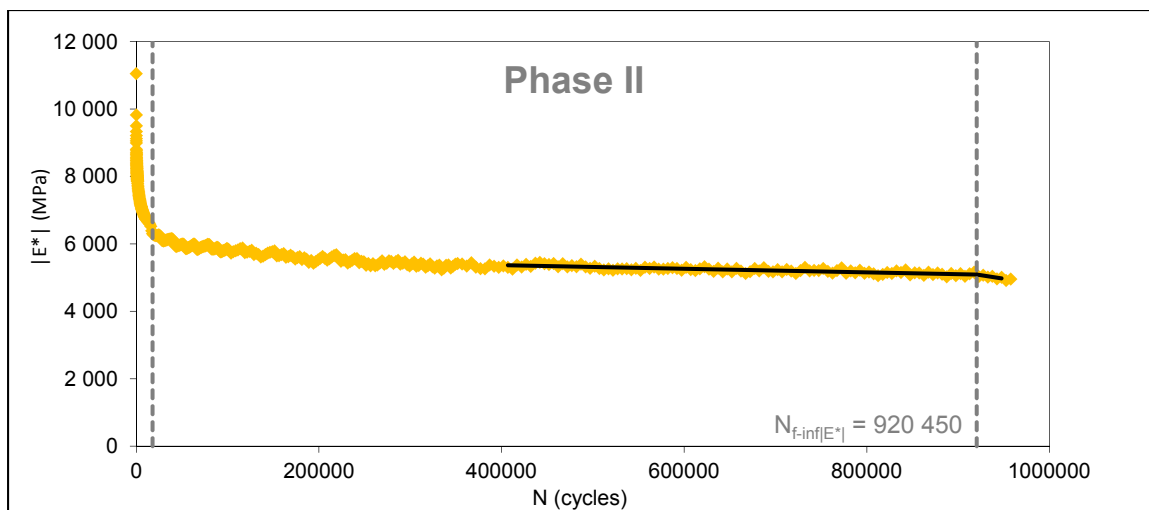


Figure 5.15 Points d'inflexion de la norme du module complexe de l'éprouvette Fat-1

Finalement, le critère de transition de phase II/III ($N_{II/III}$) déterminé selon la méthode des points d'inflexion correspond à la moyenne des critères $N_{f-inf\Delta_{ext}}$ et $N_{f-inf|E^*|}$. Le Tableau 5.4 est une synthèse de tous les critères de rupture (N_f) obtenus pour les éprouvettes testées en fatigue et considérées valides.

Tableau 5.4 Synthèse de l'évaluation des différents critères de rupture

# Éprouvette	Vides (%)	Condition d'essai		Critères de rupture *					
		Déformation ϵ_{Aax} (μdef)	Température (°C)	Détermination du $N_{II/III}$ ** ($N_{f\phi_{max}}$)			Détermination du $N_{II/III}$ (méthode point d'inflexion)		
				$N_{f\Delta_{ext}}$	$N_{f\phi_{max}}$	$N_{II/III}$	$N_{f-inf\Delta_{ext}}$	$N_{f-inf E^* }$	$N_{II/III}$
Fat-1	1,6%	170	11,23	952793	937630	937630	907367	920450	913909
E*/Fat-3	1,9%	160	11,05	2863671	4576283	4576283	4576283	4576283	4576283
Fat-6	1,5%	158	11,02	199567	4762070	4762070	4666712	4689662	4678187
Fat-7	2,2%	177	11,02	1623477	1623408	1623408	1635021	1618952	1626986
* Les valeurs de N_f (en rouge) ont été estimées par la méthode DGCB ($D_{IIC} = 27\%$) puisque l'essai a été interrompu prématurément à 4761695 cycles. La méthode d'analyse DGCB est décrite à la §5.3.4. ** Le critère de rupture $N_{f\Delta_{ext}}$ doit normalement être comptabilisé en faisant une moyenne avec le critère $N_{fmax\phi}$ pour déterminer $N_{II/III}$. Seul le critère $N_{fmax\phi}$ est considéré ici puisque certaines valeurs du $N_{f\Delta_{ext}}$ (en vert) semblent avoir été atteintes en début de phase II, l'éprouvette n'étant donc plus sollicitée de façon homogène pour la durée restante de l'essai.									

5.3.3.1 Correction des durées de vie en fonction de la température

Il est reconnu que la température a une influence importante sur le comportement mécanique de l'enrobé bitumineux. Ce dernier étant composé d'un liant thermo-susceptible, une température élevée fait en sorte que l'enrobé présente un faible module de rigidité, et donc une déformabilité plus élevée. À l'inverse, une température basse rend l'enrobé plus difficile à déformer. En ce qui concerne l'effet de la température sur la durée de vie en fatigue de l'enrobé, il est souvent considéré en première approximation que la température agit simplement en translatant la valeur du critère de rupture (N_f) qui compose la droite de Wöhler (domaine $\log N$ vs $\log \epsilon_{Aax}$). En se référant à l'évolution de la norme du module complexe (modèle 2S2P1D), un facteur de translation peut être intégré à la durée de vie en

fatigue pour la corriger en fonction de la température ciblée lors de l'essai (Perraton, Di Benedetto et Carter, 2011). En adaptant les équations retrouvées dans Perraton, Di Benedetto et Carter (2011), on obtient l'équation suivante :

$$N_{f,\theta_i} = N_{f,\theta_{ref}} \left[\frac{|E_{\theta_i}^*|}{|E_{\theta_{ref}}^*|} \right]^{-k_3} \quad (5.4)$$

Où

N_{f,θ_i} = Durée de vie en fatigue pour la température ciblée (θ_i)

$N_{f,\theta_{ref}}$ = Durée de vie en fatigue pour la température mesurée de l'essai de fatigue (θ_{ref})

$|E_{\theta_i}^*|$ = Norme du module complexe du modèle 2S2P1D pour la température ciblée (θ_i)

$|E_{\theta_{ref}}^*|$ = Norme du module complexe du modèle 2S2P1D pour la température mesurée de l'essai de fatigue (θ_{ref})

k_3 = Coefficient de pente de la droite pour la relation $\log c_{1,\theta_i}$ en fonction de $\log |E_{\theta_i}^*|$; il est établi en évaluant à l'aide d'une droite la performance en fatigue du matériau à diverses températures. Faute d'avoir des données d'essai de fatigue à différentes températures pour l'enrobé testé, la valeur de k_3 est prise comme étant égale à 2,5 tel qu'utilisé en France pour les enrobés conventionnels et pour des températures positives (Perraton, Di Benedetto et Carter, 2011)

Ainsi, les valeurs des N_f du Tableau 5.4 ont été corrigées pour une température de 10°C en utilisant l'équation (5.4). Le Tableau 5.5 présente une synthèse des valeurs de durée de vie corrigées.

Tableau 5.5 Synthèse des différents critères de rupture corrigés à 10°C

Éprouvettes		Condition d'essai		Critères de rupture* corrigé pour 10°C (k ₃ = 2,5)				2S2P1D E ⁺ _{10C}	2S2P1D E ⁺ _{Θi} où Θi = température d'essai
#	Vides (%)	Déformation ε _{Aax} (μdef)	Température (°C)	Détermination du N _{II/III} (φ max)	Détermination du N _{II/III} (méthode point d'inflexion)				
					N _{F-infAext}	N _{F-inf[E*]}	N _{II/III}		
Fat-1	1,58%	169,7	11,23	1134871	1098242	1114077	1106160	13 128	12 163
E*/Fat-3	1,85%	160,2	11,05	5382754	5382754	5382754	5382754	13 128	12 303
Fat-6	1,48%	158,0	11,02	5574859	5463226	5490093	5476659	13 128	12 326
Fat-7	2,22%	176,8	11,02	1898173	1911751	1892963	1902357	13 128	12 332
* Les valeurs de N _F (en rouge) ont été estimées par la méthode DGCB (D _{IIIc} = 27%) puisque l'essai a été interrompu prématurément à 4761695 cycles. La méthode d'analyse DGCB utilisée est décrite à la §5.3.4.									

5.3.3.2 Droite de Wöhler et durée de vie pour 1 000 000 de cycles (ε6)

En déterminant expérimentalement pour différentes amplitudes de déformation (ε_{Aax}) la durée de vie en fatigue (N_f) correspondante, il est possible de mettre ces deux éléments en relation en définissant la loi de comportement de fatigue à l'aide de la courbe de Wöhler. Cette courbe se présente sous la forme d'une droite dans le système d'axes Log(N_f) versus Log(ε_{Aax}). L'équation classique pour exprimer la loi de fatigue est définie à l'aide de deux coefficients (c₁ et c₂) et elle s'exprime ainsi :

$$N_f = c_1 (\varepsilon_{Aax})^{-c_2} \quad (5.5)$$

Où

N_f = Durée de vie en fatigue en cycles pour une température (θ_i) et une fréquence (f_i) donnée

ε_{Aax} = Amplitude de déformation cyclique imposée (m/m) pour une température (θ_i) et une fréquence (f_i) donnée

c₁ = Coefficient qui correspond à la durée de vie en fatigue (N_f) d'une amplitude de déformation de 1 m/m pour une température (θ_i) et une fréquence (f_i) donnée

c₂ = Pente de la droite de fatigue

La droite de fatigue dépend essentiellement du matériau, de la température ainsi que la fréquence de sollicitation. La méthode française de dimensionnement définit cette droite à l'aide du point ε_6 (amplitude de déformation qui conduit à une durée de vie de 10^6 cycles) et du coefficient b qui est lié à la pente ($b = \frac{-1}{c_2}$). La Figure 5.16 présente la provenance des différentes variables de la loi de fatigue.

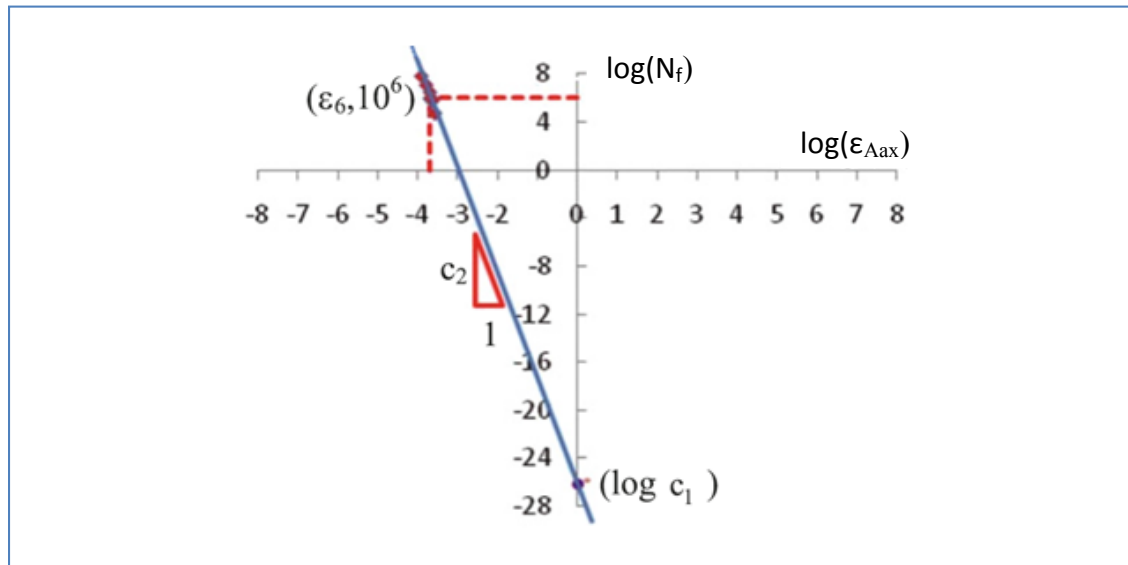


Figure 5.16 Variables de la droite de Wöhler dans le domaine $\text{Log}(N_f)$ vs $\text{Log}(\varepsilon_{Aax})$
Tirée de Perraton, Di Benedetto et Carter (2011)

Précédemment, la durée de vie en fatigue (N_f) pour différentes amplitudes de déformation (ε_{Aax}) a été établie expérimentalement sur 4 éprouvettes. Le critère de rupture utilisé pour établir la durée de vie est le nombre de cycles correspondant à la transition des phases II/III ($N_{II/III}$). Deux méthodes ont été utilisées en parallèle pour établir le $N_{II/III}$, soit la méthode qui consiste à identifier la transition en déterminant le $N_{f\phi\max}$, où la méthode visant à cibler le nombre de cycles correspondant au point d'inflexion de la transition des phases II/III. Ainsi, la droite de Wöhler a pu être tracée en permettant de calculer également la valeur de ε_6 . Le Tableau 5.6 présente les coefficients obtenus pour les deux méthodes d'identification du $N_{II/III}$ et fait une distinction d'avant et après la correction des valeurs de N_f en fonction de la température.

Tableau 5.6 Caractéristiques des droites de fatigue

Critères de rupture sans correction de température ($T=11,1 \pm 0,1^\circ\text{C}$)					
Méthode de calcul $N_{fII/III}$	c_1	c_2	b	ε_6 ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	R^2
Détermination du $N_{fII/III}$ (φ max)	1,54E-41	12,49	-0,080	178,1	0,66
Détermination du $N_{fII/III}$ (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 $N_{fII/III}$	c_1	c_2	b	ε_6 ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	R^2
Détermination du $N_{fII/III}$ (φ max)	3,05E-41	12,43	-0,080	180,5	0,68
Détermination du $N_{fII/III}$ (point d'inflexion)	4,93E-41	12,37	-0,081	180,5	0,66

En corrigeant les critères de rupture (N_f) et en les ramenant tous à une même température commune (10°C), les coefficients de détermination (R^2) de la droite de Wöhler ce sont légèrement améliorés. La corrélation reste toutefois un peu faible, principalement en raison de la durée de vie obtenue pour l'éprouvette Fat-1 qui semble être à l'écart des autres points (voir Figure 5.17). L'analyse de la durée de vie reste toutefois conservatrice en gardant le point Fat-1, puisque le retirer aurait pour effet d'aplanir la pente de la droite sans l'abaisser par rapport à l'ordonnée ($\text{Log}(N_f)$). L'amplitude de déformation obtenue pour une durée de vie de 10^6 cycles (ε_6) est de $180,5 \mu\text{m}/\text{m}$ ce qui est relativement élevé si on considère également le haut module de rigidité de l'EBHP (Chaux-H).

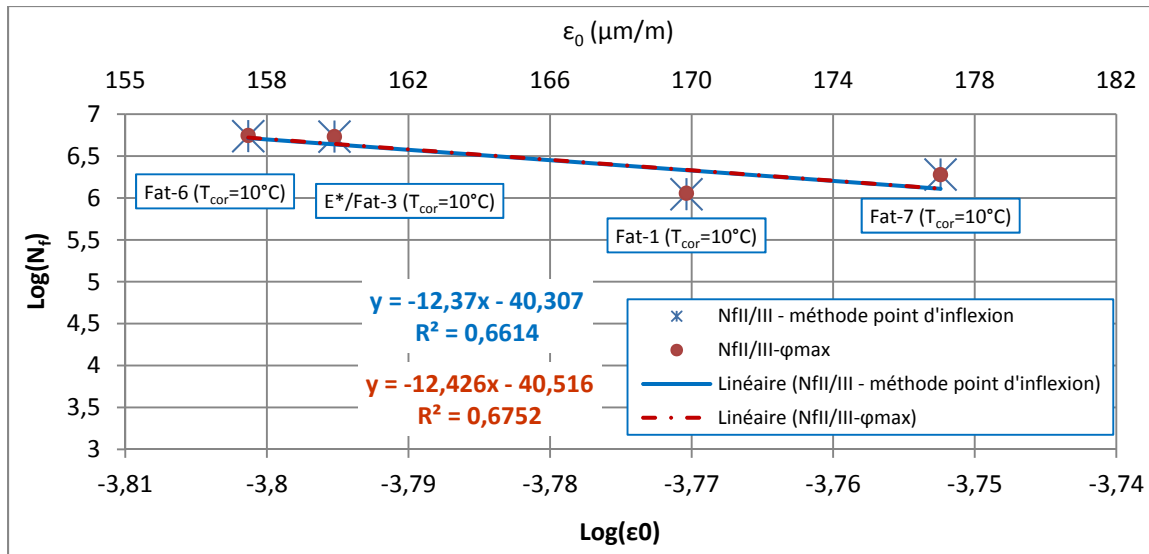


Figure 5.17 Représentation graphique des droites de Wöhler corrigées à 10°C du mélange d'EBHP (Chaux-H)

Notons également que les deux méthodes utilisées pour identifier le critère de rupture $N_{fII/III}$ mènent pratiquement aux mêmes résultats.

5.3.4 Méthodes DGCB d'analyse de l'endommagement par fatigue

Il est possible d'obtenir la perte de rigidité d'un enrobé, attribuable essentiellement à l'endommagement par fatigue en considérant l'évolution de sa rigidité et en la corrigeant de la perte de rigidité due aux effets biaisants (échauffement, thixotropie et non-linéarité). On assume tout d'abord une évolution linéaire de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction du nombre de cycles de sollicitations pour un intervalle donné situé dans la phase II. Puisque les effets biaisants sont beaucoup moins importants en phase II, ils peuvent être identifiés aisément (si l'essai est homogène) pour permettre ensuite de corriger les valeurs de $|E^*|$, tel que proposé par la méthode DGCB (Di Benedetto et al., 2004). Cette méthode permet entre autres de corriger le dommage mesuré à la transition des phases II/III afin d'obtenir le dommage réel menant à une rupture, exempt des effets biaisants.

5.3.4.1 Modules de rigidité initiaux

Afin de calculer le dommage il est important de déterminer dans un premier temps la valeur du module de rigidité en début d'essai $|E^*_0|$, soit au premier cycle de sollicitation. Puisque la déformation imposée est instable lors des premiers cycles, il est également nécessaire de corriger le $|E^*_0|$ afin de s'affranchir d'effets biaisants qui pourraient être dus à la non-linéarité de l'enrobé. Pour ce faire, une extrapolation des valeurs de module a été utilisée en considérant les premiers cycles de sollicitations où la déformation imposée s'était stabilisée. En ce qui concerne les essais de fatigue de ce projet, les valeurs de module des cycles 37 à 1000 ont été utilisées pour faire une extrapolation exponentielle. Certains auteurs déterminent la valeur de $|E^*_0|$ par extrapolation linéaire, mais les données de ce projet cadrent beaucoup mieux avec une extrapolation logarithmique (voir Figure 5.18). Les valeurs de modules ont été prises jusqu'au 1000^{ième} cycle puisqu'il a pu être observé que l'évolution de la température reste généralement négligeable durant ces cycles ($\pm 0,08^\circ\text{C}$).

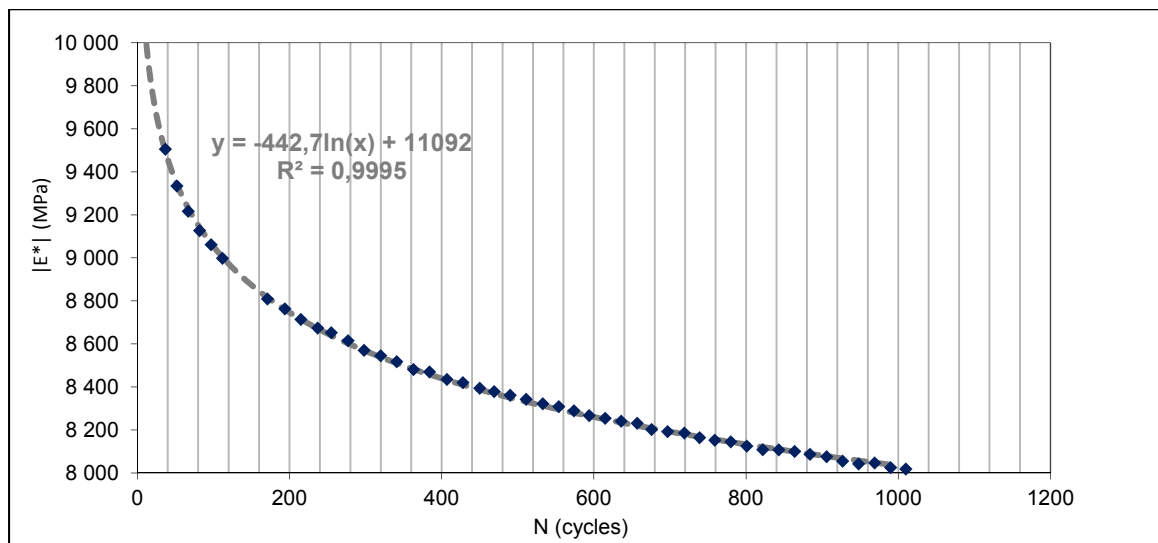


Figure 5.18 Extrapolation logarithmique du $|E^*_0|$ de l'éprouvette Fat-1

Les modules de rigidité initiaux ont donc tous été déterminés par extrapolation logarithmique. Le Tableau 5.7 présente la synthèse des valeurs de $|E^*_0|$ ainsi obtenues pour les éprouvettes testées. On observe entre autres une valeur du module initial $|E^*_0|$ un peu plus

faible pour l'éprouvette Fat-7, ce qui pourrait s'expliquer en partie par la température initiale qui était de 1°C supérieure à la température visée (10°C).

Tableau 5.7 Détermination des modules de rigidité initiaux

# Éprouvette	Vides (%)	Condition d'essai		Détermination de $ E^*_0 $ (MPa)			Température initiale $ E^*_0 $ (°C)
		Déformation (μdef)	Température (°C)	Valeurs	Moyenne	Écart- type	
Fat-1	1,6%	170	11,23	11092	10920	553	10,37
E*/Fat-3	1,9%	160	11,05	11369			9,93
Fat-6	1,5%	158	11,02	11105			10,37
Fat-7	2,2%	177	11,02	10112			11,01

À noter aussi que les valeurs des modules initiaux $|E^*_0|$, déterminées en fatigue ($>160 \mu\text{def}$), sont plus faibles que les valeurs de l'essai de module complexe ($<50\mu\text{def}$) déterminées avec 2S2P1D pour les mêmes fréquences et températures (comparaison avec Tableau 5.5). Cette observation peut s'expliquer par le comportement non-linéaire de l'enrobé bitumineux. La valeur du module initial serait en effet inversement proportionnelle à l'amplitude de déformation pour un essai de fatigue en contrôle de déformation. C'est du moins le constat qui a pu être observé dans plusieurs ouvrages (Nguyen, 2009; Touhara, 2012).

5.3.4.2 Calcul du dommage et correction

Tout d'abord, on peut définir l'évolution du dommage (D) avec l'équation suivante :

$$D = \frac{|E^*_0| - |E^*_i|}{|E^*_0|} \quad (5.6)$$

Où

$|E^*_0|$ = Norme du module complexe initial (cycle 1)

$|E^*_i|$ = Norme du module complexe au cycle i

Pour trouver le dommage critique (D_{III}) au point de rupture, soit à la transition de la phase II/III, l'équation (5.6) devient :

$$D_{III} = \frac{|E_0^*| - |E_{III}^*|}{|E_0^*|} \quad (5.7)$$

Où

$|E_0^*|$ = Norme du module complexe initial (cycle 1)

$|E_{III}^*|$ = Norme du module complexe correspondant au critère de rupture retenu ($N_{II/III}$)

Le dommage critique (D_{III}) correspond donc à la perte de module menant à la rupture. Cette perte de module est induite par l'endommagement due à la fatigue, mais elle est également affectée par des effets biaisants. Il est donc nécessaire de déterminer le dommage critique corrigé (D_{IIIc}) afin de se soustraire de ces effets biaisant (échauffement du matériau, thixotropie du bitume et non-linéarité). Il est possible d'y arriver en assumant tout d'abord une évolution linéaire de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction du nombre de cycles pour un intervalle fixé en phase II. Notons également que le choix de cet intervalle est fait en fonction du critère de rupture $N_{II/III}$, où l'intervalle (i) choisi est à la fois inférieur et le plus près possible du $N_{II/III}$. Le Tableau 5.8 définit quatre intervalles (i) qui peuvent être considérées, ainsi que des facteurs C_i correspondant (Di Benedetto et al., 2004).

Tableau 5.8 Intervalles considérés pour la méthode DGCB

i	Nom de l'intervalle	Étendue (nombre de cycles)	C_i
-1	Intervalle -1	30 000 à 60 000 cycles	5/6
0	Intervalle 0	40 000 à 80 000 cycles	4/5
1	Intervalle 1	50 000 à 150 000 cycles	3/4
2	Intervalle 2	150 000 à 300 000 cycles	2/3

Les équations (5.8) et (5.9) intègrent l'analyse d'endommagement de la méthode DGCB tel que présenté dans la littérature (Di Benedetto et al., 2004) :

$$D_{IIIc} = D_{III} - C_i \times (|E_0^*| - E_{00i})/|E_0^*| \quad (5.8)$$

$$D_{IIIc} = D_{III} - (|E_0^*| - E_f)/|E_0^*| \quad (5.9)$$

Où

C_i = Facteur déterminé en fonction de l'intervalle (i) fixé, voir Tableau 5.8

$|E_0^*|$ = Valeur du module initial du matériau

E_{00i} = Valeur de la norme du module complexe au 1^{er} cycle, obtenue par extrapolation linéaire de l'intervalle (i) fixé

E_f = Valeur du module initial du matériau sans les effets biaisant, calculée pour l'intervalle i ; où $E_f = -C_i(|E_0^*| - E_{00i}) + |E_0^*|$

La Figure 5.19 présente le détail de la provenance des différentes variables utilisées par la méthode DGCB sur l'essai de fatigue de l'éprouvette Fat-1.

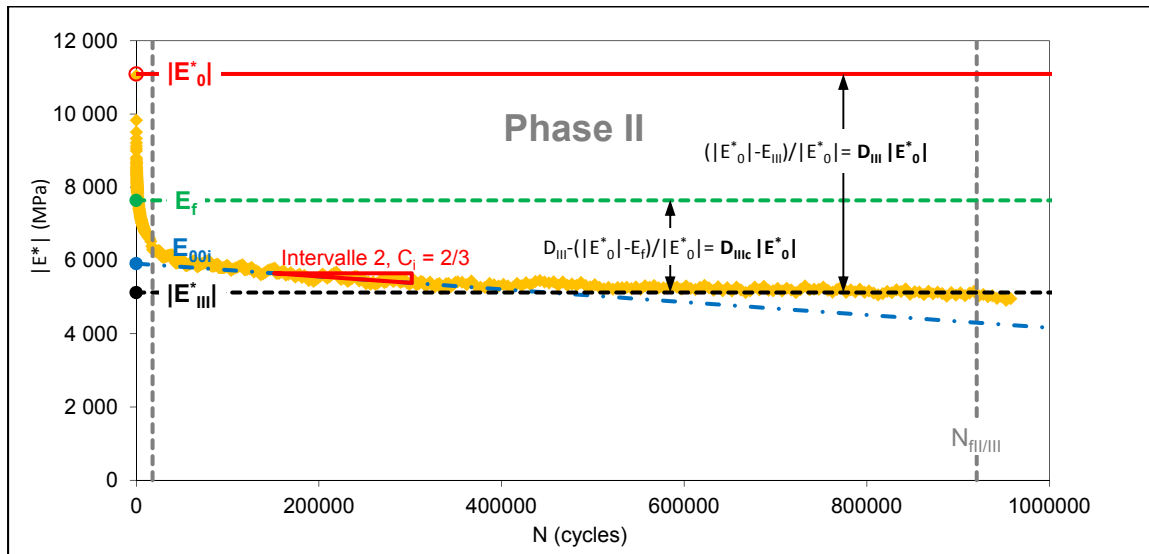


Figure 5.19 Détermination des variables de la méthode DGCB sur l'éprouvette Fat-1

5.3.4.3 Résultats des valeurs de D_{IIIc} et prédiction

Il ressort de la littérature que le dommage critique corrigé (D_{IIIc}) semble être indépendant de l'amplitude de déformation imposée (ϵ_{Aax}) contrairement au dommage critique (D_{III}). La Figure 5.20 illustre cette observation.

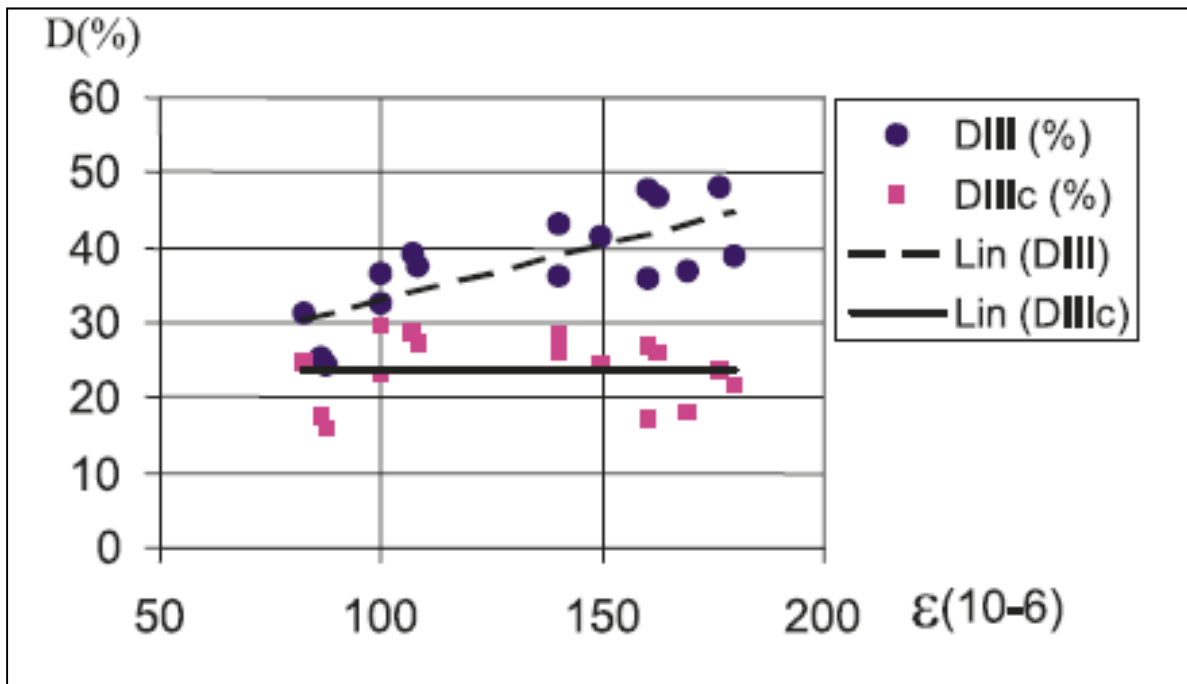


Figure 5.20 Dépendance (D_{III}) et indépendance (D_{IIIc}) du dommage critique indiquant l'apparition de macrofissures (phase II/III) par rapport à l'amplitude de déformation (ϵ_{Aax})
Tirée de Di Benedetto et al. (2004)

Un autre constat avancé par Lamothe (2014) énonce que le dommage critique corrigé (D_{IIIc}) serait dépendant de la teneur en vides de l'éprouvette tout en étant indépendant de l'amplitude de déformation imposée, voir Figure 5.21.

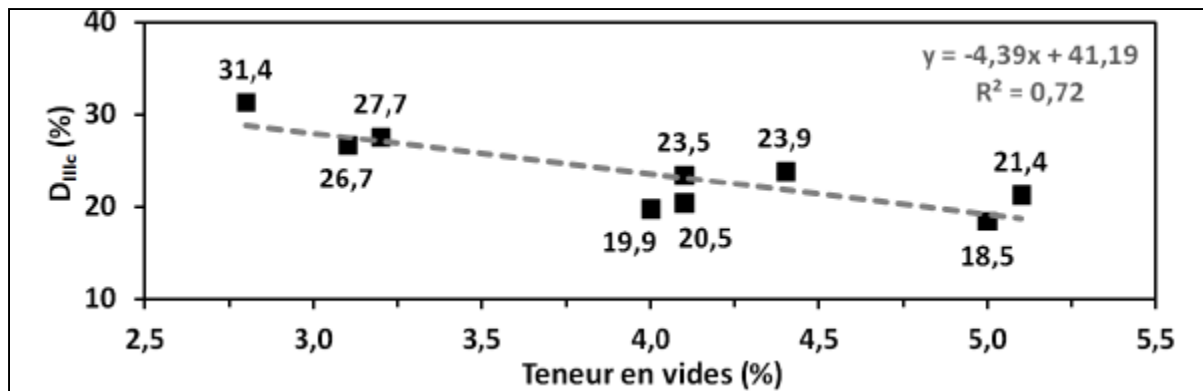


Figure 5.21 Évolution du dommage critique corrigé (D_{IIIc}) en fonction de la teneur en vides d'éprouvettes testées à 10°C et 10Hz

Tirée de Lamothe (2014)

Ces constatations sont de première importance en ce qui concerne la détermination d'un critère de fatigue cohérent puisqu'il pourrait être possible de prédire la durée de vie ($N_{III/III}$) d'un enrobé avant même d'avoir atteint la phase III. L'essentiel est d'avoir une valeur de D_{IIIc} prédite à partir des valeurs de teneur en vides et de D_{IIIc} obtenues en testant d'autres éprouvettes semblables. Dans ce projet, un des essais de fatigue (E*/Fat-3) n'a jamais atteint la phase III en raison d'une interruption prématurée de l'essai. Les données en phase II sont toutefois suffisantes pour tenter de faire une prédiction du dommage critique corrigé (D_{IIIc}). Le nombre d'éprouvettes testées en fatigue est toutefois limité (4), ce qui rend la tâche difficile pour évaluer de façon rigoureuse l'évolution du D_{IIIc} en fonction de la teneur en vides. Une simple moyenne des valeurs de D_{IIIc} obtenues pour 3 éprouvettes a donc servi à déterminer le D_{IIIc} de la 4^{ième} éprouvette (E*/Fat-3). Bien que cette façon de procéder soit très approximative, il faut tout de même considérer que les teneurs en vides des 4 éprouvettes sont relativement semblables. De plus, la teneur en vides de l'éprouvette E*/Fat-3 est de 1,9% tandis que la moyenne des teneurs en vides des trois autres éprouvettes est de 1,8%. Le Tableau 5.9 présente les valeurs de D_{IIIc} obtenues et prédites des 4 éprouvettes analysées.

Tableau 5.9 Valeurs de dommage critique corrigé (D_{IIIc}) et prédiction du D_{IIIc} pour l'éprouvette E*/Fat-3

#	Vides (%)	$ E^*_o $	N _{fiI/III}	E_{III}	D_{III}	C_i	E_{00i}	E_f	D_{IIIc}
Fat-1	1,6%	11 092	937 630	5 040	54,6%	0,67	5 915	7 641	23,5%
E*/Fat-3	1,9%	11 369	4 576 283	4 734	58,4%	0,67	6 021	7 804	27,0%
Fat-6	1,5%	11 105	4 762 070	4 583	58,7%	0,67	6 017	7 713	28,2%
Fat-7	2,2%	10 112	1 623 408	4 053	59,9%	0,67	5 478	7 023	29,4%
* Les valeurs en rouge ont été déterminées par rétro-calcul à partir d'une valeur de D_{IIIc} prédite en considérant la moyenne des 3 autres éprouvettes									

On observe une valeur de D_{IIIc} pour l'éprouvette Fat-1 qui semble être à l'écart des deux autres éprouvettes (Fat-6 et Fat-7). La moyenne des trois valeurs de D_{IIIc} calculées est donc affectée à la baisse par cet écart, mais un dommage critique corrigé (D_{IIIc}) plus faible que la réalité permet tout de même de faire un calcul conservateur de la loi de fatigue. Rappelons que l'éprouvette Fat-1 semblait également être à l'écart des autres données lorsque la droite de Wöhler a été tracée (§5.3.3.2). Rien ne semble indiquer cependant que l'essai de l'éprouvette Fat-1 ne se serait pas bien déroulé.

5.4 Essais d'orniérage

Afin d'évaluer la résistance à l'orniérage de l'EBHP (Chaux-H), l'évolution de la profondeur moyenne de l'orniérage a été mesurée sur deux plaques (500 x 180 x 100 mm) d'enrobé testées à l'orniéreur de type MLPC. Bien que l'essai ce soit déroulé conformément à la méthode d'essai LC 26-410 du MTQ, les mesures de profondeur d'ornière ont été relevées pour un total de 100 000 cycles plutôt que de suivre la recommandation de 30 000 cycles pour les plaques d'une épaisseur de 100 mm. La Figure 5.22 présente les résultats d'essais d'orniérage obtenus pour l'EBHP (Chaux-H).

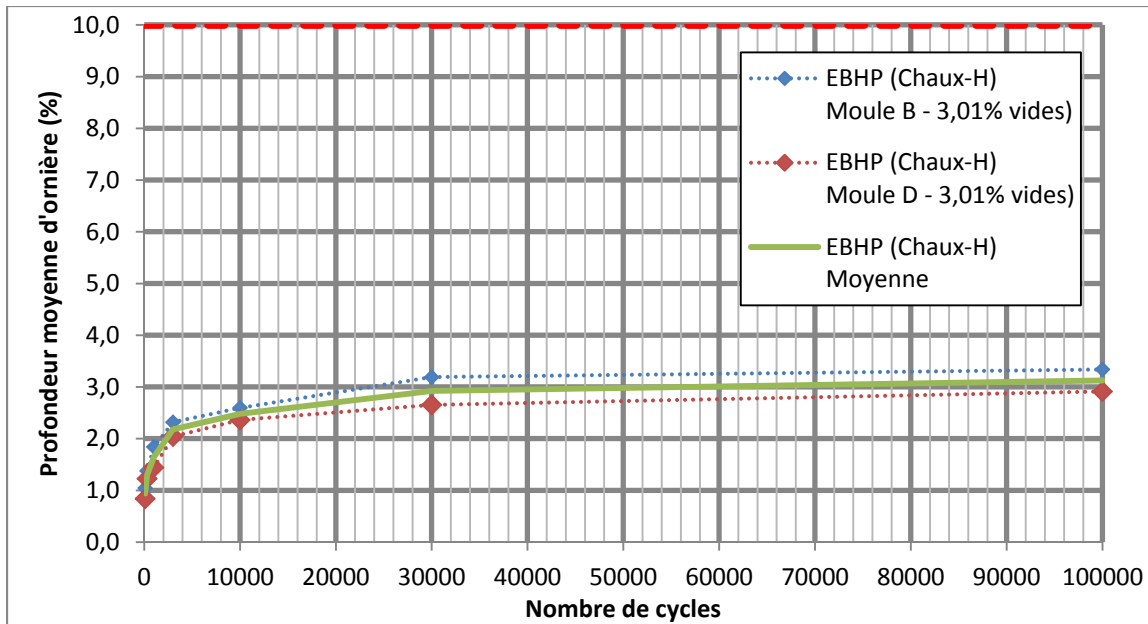


Figure 5.22 Résultats d'ornièrage de la formulation EBHP (Chaux-H)

La ligne pointillée (**en rouge**) représente la limite admissible de 10% d'ornièrisme après 30 000 cycles, telle que prescrite dans la norme 4202 du MTQ. Elle est applicable aux enrobés de type GB-20 et ESG-14; ce dernier étant semblable au EBHP (Chaux-H) si on les compare en termes d'usages. Notons ici que la teneur en vides des plaques testées est de 3,0%, comparativement à la teneur en vides de 5,0% qui est habituellement préconisée. Étant donné le type de granulométrie utilisé pour la formulation d'EBHP (Chaux-H), soit le contact gros-sur-gros et une double discontinuité de la courbe granulométrique, la mise en place de l'EBHP en visant une compacité supérieure à 95% est facilement atteignable. De plus, une teneur en vides plus faible combiné à une faible teneur en bitume devrait favoriser la résistance à l'ornièrisme de l'enrobé pour ce type de squelette granulaire. Les résultats semblent également aller dans ce sens puisque même après 100 000 cycles de sollicitations, la progression de la profondeur d'ornières est pratiquement stable avec une moyenne d'ornièrisme légèrement supérieure à 3,1%. Il serait tout de même souhaitable de pousser l'analyse en réalisant des essais supplémentaires pour tenter de déterminer l'influence de la teneur en vides sur l'ornièrisme de ce type d'enrobé (EBHP). Les performances à l'ornièrisme

montrées par cet enrobé sont très prometteuses, surtout lorsqu'on les compare aux exigences du MTQ (10% après 30 000 cycles).

5.5 Essais de module complexe

5.5.1 Résultats et calibration pour le module complexe de l'EBHP (Chaux-H)

Les essais de module complexe ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques prélevées par carottage dans la troisième plaque d'enrobé (600 x 400 x 125 mm³) compacté à l'aide du compacteur de plaques MLPC. Les éprouvettes ont une teneur en vides de 1,7% en moyenne (2% ciblé) avec un écart-type de 0,2% ce qui devrait aider à avoir des résultats comparables pour chacune d'elles. Le détail des caractéristiques géométriques de chaque éprouvette est présenté à la §5.1.

Le Tableau 5.10 présente les paramètres 2S2P1D obtenus pour la formulation EBHP (Chaux-H). La même méthode de calibration du modèle 2S2P1D, présenté au chapitre 4, a été utilisée sur les données mesurées des éprouvettes testées. Cette section présente donc en détail les résultats ainsi que le modèle 2S2P1D paramétré aux données obtenues lors d'essais de module complexe.

Tableau 5.10 Paramètres 2S2P1D des éprouvettes de l'EBHP (Chaux-H)

	E_0 (MPa)	E_∞ (MPa)	k	h	δ	τ_E (T=15°C) (s)	β	C_1	C_2
E*/Fat-2	88	40255	0,180	0,562	1,69	0,0070	4350	24	148
E*/Fat -3	72	40295	0,174	0,541	1,63	0,0065	4350	24	152
E*/Fat -4	62	40229	0,175	0,551	1,68	0,0056	4350	26	164
E*/Fat -5	71	40163	0,179	0,560	1,71	0,0069	4350	26	161
Moyenne	73	40235	0,177	0,554	1,68	0,0065	4350	25	156

Une fois les paramètres de calibration déterminés, les résultats et le modèle peuvent être comparés et représentés dans l’espace Cole-Cole (Figure 5.23).

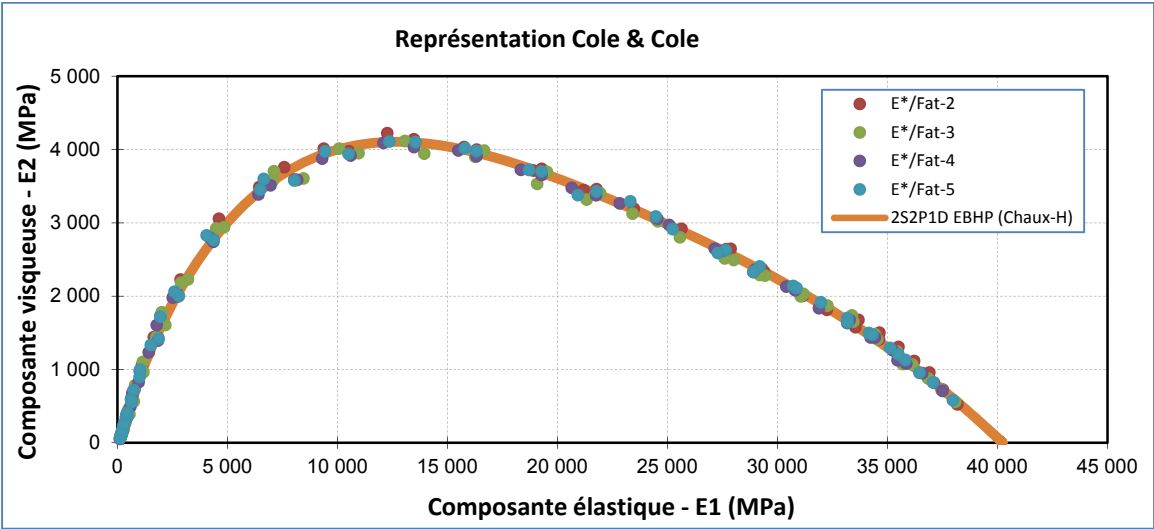


Figure 5.23 Représentation dans le plan Cole-Cole des essais de module complexe, formulation EBHP (Chaux-H)

Tel que décrit à la §4.2.2, la qualité du calage du modèle 2S2P1D aux données mesurées a été évaluée dans un espace logarithmique pour les composantes élastiques ($\log E_1$) et visqueuses ($\log E_2$) en identifiant le coefficient de détermination (R^2) ainsi que l’erreur de prédiction moyenne (RMSE) des enrobés testés. Rappelons qu’un modèle 2S2P1D qui représenterait parfaitement les données mesurées aurait un coefficient de détermination (R^2) évalué à 1 ainsi qu’une erreur de prédiction moyenne (RMSE) de 0. Le Tableau 5.11 présente les paramètres statistiques des éprouvettes testées.

Tableau 5.11 Paramètres statistiques de la qualité du calage des essais de module complexe, formulation EBHP (Chaux-H)

Éprouvettes	R ² Log(E1)	R ² Log(E2)	RMSE Log(E1)	RMSE Log(E2)
E*/Fat -2	0,99	0,98	0,062	0,087
E*/Fat -3	0,99	0,99	0,062	0,069
E*/Fat -4	1,00	0,99	0,058	0,070
E*/Fat -5	0,99	0,98	0,063	0,082
Moyenne	0,99	0,98	0,061	0,077

Le Tableau 5.12 présente la norme du module complexe des éprouvettes testées pour deux groupes de température et fréquence couramment utilisés dans la littérature, soit 15°C;10 Hz et 10°C;10Hz.

Tableau 5.12 Module dynamique des éprouvettes testées à 15°C et 10°C pour une fréquence de 10Hz, formulation EBHP (Chaux-H)

Mélanges	E* _{15°C, 10 Hz} (MPa)	E* _{10°C, 10Hz} (MPa)
E*/Fat-2	9 472	13 257
E*/Fat -3	9 492	13 290
E*/Fat -4	8 956	12 746
E*/Fat -5	9 382	13 195
Moyenne	9 332	13 128

Il peut être intéressant de comparer les résultats obtenus pour la formulation d'EBHP (Chaux-H) aux spécifications d'un enrobé à module élevé (EME) réalisé au Québec, telles que décrites dans le bulletin-technique Bitume Québec (2014). Le Tableau 5.13 présente ces spécifications.

Tableau 5.13 Spécifications d'un enrobé classé EME au Québec, adapté de Bitume Québec (2014)

Caractéristiques	Spécifications
$ E^* $ en traction compression directe (10°C-10Hz)	$\geq 14\,000$ (MPa)
$ E^* $ en traction compression directe (15°C-10Hz)	$\geq 11\,000$ (MPa)
Résistance en fatigue Déformation correspondant à 10^6 cycles – ϵ_6 (10°C-10Hz)	> 130 (μdef)

Bien que la formulation d'EBHP (Chaux-H) ne rencontre pas tout à fait ces spécifications, il n'en demeure pas moins que ses performances en fatigue ($\epsilon_6 = 180,5 \mu\text{def}$) ainsi qu'à l'orniérage en font un produit très intéressant. Une analyse plus poussée de dimensionnement de chaussée serait nécessaire pour savoir où l'EBHP (Chaux-H) se classe en termes de durabilité vis-à-vis l'EME mentionné dans le bulletin technique de Bitume Québec. On peut également comparer les résultats de l'EBHP (Chaux-H) avec les spécifications et résultats d'enrobés français comme l'EME2 et le GB5. Ces derniers sont présentés au Tableau 1.1 de la §1.2.3. Il peut une fois de plus être constaté que les enrobés français sont plus rigides que l'EBHP (Chaux), mais les performances en fatigue de ce dernier sont supérieures.

5.6 Comparaison des performances évaluées avec un enrobé de type ESG14

Afin de mettre en perspective les résultats d'essais de l'EBHP (Chaux-H), une analyse comparative avec un enrobé bitumineux plus conventionnel a été effectuée. L'enrobé servant de comparatif est de type ESG14 et contient un bitume de grade PG 64-28. Selon la norme 4202 du MTQ, l'ESG14 peut être utilisé de différentes façons, soit : en couche unique, en couche de surface ou en couche de base. L'ESG14 est un bon enrobé pour être comparé à l'EBHP (Chaux-H) puisque ces deux enrobés partagent le même GNM (14 mm) et sont conçus pour des usages similaires. L'ESG14 présenté ici a été formulé dans le cadre d'un autre projet par le fabricant Demix Constructon. Les caractéristiques thermomécaniques de l'enrobé ont été évaluées à l'ETS.

5.6.1 Comparaison des constituants

La Figure 5.24 présente les courbes granulométriques des deux enrobés. La nature plus pierreuse de l'EBHP (Chaux-H) ressort de façon évidente en comparant les deux types de granulométrie. La courbe de l'ESG14 est plutôt étalée tandis que celle de l'EBHP présente des discontinuités.

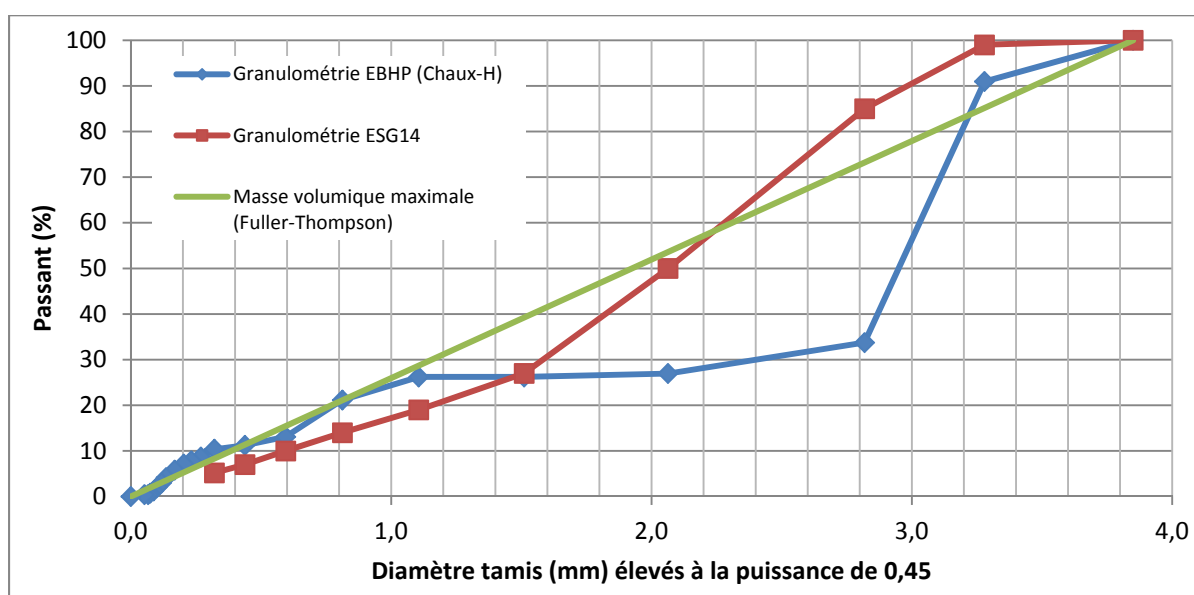


Figure 5.24 Comparaison des courbes granulométriques de l'EBHP (Chaux-H) et de l'ESG14

Le Tableau 5.14 présente quelques caractéristiques importantes qui diffèrent entre les deux types d'enrobés bitumineux. Puisque l'EBHP possède un squelette granulaire plus pierreux et possiblement⁴ plus dense, le pourcentage de bitume total (P_b) ainsi que le volume de bitume effectif (V_{be}) sont considérablement plus faibles. L'utilisation de particules de verre (environ 25% massique) pour remplacer un volume de particules de calcaire (fraction intermédiaire et fines) a aussi permis d'abaisser le pourcentage de bitume absorbé (P_{ba}) et la densité effective

⁴ L'information concernant les vides intergranulaires (VAM) de l'ESG14 n'est pas disponible. Le squelette granulaire de l'EBHP a toutefois été optimisé pour être dense, d'où l'hypothèse que ce squelette est plus dense que celui de l'ESG-14.

des granulats (D_{ge}). Finalement, le type de bitume utilisé a aussi un rôle important à jouer quant aux propriétés rhéologiques de l'enrobé.

Tableau 5.14 Caractéristiques divergentes entre les deux enrobés comparés

	EBHP (Chaux-H)	ESG14
P_b (% massique)	3,69	5,03
P_{ba} (%massique)	0,12	0,42
V_{be} (%volumique)	8,90	11,40
d_{ge}	2,685	2,733
d_{mm}	2,514	2,521
Type de Bitume	PG76-28P	PG64-28

Pour plus d'information concernant les constituants et les proportions de matériaux utilisés dans l'ESG14, une fiche de formulation est donnée à l'ANNEXE IV.

5.6.2 Comparaison des résultats d'essais

Dans cette section, les résultats obtenus sur l'EBHP (Chaux-H) des essais réalisés dans la phase II de ce projet sont comparés aux résultats de l'ESG14. La comparaison est faite pour les essais de fatigue, d'orniérage et de module complexe. Aucune donnée n'était disponible concernant les performances à l'essai de retrait thermique empêché de l'ESG14 présenté ici. Le Tableau 5.15 présente une comparaison des droites de Wöhler obtenues suite aux essais de fatigue.

Tableau 5.15 Paramètres des droites de Wöhler de l'EBHP (Chaux-H) et de l'ESG14

Critère de rupture, $N_{fII/III}$					
Formulation	c_1	c_2	b	ϵ_6 ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	R^2
EBHP (Chaux-H)	3,05E-41	12,43	-0,080	180,5	0,68
ESG14	1,64E-15	5,26	-0,19	112,6	0,95

La valeur plus élevée d' ϵ_6 pour l'EBHP signifie globalement que pour avoir une rupture de l'enrobé suivant 1 million de cycles de sollicitations, une amplitude de déformation (ϵ_{Aax}) plus importante peut être appliquée comparativement à l'ESG14. Il y a cependant une intersection entre les deux droites de fatigue puisqu'elles n'ont pas les mêmes valeurs de pentes (c_2). La Figure 5.25 illustre les deux droites de fatigue.

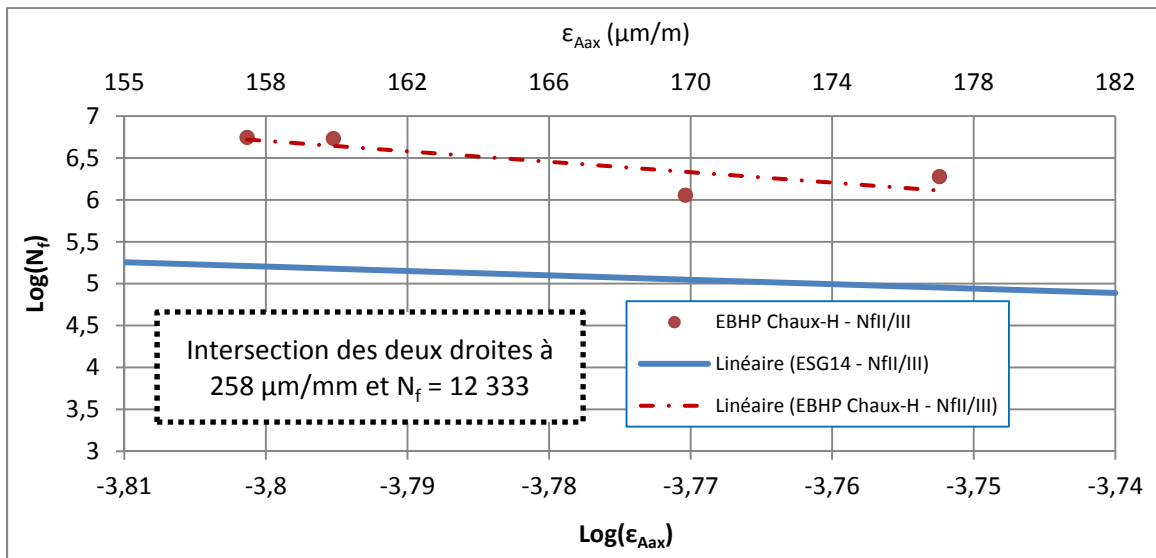


Figure 5.25 Représentation graphique des droites de Wöhler pour l'EBHP (Chaux-H) et l'ESG14

L'intérêt de localiser le point d'intersection des deux droites de fatigue est d'identifier sous quelles conditions l'ESG14 devient plus performant en fatigue que l'EBHP (Chaux). Dans ce cas précis, il semblerait que l'EBHP (Chaux-H) est plus performant en fatigue pour des amplitudes de déformations (ϵ_{Aax}) inférieures à 258 $\mu m/m$ que l'ESG14. Notons finalement qu'une telle amplitude de déformation (à 10°C et 10 Hz) serait très élevée dans un contexte de dimensionnement de chaussée.

La Figure 5.26 présente une comparaison des résultats d'orniérage des deux enrobés.

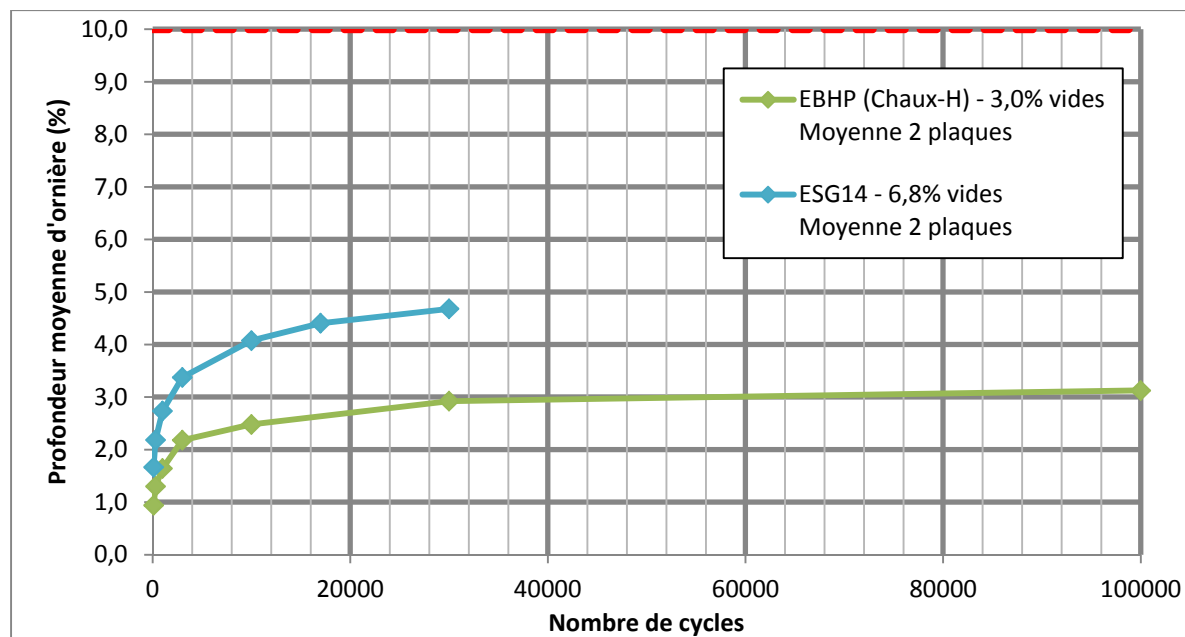


Figure 5.26 Comparaison des résultats d'orniérage de la formulation d'EBHP (Chaux-H) et d'ESG14

La norme 4202 du MTQ spécifie une profondeur d'ornièrerie moyenne de 10% après 30 000 cycles pour l'enrobé ESG14. Cette exigence est facilement respectée pour les deux enrobés avec des profondeurs d'ornières inférieures à 5% après 30 000 cycles. Le squelette granulaire de l'EBHP, où les contacts gros-sur-gros sont maximisés, ainsi que son grade de bitume plus élevé (PG76-28P) l'ont vraisemblablement aidé à dépasser l'ESG14 au niveau des performances à l'orniérage.

La Figure 5.27 présente les résultats de module complexe dans le plan Cole & Cole pour l'EBHP (Chaux-H) et l'ESG14. Cette représentation n'est toutefois pas idéale pour effectuer une bonne comparaison entre les deux enrobés.

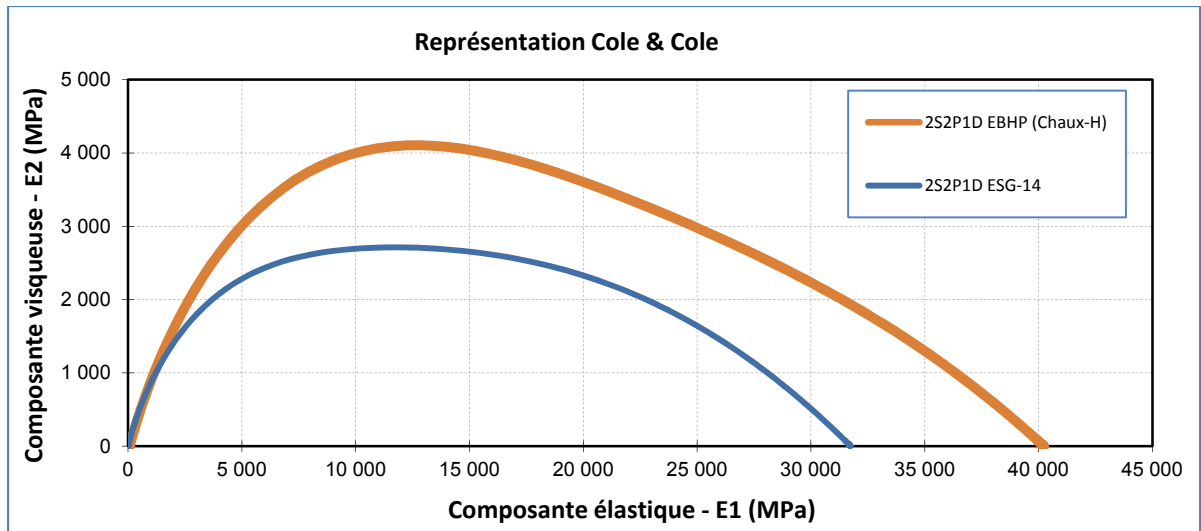


Figure 5.27 Comparaison des résultats de module complexe dans le plan Cole & Cole de l'EBHP (Chaux-H) et de l'ESG14

Afin de mettre un peu mieux en perspective la comparaison des deux formulations, le coefficient complexe de rigidité (C^*) a été évaluée. Tel que décrit au chapitre 4, l'évolution de la norme du coefficient complexe de rigidité $|C^*|$ est une bonne façon de comparer la rigidité de deux enrobés pour toute la gamme des fréquences-températures. Rappelons qu'une valeur de $|C^*|$ supérieur à 1 signifie que l'enrobé étudié est plus raide que l'enrobé de référence et vice-versa. La Figure 5.28 présente l'évolution du $|C^*|$ lorsqu'on compare l'ESG14 à l'EBHP (Chaux-H).

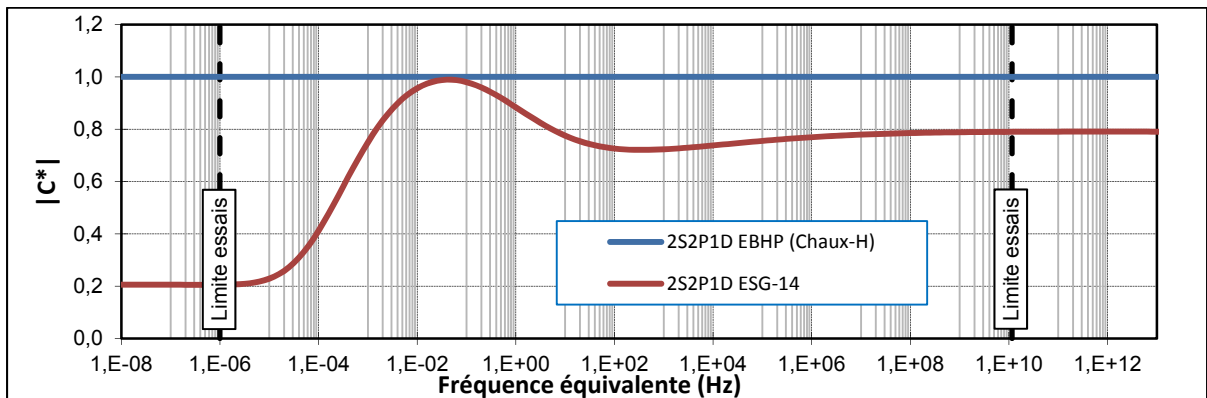


Figure 5.28 Évolution de la norme du coefficient complexe de rigidité $|C^*|$ de l'ESG14 par rapport à l'EBHP (Chaux-H) à 15°C

Dans l'ensemble, la norme du module complexe de l'ESG14 est toujours inférieure à celle de l'EBHP. Ce constat témoigne que la formulation d'EBHP (Chaux-H) apporte un gain important de rigidité sur l'ensemble des fréquences et températures. Ce gain est toutefois pratiquement nul si l'enrobé est sollicité à 15°C et 0,05Hz, ou toutes autres combinaisons équivalente de température-fréquence.

5.6.3 Comparaison en termes de structure de chaussée

À partir des données de performances au module complexe et en fatigue des deux enrobés (EBHP et ESG14), deux structures de chaussées fictives ont été conçues. L'objectif de cette analyse comparative est de concevoir dans un premier temps une structure de chaussée comportant différentes couches de matériaux incluant une certaine épaisseur d'EBHP (Chaux-H). Dans un deuxième temps, une autre structure similaire est conçue avec les mêmes matériaux, à l'exception de la couche d'EBHP qui est remplacée par une couche d'épaisseur différente d'ESG14. Les deux structures conçues ainsi doivent avoir une durée de vie en fatigue de 50 ans et les épaisseurs de poses nécessaires des deux enrobés doivent donc être déterminées en conséquence. L'outil de calcul OPECC© a été utilisé pour dimensionner les deux structures de chaussées.

5.6.3.1 Logiciel de dimensionnement OPECC©

Le logiciel OPECC© est un outil de calcul servant à prédire les phénomènes d'orniérage et de fatigue à l'échelle du revêtement d'une structure de chaussée. Ces phénomènes sont prédits en portant une attention toute particulière aux variations des températures tout au long du cycle de vie de la chaussée en se basant sur des données climatiques. L'outil est utilisable à partir d'une interface disponible en ligne (Meunier et Perraton, 2015). Une structure de chaussée est modélisée et elle peut inclure jusqu'à 9 couches différentes, soit : la couche de sol support, 4 couches de matériaux granulaires et 4 couches d'enrobé bitumineux. Les contraintes et les déformations dans la structure de chaussée sont calculées en suivant une approche multicouche comparable à celle proposée par Burminster. À noter également que

les matériaux sont considérés isotropes, homogènes et élastiques (viscoélastique pour l'enrobé). Seuls les aspects liés au phénomène de fissuration par fatigue sont traités ici puisque les données servant à la prédiction du phénomène d'orniérage proviennent d'essais qui n'ont pas été réalisés dans le cadre de ce projet (calage du modèle ESSO pour les déformations permanentes). Pour plus d'information concernant le logiciel OPECC© ainsi que les méthodes d'analyse utilisées, il est possible de se référer à la thèse de Meunier (2012).

5.6.3.2 Intrants du logiciel OPECC©

La chaussée fictive qui est conçue est une autoroute (100km/h) à forte circulation. Les deux structures de chaussée modélisée comptent 5 couches chacune. Elles sont conçues pour une durée de vie de 50 ans avec un risque de 10% qui correspond au pourcentage maximum de fissuration par fatigue atteint en fin de durée de vie. Les données du trafic considérées sont présentées au Tableau 5.16.

Tableau 5.16 Données fictives du trafic considéré

Incrémentation du nombre d'ÉCAS par année (%)	5
Coefficient d'agressivité moyen (CAM)	2
Débit journalier moyen annuel (DJMA)	100 000
Fraction de la circulation dans la direction analysée (%)	50
Fraction de la circulation dans la voie analysée (%)	75
Densité des véhicules lourds (%)	20
Nombre de jours de camionnage par année	300
Équivalence de charge axiale simple annuelle (ÉCAS)	4 500 000
Équivalence de charge axiale simple après 50 ans	942 065 981

Le Tableau 5.17 présente les caractéristiques des différentes couches utilisées pour la conception des deux structures de chaussée en considérant une durée de vie de 50 ans et un risque de 10%.

Tableau 5.17 Structure de chaussée avec couche de base d'EBHP (Chaux-H) ou d'ESG14

Matériaux	Épaisseur (mm)	Fréquence (Hz)	Module résilient (MPa)	Coefficient de Poisson (ν)	Interface
ESG-10	50	17	$f(T(^{\circ}\text{C}) - f(\text{Hz}))$	$f(T(^{\circ}\text{C}) - f(\text{Hz}))$	Collée
EBHP ESG14	120 330	17	$f(T(^{\circ}\text{C}) - f(\text{Hz}))$	$f(T(^{\circ}\text{C}) - f(\text{Hz}))$	Collée
MG20	250	-	360	0,35	Non-collée
MG56	600	-	180	0,35	Non-collée
Infrastructure	∞	-	20	0,45	Non-collée

Finalement, les résultats d'analyse des essais de fatigue et de module complexe pour l'EBHP (Chaux-H) ainsi que pour l'ESG14 ont été ajoutés pour permettre à l'outil OPECC© d'effectuer une bonne modélisation.

5.6.3.3 Résultats de l'analyse des deux structures de chaussée

Suite à l'analyse des deux structures proposées (EBHP et ESG14), le logiciel OPECC© génère des graphiques de l'évolution de la fissuration par fatigue en fonction du nombre d'années de services. Les Figure 5.29 et Figure 5.30 présentent ces évolutions pour les deux enrobés étudiés.

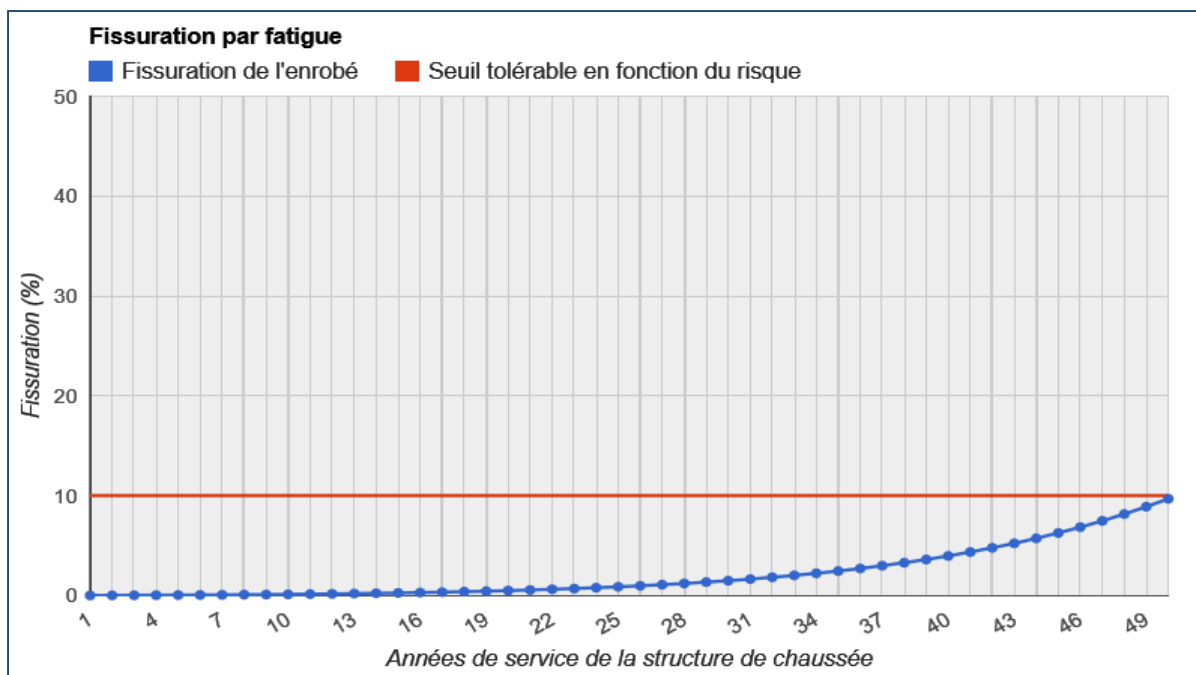


Figure 5.29 Évolution de la fissuration par fatigue en fonction du nombre d'années de la structure de chaussée avec EBHP (Chaux-H)
Tirée de Meunier et Perraton (2015)

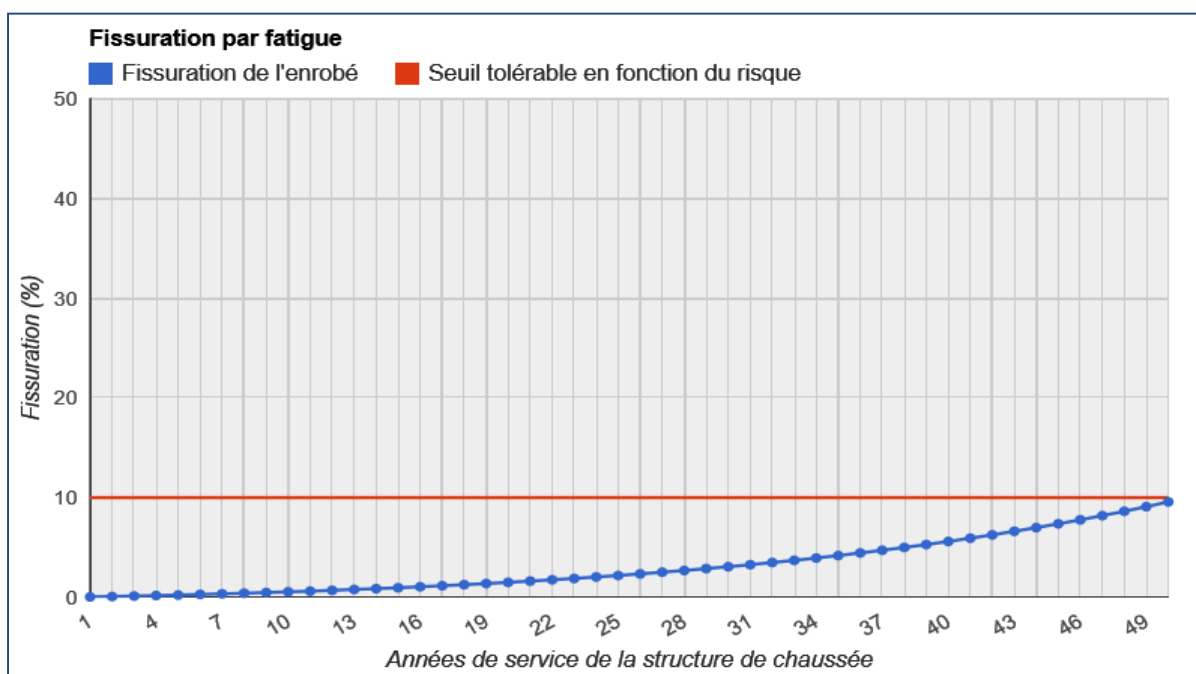


Figure 5.30 Évolution de la fissuration par fatigue en fonction du nombre d'années de la structure de chaussée avec ESG14
Tirée de Meunier et Perraton (2015)

Notons finalement que pour arriver à une évolution similaire de la fissuration par fatigue au niveau des deux structures de chaussées, la couche d'ESG14 doit mesurer 33 cm d'épaisseur comparativement à 12 cm pour la couche d'EBHP (Chaux-H). Cet écart est très important, tant d'un point de vue économique que d'un point de vue performance. Cependant, OPECC© reste un outil élaboré dans un contexte pédagogique de modélisation. Les coefficients de calage utilisés dans cet outil sont arbitraires et ne reflètent donc pas nécessairement le contexte routier québécois. Son utilisation reste toutefois fort intéressante pour faire une analyse comparative de structures de chaussée afin de permettre à l'utilisateur d'identifier la meilleure des solutions.

CONCLUSION

Le principal objectif de ce programme expérimental est de confectionner un enrobé bitumineux suivant le concept de formulation d'un EBHP, c'est-à-dire que l'enrobé est optimisé au niveau du squelette granulaire en maximisant le contact des particules (gros-sur-gros). L'enrobé doit également être confectionné de manière à bien performer au niveau de la maniabilité (PCG), la rigidité (E^*), la résistance à l'orniérage, la résistance à la fatigue et le retrait thermique empêché (TSRST). Ce programme expérimental est divisé en deux phases où la première phase est plutôt de type exploratoire et où la deuxième phase consiste à caractériser la formulation finale d'EBHP.

Lors de la première phase du projet, neuf formulations d'EBHP (GNM = 14mm) ont été confectionnées (incluant la formulation de référence). Des essais de presse à cisaillement giratoire (PCG) et de module complexe (E^*) ont été réalisés afin d'évaluer de façon préliminaire les performances au niveau de la maniabilité et de la rigidité de toutes ces formulations. Pour ce projet, quatre aspects en lien avec le contexte de formulation d'EBHP ont été explorés, soit :

- L'influence de l'utilisation de nanoparticules remplaçant un volume du filler
- L'influence de la nature des granulats (comparaison verre et calcaire)
- L'influence de l'utilisation de chaux hydratée remplaçant un volume du filler
- L'influence de différents liants

La formulation de référence est composée de grosses particules de calcaire (10-14mm), de particules fines/intermédiaires de verre et d'un bitume PG 76-28P. Les particules de verre ont été choisies initialement pour faciliter l'optimisation du squelette granulaire étant donné leur disponibilité pour différentes dimensions précises de particules. En plus d'augmenter le degré de liberté lorsque vient le temps de concevoir le squelette granulaire de l'EBHP, le verre permet également de réduire l'énergie de compaction nécessaire pour une bonne mise en place de l'enrobé puisque, contrairement au calcaire, le verre n'absorbe pas le bitume.

En faisant varier, par rapport à la formulation de référence, un seul matériau par formule, l'influence du matériau en question sur la rigidité et la maniabilité d'un mélange d'enrobé a pu être évaluée en comparant les résultats d'essais à ceux de la formulation de référence. Il est important de noter que les paramètres de formulation comme le volume de bitume total et la granulométrie sont restés constants pour l'ensemble des enrobés confectionnés.

En ce qui concerne les mélanges contenant des nanoparticules (fumée de silice), on remarque que les pertes ou gains de maniabilité sont faibles et peu significatifs pour les mélanges contenant de la fumée de silice. Les essais de module complexe n'ont pas permis d'observer l'effet rigidifiant des nanoparticules (fumée de silice) tel que vu dans la littérature. C'est d'ailleurs une diminution de la rigidité pour les températures élevées (ou fréquence équivalente) qui a été mesurée. Une hypothèse a été émise, selon laquelle les particules de fumée de silice ont plutôt tendance à s'agglomérer, ne leur permettant pas ainsi de développer une bonne surface spécifique. Une surface spécifique plus faible réduit le phénomène d'adsorption qui serait en partie responsable de l'effet rigidifiant recherché. Un traitement et/ou une méthode de malaxage visant à améliorer la dispersion des particules de fumée de silice pourrait aider à obtenir l'effet rigidifiant recherché, mais des essais supplémentaires seraient nécessaires.

Concernant l'influence de la nature des granulats, plus précisément en utilisant des particules de verre dans l'enrobé pour substituer des particules de calcaire, c'est la formulation de référence contenant des particules fines et intermédiaires de verre qui a le mieux performé au niveau de la maniabilité. Ceci dit, il a été constaté que l'utilisation de particules de verre semble influencer la maniabilité de l'enrobé et donc favoriser sa mise en place. Cette influence est plus marquée lorsque ce sont des particules fines de calcaires qui sont substituées par des particules de verre de dimensions semblables. Les résultats aux essais de module complexe (E^*) vont également dans le même sens. L'utilisation de particules de verre semblerait avoir une influence sur la rigidité de l'enrobé en l'augmentant, plus particulièrement pour les températures chaudes (ou fréquences équivalentes). L'augmentation de la rigidité prend plus d'importance lorsque les particules fines de calcaire

sont substituées par des particules de verre. Notons que c'est la formulation de référence contenant des particules fines et intermédiaires de verre qui a obtenu dans l'ensemble les meilleurs modules de rigidité.

L'influence, sur la maniabilité et la rigidité, de l'ajout de chaux hydratée dans l'enrobé a ensuite été évaluée. Une quantité de chaux hydratée équivalente à 1,5% de la masse totale des solides a été utilisée, tel que recommandé dans la littérature. La formulation contenant de la chaux hydratée a légèrement mieux performé au niveau de la maniabilité, mais l'écart par rapport à la formulation de référence (sans chaux hydratée) est peu significatif. L'utilisation de chaux hydratée dans les proportions mentionnées plus haut a donc très peu d'influence sur la maniabilité. En ce qui concerne les résultats d'essais de module complexe (E^*) l'utilisation de chaux hydratée a très peu augmenté la rigidité de l'enrobé puisque les deux formulations (avec et sans chaux hydratée) ont performé de façon pratiquement identique sur l'ensemble des températures (ou fréquence équivalente). L'utilisation de chaux hydratée, dans un contexte de formulation d'EBHP, reste toutefois intéressante puisque la littérature mentionne notamment un gain potentiel pour d'autres propriétés qui n'ont pas été évaluées en phase I, notamment la résistance au désenrobage et la résistance en fatigue.

Pour conclure la phase I, c'est l'influence de la nature du liant qui a été évaluée. Parmi les trois formulations testées à la PCG, c'est l'enrobé de référence formulé avec le bitume PG76-28P qui a le mieux performé au niveau de la maniabilité. L'enrobé formulé avec un bitume PG88-28 a légèrement moins bien performé, mais l'écart est peu significatif. La dernière formulation contenait encore une fois un bitume PG76-28P, mais 12,5% de la masse de liant a été substitué par des particules solides contenant du SBS. Une perte de maniabilité significative par rapport à la formulation de référence a pu être observée sur cette troisième formulation. Toutefois, le problème réside peut-être dans la méthode utilisée pour incorporer les particules de SBS qui ne conviendrait pas pour un enrobé formulé avec un faible taux de liant comme l'EBHP. Il pourrait être possible de remédier à ce problème en augmentant le volume total de liant pour aider à la mise en place. Des essais supplémentaires dans ce sens sont donc nécessaires. L'influence des différents liants sur la rigidité de l'enrobé a également

été étudiée. La formulation avec PG88-28 a très bien performé avec un module de rigidité jusqu'à 4 fois supérieur au module de rigidité de la formulation de référence (PG76-28) pour les températures chaudes (ou fréquence équivalente). Le module de rigidité de l'enrobé avec PG88-28 est suffisamment élevé pour le classer dans la catégorie des enrobés à module élevé (EME) selon la norme française AFNOR. La formulation avec particules solides de SBS a également mieux performé que l'enrobé de référence (PG76-28) avec un module de rigidité jusqu'à 1,5 fois supérieur au module de rigidité de la formulation de référence (PG76-28) pour les températures chaudes (ou fréquence équivalente).

En deuxième phase du projet, une caractérisation plus complète d'une des formulations de la première phase a été effectuée, pour ensuite être comparée avec une formulation d'ESG14 généralement utilisée sur les chaussées du Québec. C'est la formulation d'enrobé avec bitume PG-76-28 et chaux hydratée, soit l'EBHP (Chaux-H), qui a été retenue pour subir une batterie d'essais supplémentaires. Les essais réalisés en phase II sont :

- L'essai de retrait thermique empêché (TSRST)
- L'essai de fatigue
- L'essai de résistance à l'orniérage
- L'essai de module complexe

Quelques résultats de ces essais méritent d'être mentionnés, notamment ceux suivant l'essai de fatigue et l'essai de résistance à l'orniérage. Suite aux essais de fatigue réalisés sur la formulation d'EBHP (Chaux-H), l'amplitude de déformation menant à une rupture suivant 10^6 cycles (ϵ_6) a pu être évaluée à 180,5 μdef ce qui est beaucoup plus élevé que la valeur d' ϵ_6 de l'ESG14 servant de comparaison, soit 112,6 μdef . Une bonne résistance en fatigue couplée à des valeurs de rigidité élevées pour l'ensemble des fréquences-températures sont des propriétés indispensables pour obtenir une bonne durabilité de la chaussée. L'EBHP (Chaux-H) a beaucoup mieux performé à l'essai d'orniérage que l'ESG14. Les résultats d'essais d'orniérage sont très intéressants puisque l'EBHP avec chaux hydratée a obtenu 3,13% de profondeur d'ornière suivant 100 000 cycles de sollicitation ce qui indique une très

bonne résistance à l'orniérage. Rappelons que la norme 4202 du MTQ spécifie une profondeur d'ornière moyenne de 10% après 30 000 cycles pour l'enrobé ESG14.

Finalement, deux structures de chaussées ont été dimensionnées à l'aide d'un outil de dimensionnement nommé OPECC©. Une première structure a été réalisée avec l'EBHP (Chaux-H) comme formulation de couche de base, tandis que la deuxième structure a été réalisée avec une formulation plus standard d'ESG14 en couche de base. En ne changeant que l'épaisseur de couche de ces deux enrobés pour les deux structures de chaussées, l'épaisseur nécessaire pour un trafic donné et une durée de vie de 50 ans (10% de fissuration par fatigue après 50 ans) a été déterminée. Les résultats indiquent qu'une épaisseur de 12 cm d'EBHP (Chaux-H) équivaut à une épaisseur de 33 cm d'ESG14 lorsqu'on considère les dégradations dues aux fissurations par fatigue.

En plus de réaliser des économies sur l'épaisseur de pose, rappelons également la faible teneur en bitume du EBHP (Chaux-H) de 3,69% comparativement à 5,03% bitume pour l'ESG14. Il serait justifiable, tant d'un point de vue coût que performances, d'utiliser un bitume de meilleure qualité (plus dispendieux) pour l'EBHP sans trop augmenter le coût total de l'enrobé par rapport à l'ESG14. À la lumière de ces résultats, il semblerait que la formulation d'EBHP (Chaux-H) permette de réaliser des économies substantielles tout en livrant des performances supérieures. Des analyses supplémentaires seraient toutefois nécessaires pour mieux quantifier l'ampleur de ces économies potentielles. Il faut également rappeler que l'utilisation de matériaux de verre pour une proportion massique de l'enrobé d'environ 25% permet de donner une deuxième vie au verre en le réutilisant suite au concassage de contenants. Étant donné le contexte social actuel de pression à la fois économique et environnemental, une solution comme l'EBHP formulée dans ce projet de recherche semble très appropriée. Les résultats obtenus et les données recueillies en laboratoire sur l'EBHP (Chaux-H) pourraient justifier de faire une analyse de faisabilité plus poussée en effectuant par exemple des essais supplémentaires en laboratoire et des planches d'essais en chantier.

ANNEXE I

FICHES TECHNIQUES DES FOURNISSEURS



GRAYMONT

FICHE SIGNALÉTIQUE

SECTION I - IDENTIFICATION DU PRODUIT ET DE LA COMPAGNIE

Nom du produit : CHAUX CALCIQUE ÉTEINTE	SIMDUT – CATÉGORIES DE PRODUITS D2A : MATIÈRES TOXIQUES AYANT D'AUTRES EFFETS E : MATIÈRES CORROSIVES														
NOM DU FABRICANT ET DU FOURNISSEUR:															
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">GRAYMONT (NB) INC.</td> <td style="width: 50%;">4634, Route 880, Havelock, New Brunswick, E4Z 5K8.</td> </tr> <tr> <td>GRAYMONT (PA) INC.</td> <td>164, Match Factory Place, Bellefonte, Pennsylvania, 16823</td> </tr> <tr> <td>GRAYMONT (QC) INC.</td> <td>25 – 206, rue De Lauzon, Boucherville, Québec, J4B 1E7.</td> </tr> <tr> <td>GRAYMONT (WESTERN CANADA) INC.</td> <td>#200 – 4311, 12th Street N.E., Calgary, Alberta, T2E 4P9</td> </tr> <tr> <td>GRAYMONT WESTERN LIME INC.</td> <td>206 N. 6th Avenue, West Bend, Wisconsin, 53095</td> </tr> <tr> <td>GRAYMONT (WESTERN US) INC.</td> <td>3950 South, 700 East, Suite 301, Salt Lake City, Utah, 84107</td> </tr> <tr> <td>GRAYMONT (WI) INC.</td> <td>Foot of Hill Avenue, Superior, Wisconsin, 54880</td> </tr> </table>		GRAYMONT (NB) INC.	4634, Route 880, Havelock, New Brunswick, E4Z 5K8.	GRAYMONT (PA) INC.	164, Match Factory Place, Bellefonte, Pennsylvania, 16823	GRAYMONT (QC) INC.	25 – 206, rue De Lauzon, Boucherville, Québec, J4B 1E7.	GRAYMONT (WESTERN CANADA) INC.	#200 – 4311, 12 th Street N.E., Calgary, Alberta, T2E 4P9	GRAYMONT WESTERN LIME INC.	206 N. 6 th Avenue, West Bend, Wisconsin, 53095	GRAYMONT (WESTERN US) INC.	3950 South, 700 East, Suite 301, Salt Lake City, Utah, 84107	GRAYMONT (WI) INC.	Foot of Hill Avenue, Superior, Wisconsin, 54880
GRAYMONT (NB) INC.	4634, Route 880, Havelock, New Brunswick, E4Z 5K8.														
GRAYMONT (PA) INC.	164, Match Factory Place, Bellefonte, Pennsylvania, 16823														
GRAYMONT (QC) INC.	25 – 206, rue De Lauzon, Boucherville, Québec, J4B 1E7.														
GRAYMONT (WESTERN CANADA) INC.	#200 – 4311, 12 th Street N.E., Calgary, Alberta, T2E 4P9														
GRAYMONT WESTERN LIME INC.	206 N. 6 th Avenue, West Bend, Wisconsin, 53095														
GRAYMONT (WESTERN US) INC.	3950 South, 700 East, Suite 301, Salt Lake City, Utah, 84107														
GRAYMONT (WI) INC.	Foot of Hill Avenue, Superior, Wisconsin, 54880														
TÉL. D'URGENCE : (613) 996 – 6666 CANUTEC (Canada) (800) 424 – 9300 CHEMTREC (US)															

Dénomination chimique Hydroxyde de calcium	Famille chimique Hydroxyde alcalino terreux	Formule chimique Mélange complexe, principalement Ca(OH) ₂
Poids moléculaire Ca(OH) ₂ = 74.096	Appellation commerciale et synonymes Hydroxyde de calcium, chaux hydratée, chaux éteinte, lait, coulis ou pâte de chaux.	Utilisation de la matière Neutralisation, floculation, stabilisation, absorption

SECTION II - COMPOSITION ET INFORMATIONS SUR LES INGRÉDIENTS

Ingrédients dangereux	Concentration approximative	Numéro C.A.S.	Valeurs d'exposition admissibles (mg/m ³)					
			OSHA PFI	ACGIH TLV	RSST VFMP	MSHA PFI	NIOSH RFI	NIOSH IDI H
(Mélange complexe)	(% en poids)		(TWA) 8/40h	(TWA) 8/40h	(MPT) 8/40h	(TWA) 8/40h	(TWA) 10/40h	
Hydroxyde de Calcium	92 à 100	1305 62 0	15 (T) 5 (R)	5	5	5	5	N/D
Silice Cristalline, Quartz	0 à 0.1 ou 0.1 à 1 (Note1)	14808-60-7	30/(%SiO ₂)+2 (T) 10/(%SiO ₂)+2 (R)	0.025 (R)	0.1 (R)	30/(%SiO ₂)+2 (T) 10/(%SiO ₂)+2 (R)	0.05 (R)	50

(Note 1) : La concentration de la silice cristalline variera selon la provenance du calcaire. Elle n'a pas été détectée dans quelques échantillons (< 0.1% w/w). Par conséquent deux gammes sont publiées. (Note 2) : ACGIH TLV Version 1973 a été adopté par le "Mine Safety Health Administration (MSHA)" comme norme d'exposition réglementaire.
 (Note 3) : (T) Poussières totales; (R) Poussières respirables.

Figure-A I-1 Fiche signalétique de la chaux hydratée Graymont (page 1)

Nom du produit : CHAUX CALCIQUE ÉTEINTE				Page 2 sur 8	
SECTION III - PROPRIÉTÉS PHYSIQUES & CHIMIQUES					
État physique Gaz ☐ Liquide ☐ Solide ☒	Odeur et apparence Légère odeur terreuse. Fine poudre blanche		Seuil de l'odeur (p.p.m.) Sans objet	Densité (H ₂ O = 1) 2.3 – 2.4	
Tension de vapeur (mm Hg) Sans objet	Densité de la vapeur (Air = 1) Sans objet	Taux d'évaporation Sans objet	Point d'ébullition (°C) Sans objet	Point de fusion (°C) Sans objet	
Solubilité dans l'eau (20°C) 0.165g/100g solution.	Volatilité (% par volume) Sans objet	pH (25 °C) Sol. Sat. Ca(OH) ₂ 12.45	Masse volumique (kg/m ³) 320 - 690	Coefficient de répartition eau/huile Sans objet	
SECTION IV - RISQUES D'INCENDIE OU D'EXPLOSION					
Inflammabilité Oui ☐ Non ☒ Si oui, dans quelles conditions?					
Moyens d'extinction La chaux éteinte ne brûle pas. Utiliser tout moyen d'extinction convenant aux matières environnantes.					
Remarques spéciales Sans objet					
Point d'éclair (°C) et méthode de détermination Sans objet	Seuil maximal d'inflammabilité (% par volume) Sans objet		Seuil minimal d'inflammabilité (% par volume) Sans objet		
Température d'auto-ignition (°C) Sans objet	Classe d'inflammabilité THD Ininflammable		Produits susceptibles de s'enflammer Aucun		
Produits de combustion dangereux Aucun					
DONNÉES SUR L'EXPLOSIVITÉ					
Sensibilité aux chocs Sans objet	Taux de combustion Sans objet	Puissance de l'explosion Sans objet	Sensibilité aux décharges électrostatiques Sans objet		

Figure-A I-2 Fiche signalétique de la chaux hydratée Graymont (page 2)

Nom du produit : CHAUX CALCIQUE ÉTEINTE		Page 3 sur 8
SECTION V - DONNÉES SUR LA RÉACTIVITÉ		
Stabilité chimique		
Oui ☒ Non ☐	Si non, dans quelles conditions?	Absorbe le bioxyde de carbone de l'air pour former du carbonate de calcium.
Incompatibilité avec d'autres substances		
Oui ☒ Non ☐	Si oui, lesquelles?	Trifluorure de bore ou de chlore, éthanol, fluor, fluorure d'hydrogène, pentoxyde de phosphore; anhydride maléique et acides (réaction violente avec production de chaleur et explosion possible en espace confiné).
Réactivité		
Oui ☒ Non ☐	Si oui, dans quelles conditions?	Réagit violemment avec l'anhydride maléique, les acides forts. Réagit chimiquement avec des acides et beaucoup d'autres composés et éléments chimiques pour former des composés à base de calcium. Explosif lorsque mélangé avec des composés organiques nitrosés.
Produits de décomposition dangereux		La décomposition thermique à 540°C produira de l'oxyde de calcium et de l'eau.
Produits de polymérisation dangereux		Aucun
SECTION VI - PROPRIÉTÉS TOXICOLOGIQUES		
VOIES D'ADMINISTRATION		
☒ Contact dermique ☐ Absorption par la peau ☒ Contact oculaire ☒ Inhalation aiguë ☐ Inhalation chronique ☒ Ingestion		
Effets d'une exposition aiguë		
Cutané	Irritation de la peau et des muqueuses. Enlèvement des huiles naturelles de la peau.	
Oculaire	Irritation des yeux, larmoiement intense, lésions possibles, cécité possible lors d'une exposition prolongée. Données sur l'irritation oculaire : Yeux – Lapin – 10 mg / 24 h – Sévère.	
Inhalation	Si inhalé sous forme de poussière; irritation des voies respiratoires, toux, éternuements.	
Ingestion	Si ingéré: douleurs, vomissements de sang, diarrhée, collapsus, chute de pression sanguine (indice d'une perforation de l'œsophage ou de l'estomac).	
Effets d'une exposition chronique:		
Dermite de contact. Ce produit peut contenir des traces de silice cristalline. L'inhalation excessive de poussière respirable de silice cristalline peut occasionner une maladie respiratoire, y compris la silicose, la pneumoconiose et la fibrose pulmonaire.		
Produit DL ₅₀ (préciser l'espèce et voie d'administration)	Irritation	Limites d'exposition
7340 mg/kg (Rat, Orale)	Sévère pour les tissus humides	Non disponible
7300 mg/kg (Souris, Orale)		
Produit CL ₅₀ (préciser l'espèce)	Sensibilité	Matières synergiques
Non disponible	Aucune	Aucune rapportée

Figure-A I-3 Fiche signalétique de la chaux hydratée Graymont (page 3)

SECTION VI - PROPRIÉTÉS TOXICOLOGIQUES (suite)

☒ Cancérogénicité ☐ Effets nocifs sur la reproduction ☐ Tératogénicité ☐ Mutagénicité

La chaux éteinte n'est pas sur la liste des substances carcinogènes de ACGIH, MSHA, OSHA, NTP, DFG, RSST ou IARC. Toutefois, ce produit peut contenir des traces de silice cristalline et celle-ci apparaît sur la liste des substances carcinogènes de ces organismes.

La silice cristalline qui, inhalée sous forme de quartz ou de cristobalite, est classée par l'IARC dans le groupe 1, substances carcinogènes pour l'homme.

La Silice cristalline (particules en suspension dans l'air de grosseur respirable) est réglementée sous California's Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act of 1986. (Proposition 65). La silice cristalline est reconnue cancérogène par l'état.

NIOSH considère que la silice cristalline est potentiellement carcinogène tel que définit par la politique de OSHA sur les substances carcinogènes [29 CFR 1990]. (Ca)

La silice cristalline respirable est reconnue cancérogène humain (K) par le NTP basé sur l'évidence suffisante de la cancérogénicité chez l'homme.

La silice cristalline (quartz) est classifiée par l'ACGIH comme étant un carcinogène humain suspecté (A2).

DFG considère la silice cristalline (fraction respirable) comme une substance qui cause le cancer chez l'homme (1).

Selon l'évaluation du RSST, la Silice cristalline a un effet cancérogène soupçonné chez l'humain.

SECTION VII - MESURES PRÉVENTIVES

Equipement de protection individuelle (EPP)	Porter des gants propres et secs, un pantalon long couvrant les bottes, une chemise à manches longues et à col boutonné, une protection pour la tête et des lunettes de protection.
Gants (préciser)	à crêpés (manchettes de cuir)
Appareil respiratoire (préciser)	Appareil de protection respiratoire recommandé pour l'Hydroxyde de Calcium : Information non disponible. Appareil de protection respiratoire recommandé pour l'Oxyde de Calcium : Appareil de protection respiratoire approuvé NIOSH. Jusqu'à 10 mg/m³: (FPC = 5) Tout appareil de protection respiratoire à particules. Jusqu'à 20 mg/m³: (FPC = 10) Tout appareil de protection respiratoire à particules muni d'un filtre N95, R95 ou P95, excepté ceux à quart de masque et à usage unique. Tout appareil de protection respiratoire à approvisionnement d'air. Jusqu'à 25 mg/m³: (FPC = 25) Tout appareil de protection respiratoire à approvisionnement d'air fonctionnant à débit continu. Tout appareil de protection respiratoire à épurateur d'air motorisé muni d'un filtre à haute efficacité contre les particules (HEPA). Tout appareil de protection respiratoire à épurateur d'air muni d'un masque complet et d'un filtre N100 sans présence d'huile, P100 ou R100 en présence d'huile. Porter un appareil de protection respiratoire approuvé NIOSH si la concentration en silice cristalline sous forme de quartz dans le milieu de travail est supérieure à la TWA 8hr (exprimée en poussières respirables) de : 0,1 mg/m³ : Tout appareil de protection respiratoire à épurateur d'air muni d'un filtre N95, R95, ou P95 (incluant les pièces faciales filtrantes N95, R95, et P95) sauf les appareils quart de masque. 0,5 mg/m³ : Tout appareil de protection respiratoire à épurateur d'air motorisé muni d'un filtre (N/R/P100) à haute efficacité contre les particules (HEPA) 5 mg/m³ : Tout appareil de protection respiratoire à approvisionnement d'air (SAR) muni d'un masque complet fonctionnant à surpression (pression positive)

Figure-A I-4 Fiche signalétique de la chaux hydratée Graymont (page 4)

Nom du produit : CHAUX CALCIQUE ÉTEINTE		Page 5 sur 8
SECTION VII - MESURES PRÉVENTIVES (suite)		
Appareil oculaire (préciser)	Lunettes de sécurité munies d'écrans latéraux approuvées ANSI, CSA ou ASTM. Des lunettes de protection à coques bien ajustées devaient être portées lorsque des niveaux excessifs de poussière sont présents. Ne jamais porter de lentilles cornéennes lorsque vous manutentionnez ce produit à moins que vous portiez des lunettes de protection à coques bien ajustées.	
Chaussures (préciser)	Résistant aux caustiques	
Vêtement (préciser)	Couvrant toute la peau. Enlever lorsqu'ils sont humides ou contaminés. Changer quotidiennement.	
Autres (préciser)	Évaluer le degré d'exposition et utiliser EPP si nécessaire. Après avoir manipulé de la chaux, les employés devraient se doucher. Si exposition quotidienne; utiliser une huile, de la vaseline, une crème siliconée, etc. pour protéger la peau exposée, particulièrement le cou, la figure et les poignets.	
Contrôle mécanique (par exemple, ventilation, processus en milieu fermé, préciser) Fermer les sources de poussière; utiliser un aérage aspirant (collecteur de poussière) aux points de manutention. Garder les niveaux sous la concentration maximale admissible.		
Mesures à prendre en cas de fuite ou de déversement. Limitier l'accès au personnel formé. Utiliser des aspirateurs industriels en cas de renversements importants. Aérer la zone.		
Élimination des résidus Transporter à un dépotoir ou enfouir. Étudier les règlements fédéraux, provinciaux et locaux relatifs à l'environnement.		
Méthodes et équipement pour la manutention Éviter tout contact avec la peau et les yeux. Minimiser la production de poussière. Porter des lunettes de protection et en cas de ventilation insuffisante, un appareil de protection respiratoire approuvé NIOSH. Il doit y avoir des douches de secours et des douches oculaires dans les lieux où ce produit est utilisé. Ne pas porter de lentilles cornéennes lorsque vous manutentionnez ce produit.		
Exigences en matière d'entreposage Garder les contenants bien fermés dans un endroit frais, sec et bien aéré, à l'abri des acides. Garder hors de la portée des enfants.		
Renseignements spéciaux en matière d'expédition L'Hydroxyde de calcium est exclu de l'application des exigences de la Loi sur le Transport des Marchandises Dangereuses (TMD) (Canada) et du Hazardous Materials Regulations (USA).		

Figure-A I-5 Fiche signalétique de la chaux hydratée Graymont (page 5)

Nom du produit : CHAUX CALCIQUE ÉTEINTE	Page 6 sur 8
SECTION VIII - PREMIERS SOINS	
Contact cutané	
Brosser délicatement et prudemment les surfaces corporelles contaminées afin d'enlever le plus possible les traces de chaux. Utiliser une brosse, un linge ou des gants. Retirer les vêtements maculés de chaux. Rincer la partie contaminée à l'eau tiède pendant 15 à 20 minutes. Consulter un médecin si la partie contaminée est grande ou si l'irritation persiste.	
Contact oculaire	
Rincer immédiatement l'œil ou les yeux contaminé(s) à l'eau courante tiède (une solution saline est préférable) pendant au moins 15 à 20 minutes. Dans le cas d'une particule incrustée dans l'œil, ou de brûlure chimique, tel qu'évaluée par le personnel formé aux premiers soins, contacter un médecin.	
Inhalation	
Déplacer la source de poussière ou la victime à l'air frais. Obtenir immédiatement les conseils médicaux. Si la victime ne respire pas, donner la respiration artificielle.	
Ingestion	
Si la victime est consciente, lui faire boire 300 ml d'eau, du vinaigre dilué (1 partie vinaigre / 2 parties d'eau) ou du jus de fruit pour neutraliser la matière alcaline. Ne pas faire vomir. Contacter immédiatement un médecin.	
Recommandations générales	
Consulter un médecin pour toute exposition, sauf en cas d'inhalation mineure.	

Figure-A I-6 Fiche signalétique de la chaux hydratée Graymont (page 6)

Nom du produit : CHAUX CALCIQUE ÉTEINTE	Page 7 sur 8
SECTION IX - INFORMATION RÉGLEMENTAIRE	
Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986 (SARA Title III). / The Emergency Planning and "Community Right-to-Know" Act (EPCRA). / Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act (CERCLA). / Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). Les listes réglementaires suivantes ont été consultées pour la composante « Hydroxyde de Calcium » : • SARA Section 302 – Emergency Planning Notification. Extremely Hazardous Substances (EHS) List and Threshold Planning Quantity (TPQ). (40 CFR, Part 355, Section 30) : <u>Non énuméré</u> • SARA Section 304 – Emergency Release Notification. Extremely Hazardous Substances (EHS) and Reportable Quantity (RQ) List. (40 CFR, Part 355, Section 40) : <u>Non énuméré</u> • SARA Section 311/312 – Hazard Categories (40 CFR, Part 370) : Ce produit est réglementé sous CFR 1910.1200 (OSHA Hazard Communication). Une exposition aiguë est considérée comme étant nocive à la santé (Substance irritante). • SARA Section 313 – Toxics Release Inventory (TRI). Toxic Chemical List (40 CFR, Part 372). <u>Non énuméré</u>. • CERCLA – Hazardous Substance (40 CFR, Part 302): <u>Non énuméré</u> dans la Table 302.4. • RCRA – Hazardous Waste Number (40 CFR, Part 261, Subpart D): <u>Non énuméré</u>. • RCRA – Hazardous Waste Classification (40 CFR, Part 261, Subpart C): <u>Non classé</u>.	
CWA 311. - Clean Water Act List of Hazardous Substances. L'Hydroxyde de Calcium a été retiré de la liste des substances dangereuses du « Clean Water Act (CWA) ». (11/13/79) (44FR65400).	
California Proposition 65. La composante Hydroxyde de calcium n'apparaît pas sur la liste réglementaire ci-haut mentionnée. Ce produit peut contenir de petites quantités de silice cristalline. Silice cristalline (particules en suspension dans l'air de grosseur respirable) est réglementé sous California's Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act of 1986. (Proposition 65). La silice cristalline est reconnue cancérigène par l'état.	
Transport - Hazardous Materials Regulations. (USA) & Loi sur le Transport des Marchandises Dangereuses. La composante Hydroxyde de calcium n'apparaît pas sur les listes réglementaires ci-haut mentionnées.	
Toxic Substances Control Act (TSCA). Tous les composants naturels de ce produit sont automatiquement inclus dans la liste de l'inventaire de USEPA TSCA par 40 CFR 710.4 (b). Tous les autres composants sont inscrits sur la liste de l'inventaire de USEPA TSCA. L'Hydroxyde de Calcium est assujettie aux conditions de déclaration pour la mise à jour de l'inventaire.	
Loi Canadienne sur la Protection de l'Environnement 1999 (LCPA) – Liste des Substances (LIS / LES). La composante Hydroxyde de Calcium est inscrite sur la liste intérieure des substances (LIS).	
ANSI/NSF 60 - Drinking Water Treatment Additives. La chaux éteinte a été évaluée relativement aux éléments identifiés par EPA comme étant toxique et elle a été classifiée pour l'usage en contact direct avec l'eau potable. (conformément à ANSI/NSF 60 standard). Pour une liste des produits classifiés par Underwriters Laboratories Inc., veuillez consulter leur répertoire en ligne de certifications.	
FDA - U.S. Food and Drug Administration, Department of Health and Human Services. FDA a déterminé que l'hydroxyde de calcium est « généralement reconnu comme étant sans risque » « Generally Recognized As Safe » (GRAS). Voir 21CFR184.1205. (CFR Title 21 Part 184 - - Direct food substances affirmed as generally recognized as safe).	

Figure-A I-7 Fiche signalétique de la chaux hydratée Graymont (page 7)

Nom du produit : CHAUX CALCIQUE ÉTEINTE		Page 8 sur 8	
SECTION X - AUTRES RENSEIGNEMENTS			
Hazardous Materials Identification System (Etats-Unis)		National Fire Protection Association (Etats-Unis) NFPA 704 Danger pour la Santé	Risques d'incendie  Instabilité / Danger thermique Danger spécifique
Classification SIMDUT : « E » : Matières corrosives.		Classification SIMDUT : « D2A » : Matières toxiques ayant d'autres effets.	
Symbole: 		Symbole: 	
Commentaires: Les informations figurant dans cette fiche signalétique ont été obtenues de sources fiables. GRAYMONT n'accepte toutefois aucune responsabilité en cas d'erreurs ou d'omissions.			
Références: NFPA, NLA, TDG, CSST, RSST, (LSRO-FASEB), Hazardous Products Act, Environment Canada, Enviroguide, OSHA, ACGIH, IARC, NIOSH, CFR, NTP, HSDB, EPA SRS, RTECS, DFG, Chemistry and Technology of Lime and Limestone (John Wiley and Sons, Inc.), Lime and Limestone (WILEY-VCH).			
SECTION XI - RENSEIGNEMENTS SUR LA PRÉPARATION			
Préparé par : GRAYMONT (QC) INC. Assurance Qualité & Services Techniques	No. de téléphone : (450) 449-2262	Date : mai 2012	
Une version électronique de cette fiche signalétique est disponible à: www.graymont.com sous la section PRODUITS.			

Figure-A I-8 Fiche signalétique de la chaux hydratée Graymont (page 8)

 Silicium Bécancour inc. Bécancour Silicon Inc.	
SILICA FUME TEST REPORT	
Analysis by:	Bécancour Silicon Plant Lab
Sample from:	Bécancour Silicon Plant
Average Analysis:	Jan-01-2008 to Jan-31-2008
 Chemical Analysis	
Silicon Dioxide (SiO ₂)	95.9%
Sulphur oxide (SO ₃)	0.20%
Chlorine (Cl)	0.08%
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.59%
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.14%
Moisture Content	0.7%
Loss on Ignition	1.7%
pH (10% sol. at 24°C)	7.5
 Physical Analysis	
Fineness Retained on 45 µm (No. 325 Sieve)	2.0%
Autoclave Expansion	-0.0950
Tendency to entrap air	No visible foam
<i>Densité</i>	<i>2,200</i>
Our Silica Fume meets Chemical and Physical Requirements for Cementing Materials and Blended Supplementary Cementing Materials of CAN/CSA – A3001-03 (December 2005) for type SF.	
Dominic Leblanc, Eng. Manager - Quality and Research Tel: (819) 294-6000 ext. 284 Fax: (819) 294-1527 Email: dleblanc@silbec.com	

Figure-A I-9 Fiche technique de la fumée de silice (page 1)

USINE DE BÉCANCOUR, QUÉBEC	
SKW	
ANALYSE CHIMIQUE TYPIQUE DE FUMÉES DE SILICE	
Si-FeSi 75%	
	<u>Max.</u>
SiO ₂	96.5 (min. 92.5)
Fe ₂ O ₃	2.0
Al ₂ O ₃	0.5
CaO	0.80
MgO	0.90
Na ₂ O	0.40
K ₂ O	2.0
C	2.7
S	0.2
P.A.F.	3.5
CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES TYPIQUES DE FUMÉES DE SILICE	
Superficie spécifique de la surface (M ² /g.)	18 - 20
Densité relative (g/cm ³)	2.2
Densité apparente (kg/m ³)	250 - 300
Finesse (diam. moy.) (μm)	0.1 - 0.2
Pourcentage passant 45μm	95 - 100
Forme des particules	sphérique
Structure	amorphe
Norme canadienne	CAN/CSA-A23.5-M86

Figure-A I-10 Fiche technique de la fumée de silice (page 2)

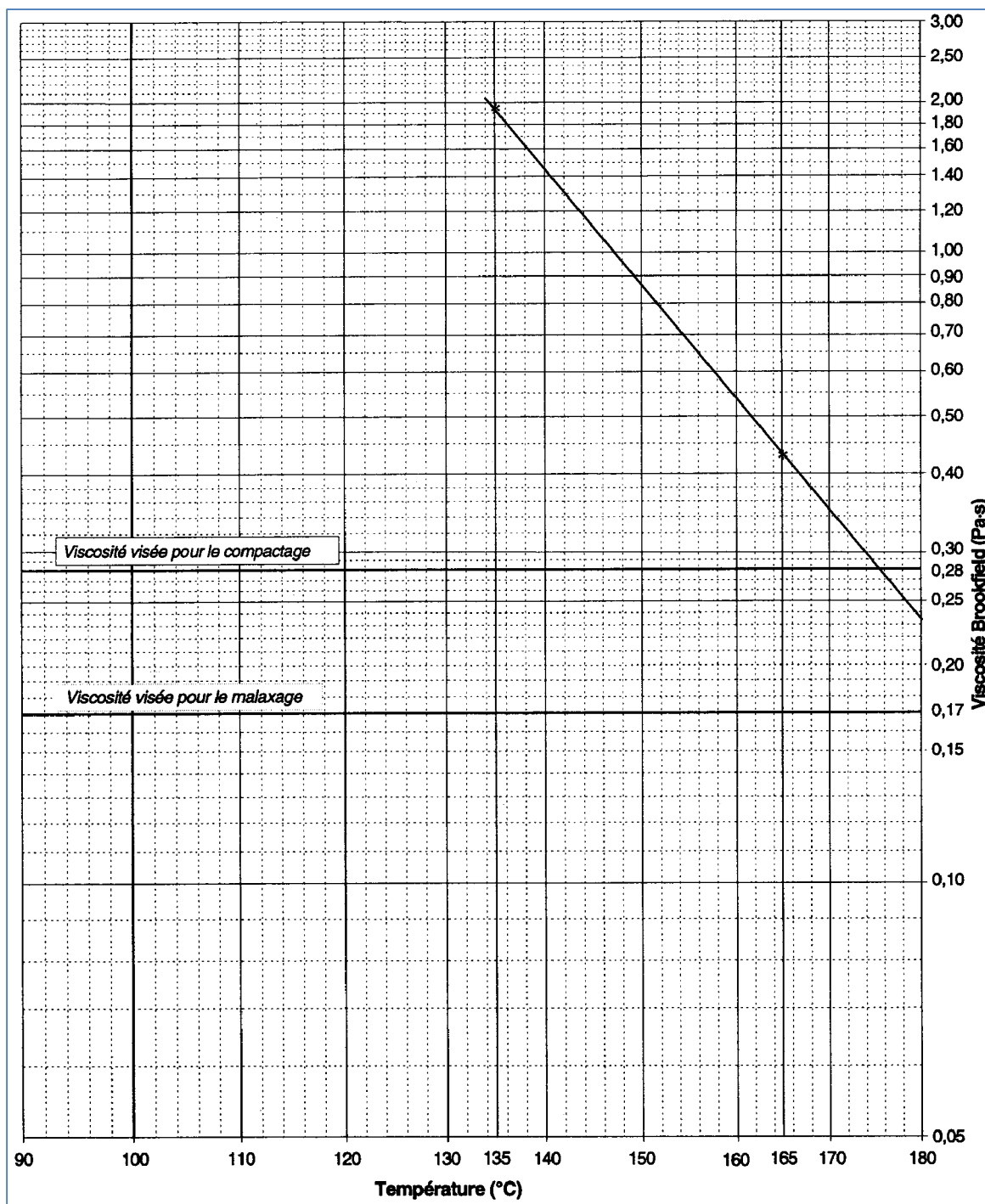


Figure-A I-11 Graphique de température VS viscosité du bitume PG 88-28 de Bitumar



BITUME PG - ATTESTATION DE CONFORMITÉ
(AASHTO M 320)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		RECOMMANDATIONS - TEMPÉRATURES D'UTILISATION	
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Bitumar Inc. 3000 Broadway, Montréal, Qué. H1B 5B4			Minimale
Fabricant et lieu de fabrication Bitumar Inc. 3000 Broadway, Montréal, Qué. H1B 5B4		Entreposage	180
Classe de bitume PG 88-28	Nom commercial PG 88-28	Malaxage	180
N° de lot 128828-01	Date de Fabrication 2012.10.30		
ESSAIS DE CARACTÉRISATION		NOTES	
Date des essais de caractérisation	2012.10.31	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 recommandations du fournisseur, L'entrepreneur doit respecter les documents contractuels.	
Masse volumique (g/cm³), à 25°C, AASHTO T228	1.013		
Masse volumique (g/cm³), à 15°C, AASHTO T228	1.019		
Stabilité au stockage (°C), LC 25-003	2.0		
TBA moyenne (°C)	92.0		
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	71		
Viscosité Brookfield (Pa·s), à 135°C, AASHTO T 316	1.928		
Viscosité Brookfield (Pa·s), à 165°C, AASHTO T 316	0.424		
Teneur en cendres (%)	0.144		
Variation de masse au RTFOT (%)	-0.27		
Température élevée de caractérisation Te(°C)	90.7		
Température basse de caractérisation Tb(°C)	-29.2		
Module de rigidité So (60) (MPa)	103.5		
Pente de m ₀ (60)	0.399		
ESSAIS DE CONTRÔLE			
Date des essais de contrôle	2012.10.31		
G*/Sind, bitume d'origine à 88°C, (kPa)	1.19		
Température élevée de caractérisation Te(°C)	90.7		
Module de rigidité Sc (60) (MPa)	103.5		
Pente de mc (60)	0.399		
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	71		
REMARQUES			
Étant donné la nature expérimentale de ce produit, les plages des températures d'entreposage et de malaxage ont été élargies			
Signé par: Hua Qin Liu			

FPSQ-10.11-R2

Figure-A I-12 Fiche technique du bitume PG 88-28 de Bitumar

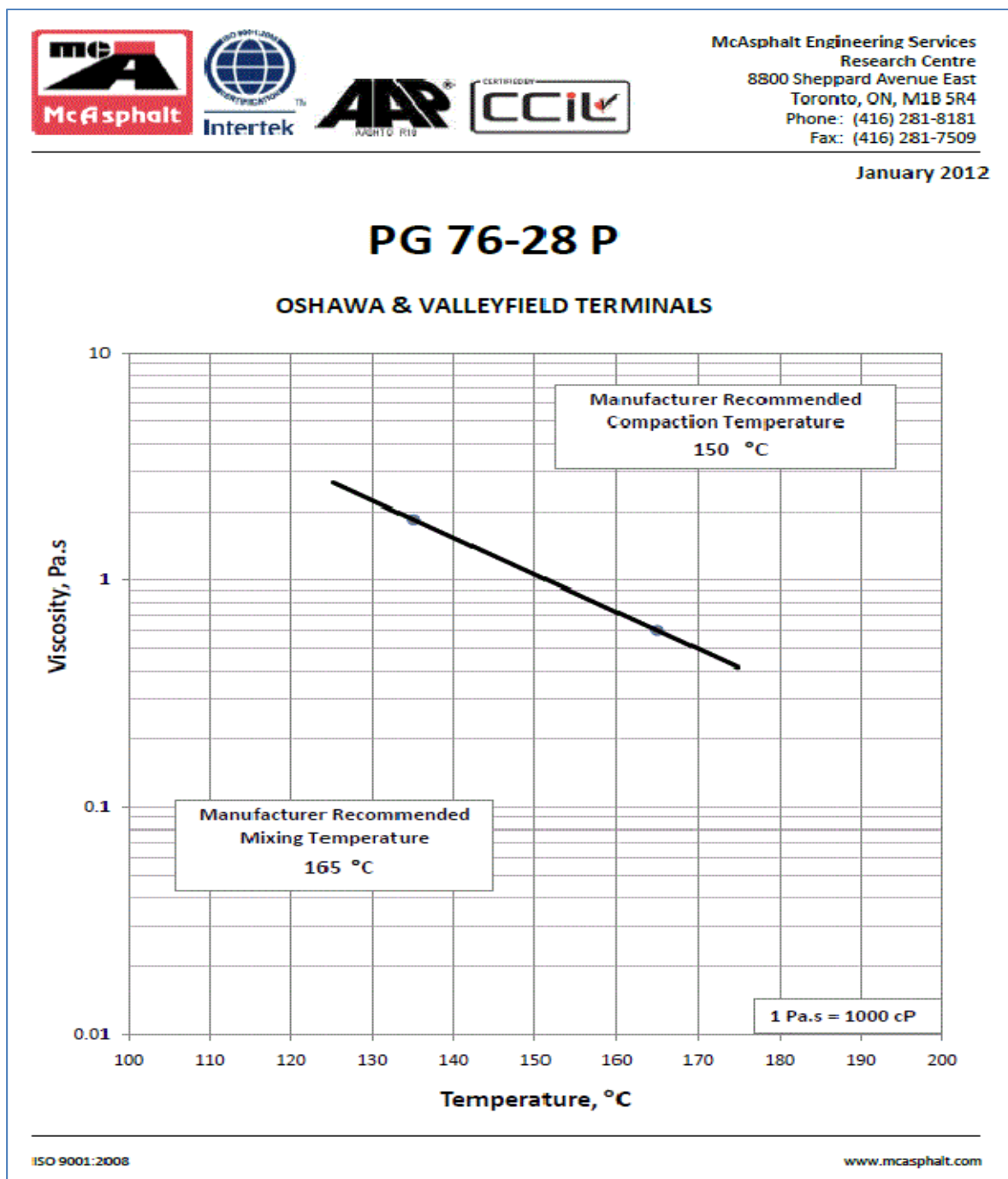


Figure-A I-13 Graphique de température VS viscosité du bitume PG 76-28 de McAsphalt

  		Les Industries McAsphalt Ltée Usine de Valleyfield 950, boul. Cadieux Valleyfield (Québec), J6T 6J4 Téléphone : (450) 377-8420 Télécopieur : (450) 377-8411			
TO: ATTENTION: FAX:		Batch No. / ID. No.: LOT112245 Batch Date: July 31, 2013 Test Date: July 31, 2013 Reporting Date: Aug. 1, 2013			
GRADE :		PG76-28			
Specified Tests and Binder Characteristics	Test Temperature °C	Unit of Measurement	Results for Sample	Spec.	Status
ORIGINAL AC					
AASHTO T 316					
Rotational Viscosity	135	Pa.s	2.105	Max - 3 Pa.s	Pass
AASHTO T 315, Dynamic Shear Rheometer					
G* / Sin(δ)	76	kPa	1.442	Min - 1.00 kPa	Pass
RTFO RESIDUE (AASHTO T 240)					
Mass Change	163	%	-0.038	Max - 1 %	Pass
AASHTO T 315, Dynamic Shear Rheometer					
G* / Sin(δ)	76	kPa	2.219	Min - 2.2 kPa	Pass
PAV RESIDUE (AASHTO R 18)					
	100				
AASHTO T 315, Dynamic Shear Rheometer					
(G*) · Sin(δ)	28	kPa	856.4	Max - 5000 kPa	Pass
AASHTO T 313, Bending Beam Rheometer					
Creep Stiffness	-18	MPa	189.5	Max - 300 MPa	Pass
Slope, m-value		-	0.335	Min - 0.300	Pass
Tested by: Valerie Plourde, tech. Approved by: Roxana Balba, ing.					
Additional Tests: AASHTO T 228, Specific Gravity at 25°C : 1.021					

Figure-A I-14 Fiche technique du bitume PG 76-28P de McAsphalt

ANNEXE II

PROCÉDURE D'INTÉGRATION DES GRANULES CONTENANT DU STYRÈNE-BUTADIÈNE-STYRÈNE (SBS) DANS L'ENROBÉ BITUMINEUX

Tel que recommandé par le fournisseur des granules de SBS (RWelast®E), ces dernières ont été introduites en laboratoire (malaxeur thermo-régulé) à l'enrobé bitumineux en suivant la procédure suivante :

1. Introduire les granulats et le filler chauds dans le malaxeur
 - a. Température du malaxeur à 160°C
 - b. Malaxage pendant 60 secondes
2. Introduire les granules de SBS (RWelast®E) froids
 - a. Température du malaxeur à 160°C
 - b. Malaxage pendant 60 secondes
3. Introduire le bitume
 - a. Température du malaxeur à 160°C
 - b. Température du bitume selon le PG
 - c. Malaxage pendant 120 secondes

ANNEXE III

RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE

Cette annexe présente l'ensemble des résultats des essais de fatigue utilisés pour déterminer la durée de vie de l'EBHP (Chaux-H).

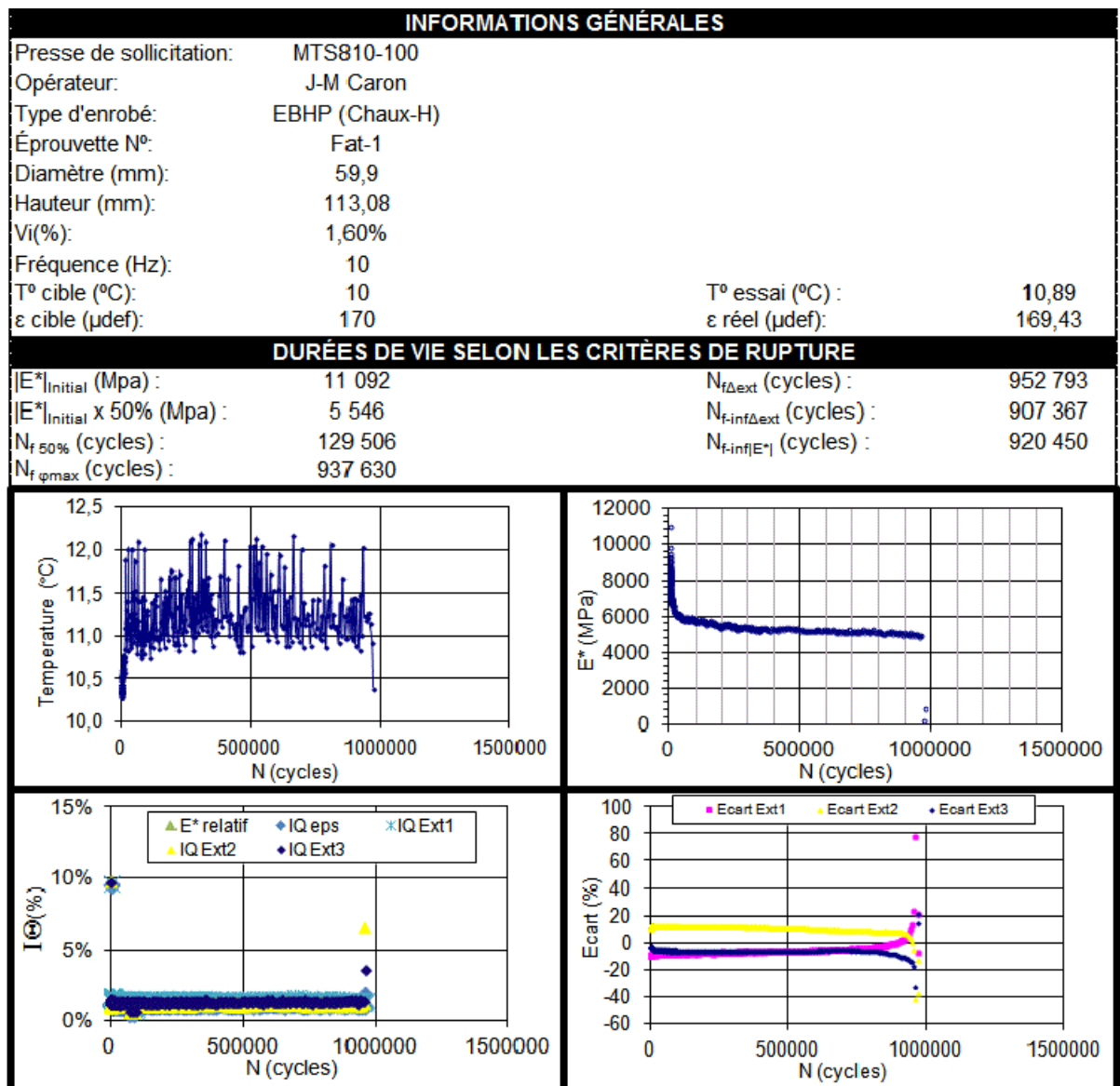


Figure-A III-1 Résultats d'essai de fatigue, éprouvette Fat-1 (page 1)

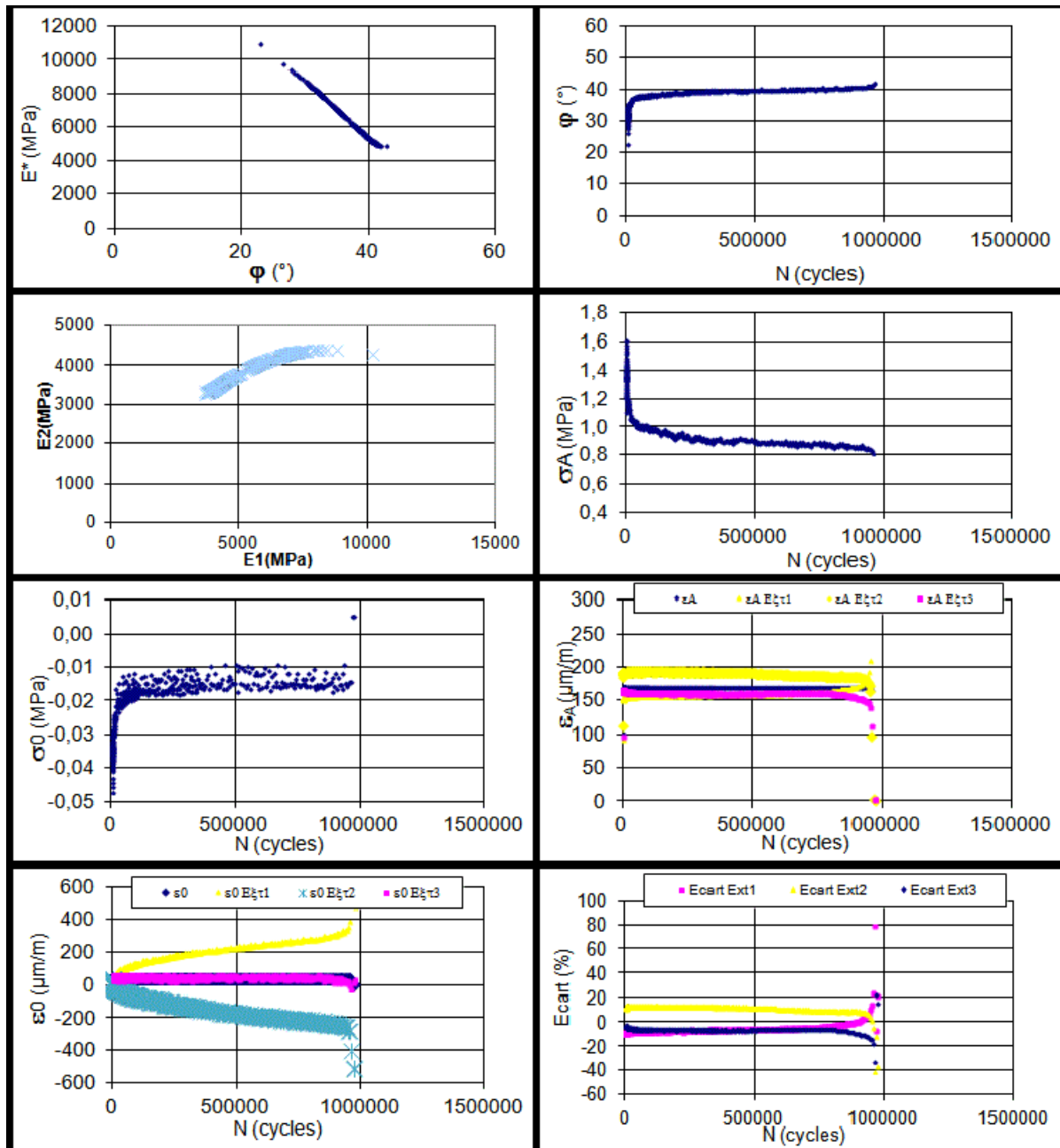


Figure-A III-2 Résultats d'essai de fatigue, éprouvette Fat-1 (page 2)

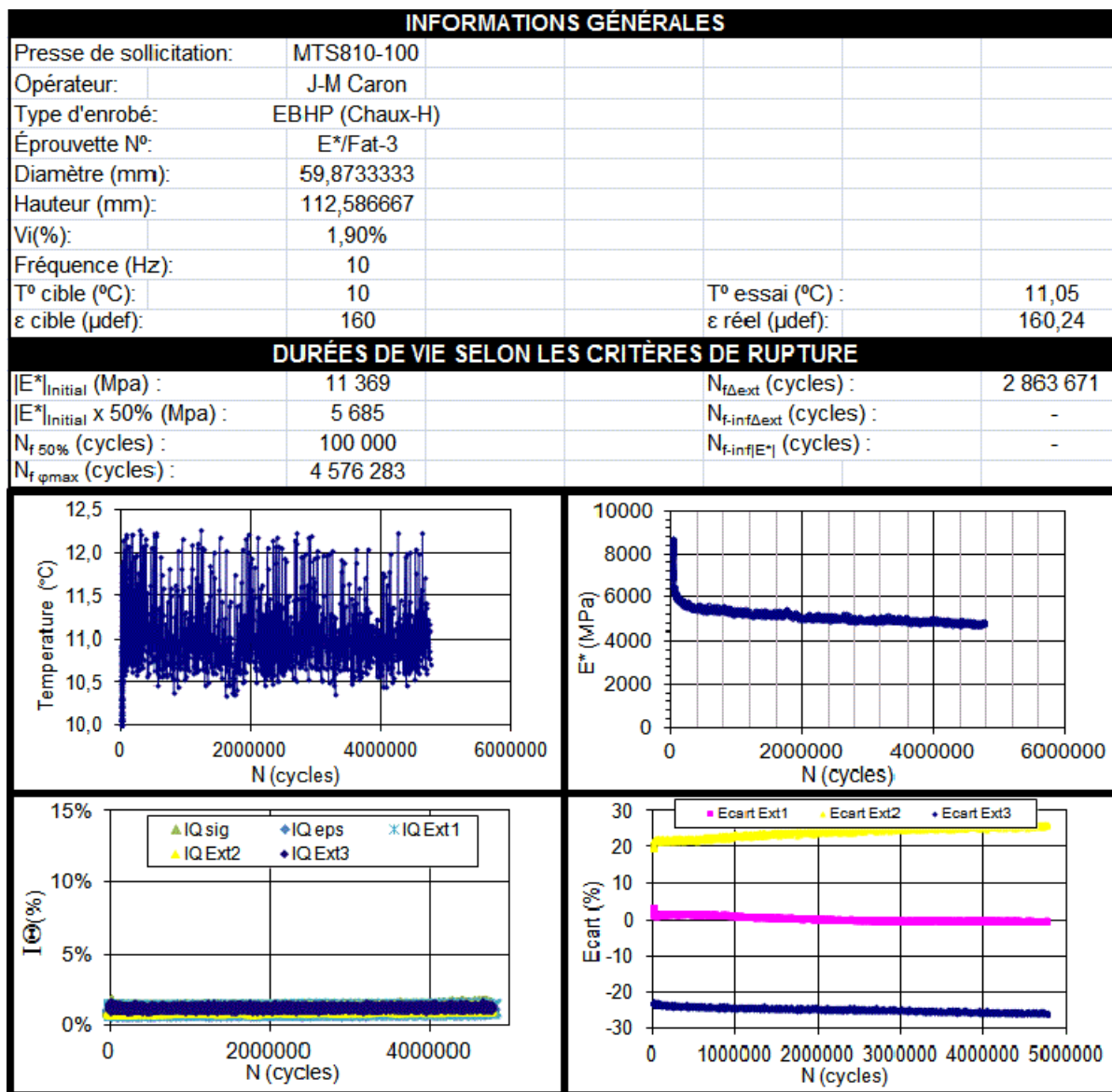


Figure-A III-3 Résultats d'essai de fatigue, éprouvette E*/Fat-3 (page 1)

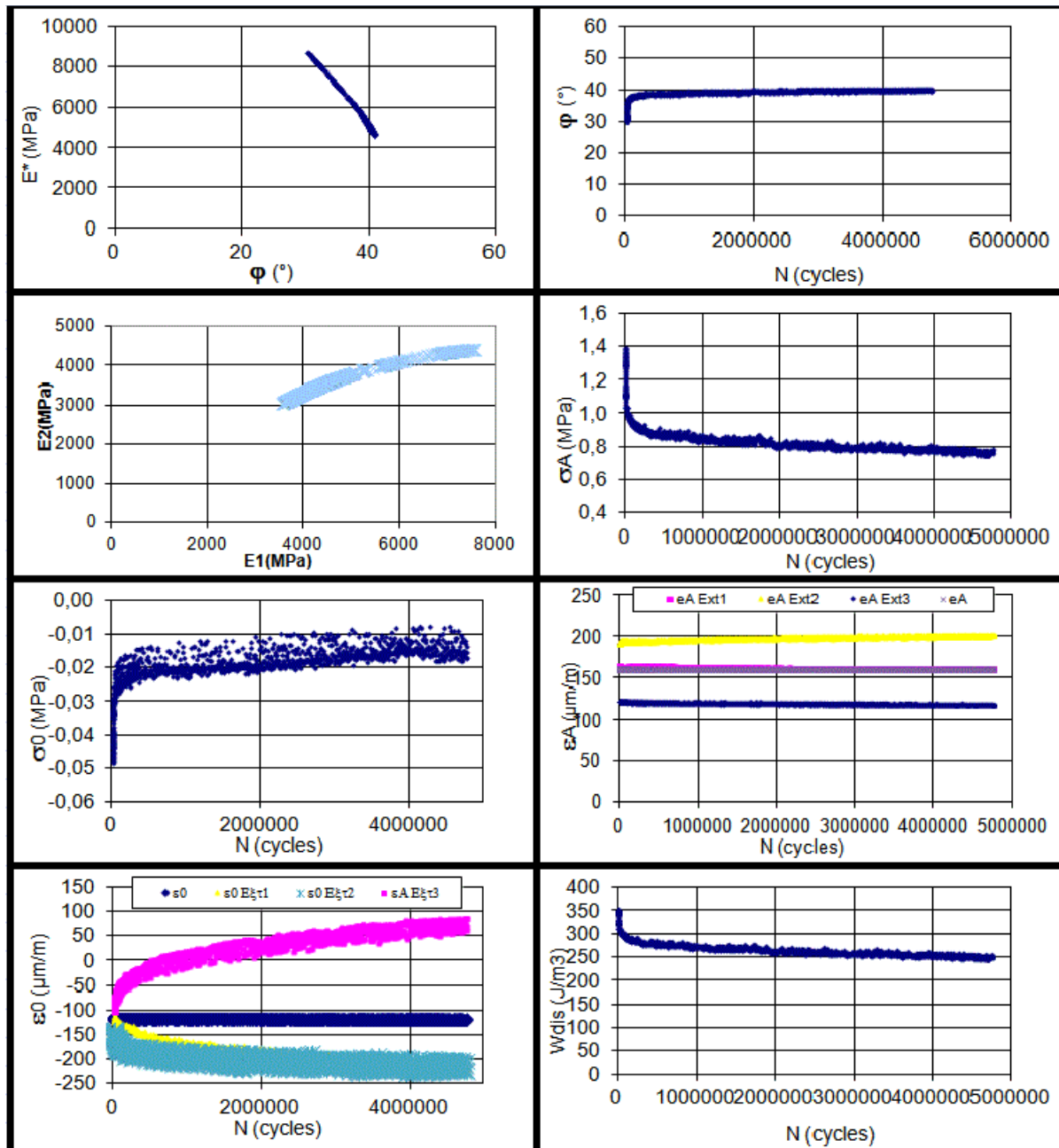


Figure-A III-4 Résultats d'essai de fatigue, éprouvette E*/Fat-3 (page 2)

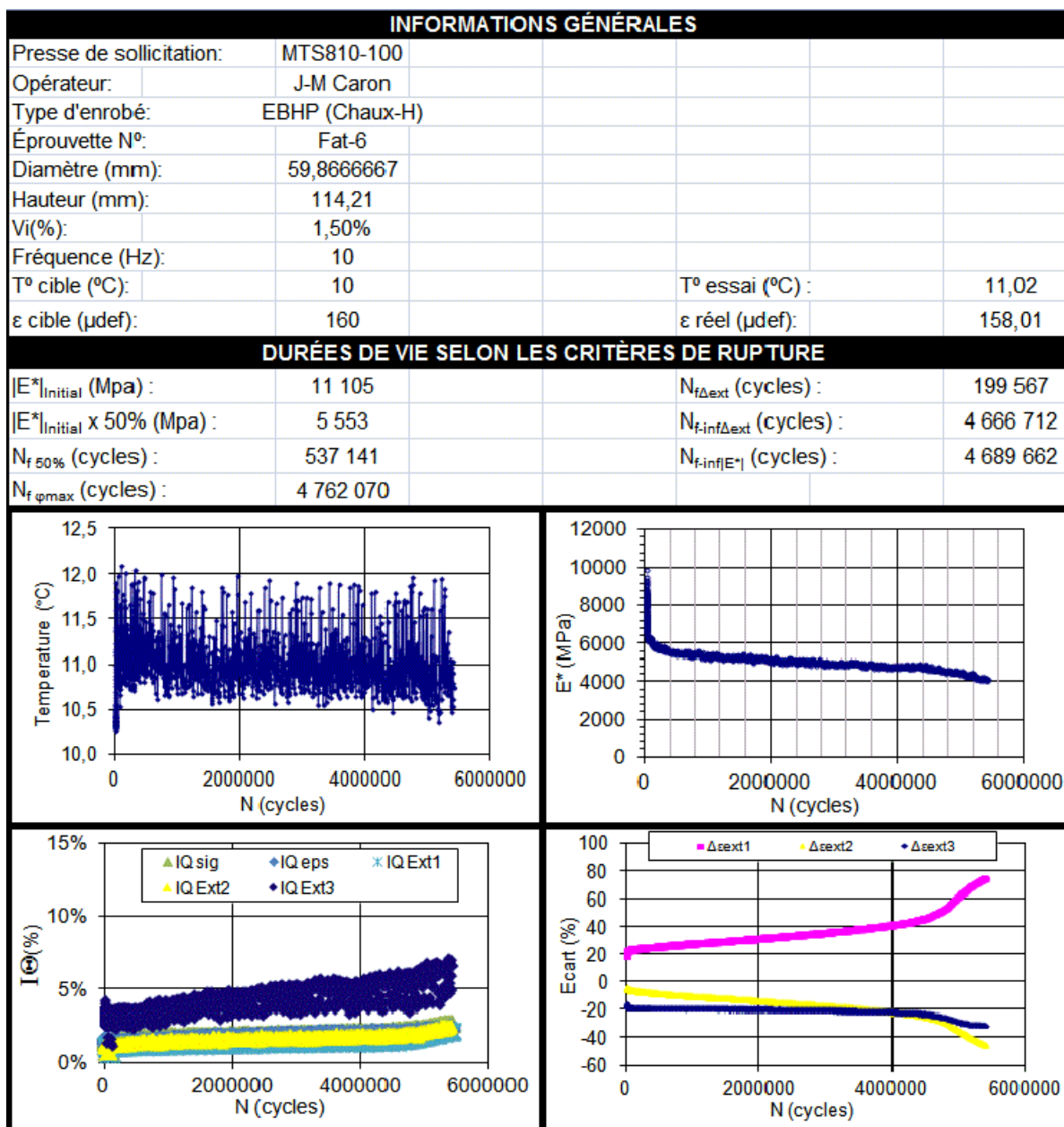


Figure-A III-5 Résultats d'essai de fatigue, éprouvette Fat-6 (page 1)

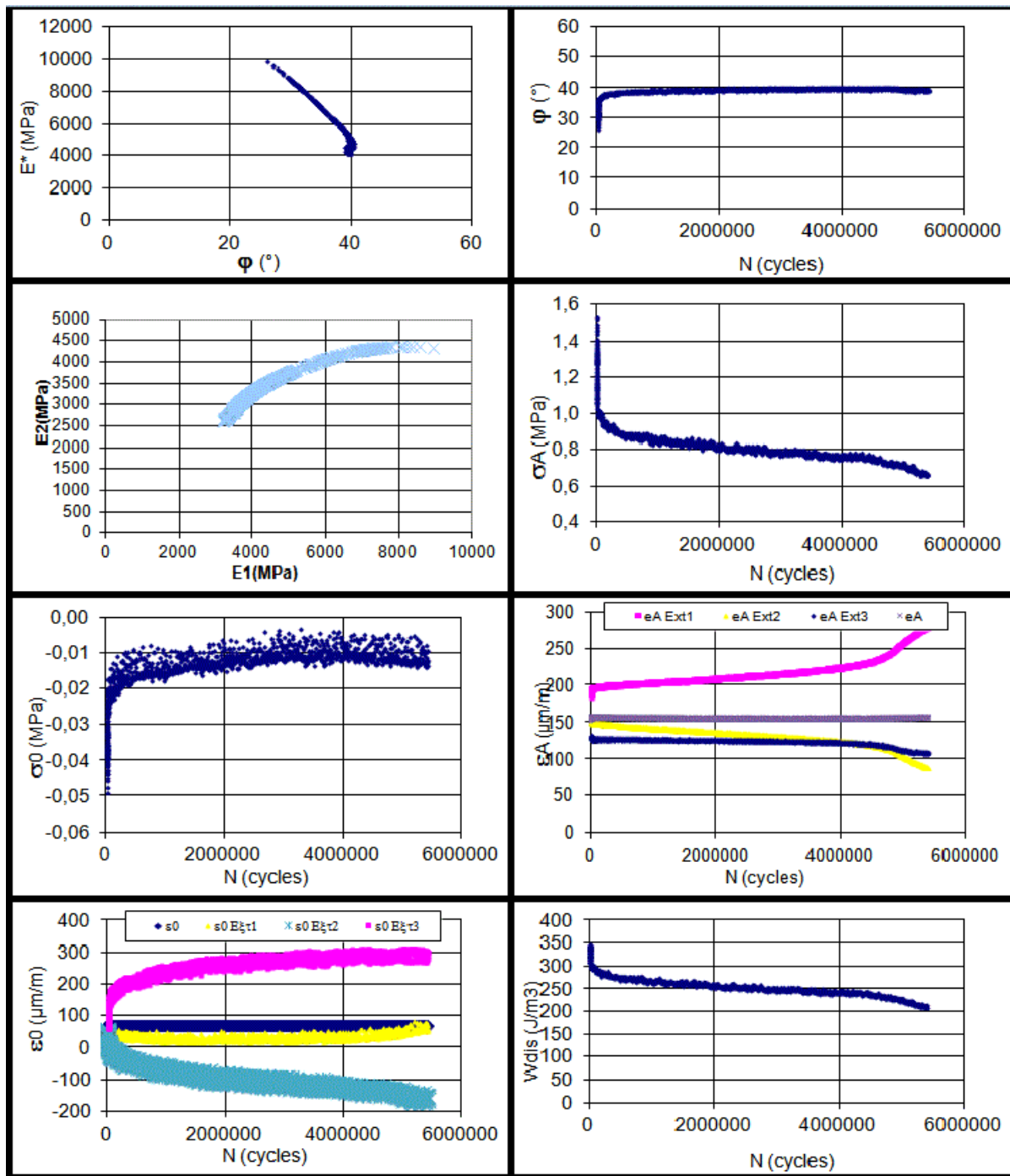


Figure-A III-6 Résultats d'essai de fatigue, éprouvette Fat-6 (page 2)

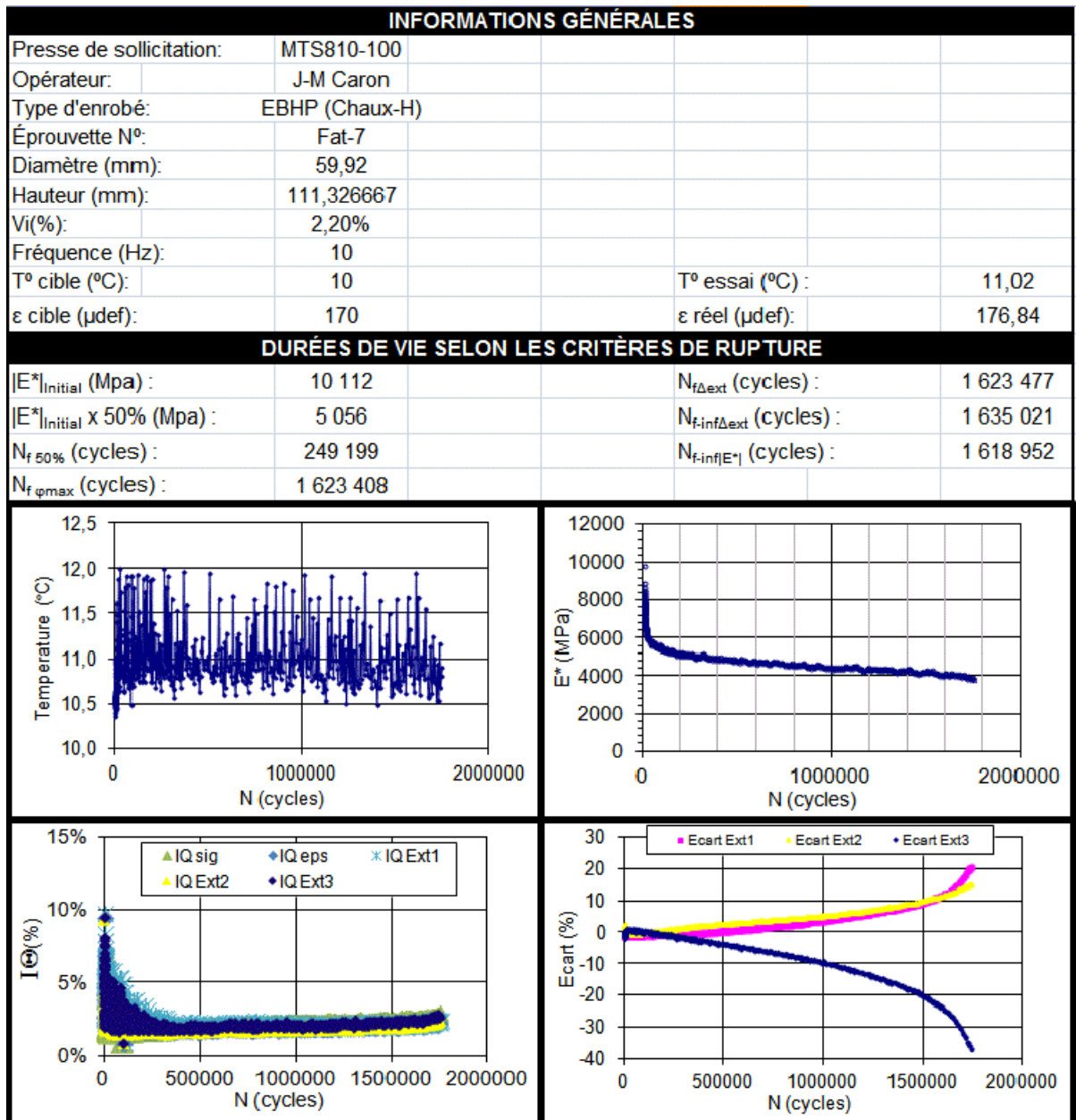


Figure-A III-7 Résultats d'essai de fatigue, éprouvette Fat-7 (page 1)

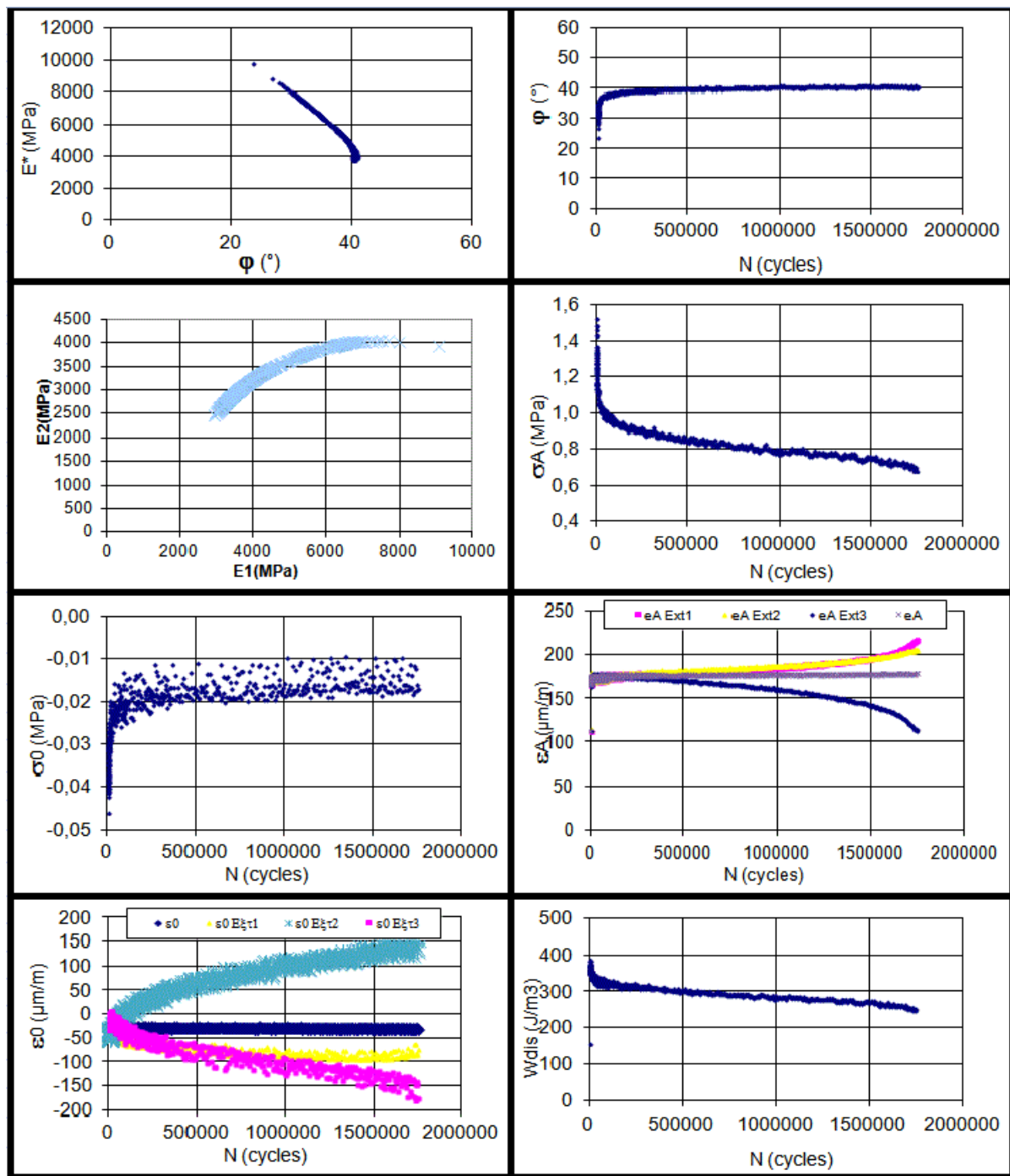


Figure-A III-8 Résultats d'essai de fatigue, éprouvette Fat-7 (page 2)

ANNEXE IV

FORMULATION D'ESG14

 Siège social : 26 rue Saulnier à Laval, H7M 1S8		PRÉSENTATION DE FORMULES DE MÉLANGE (PCG)																					
Projet : Centrale : DEMIX Construction N° d'usine : 087 Localisation : 1500 blvd St-Martin Est, Laval		N° interne : Type de mélange : ESG-14 N° de formule : FR-ESG14B5 Code de composition : Type de bit./dens. de formulation : PG 58-28 / 1.022																					
GRANULATS FROIDS																							
Calibre	Ident.	Code	Provenance			40	28	20	14	10	5.0	2.5	1.25	0.630	0.315	0.160	0.080	% Util	DGB	D.app	% abs.		
Pierre	5-14mm	P	DEMIX St-François			100	100	100	97	61	10	2	2	2	2	2	1.5	37.0	2.698	2.734	0.49		
Pierre	5-10mm	P	DEMIX St-François			100	100	100	100	100	15	4	3	3	2	2	1.5	15.0	2.702	2.760	0.78		
Abrasif	2,5-5mm	P	DEMIX St-François			100	100	100	100	100	96	8	3	2	2	2	1.4	8.2	2.696	2.739	0.57		
Criblure	Lavée	C	DEMIX St-François			100	100	100	100	100	98	67	42	27	16	8	4.1	10.3	2.686	2.725	0.55		
Criblure	0-5mm	C	DEMIX Mirabel			100	100	100	100	100	95	63	42	30	22	19	14.2	19.5	2.742	2.784	0.65		
Recyclé	0-10mm	R	DEMIX Laval			100	100	100	100	96	76	62	51	40	27	15	7.2	10.0	2.672	2.672			
Combiné granulométrique :						100	100	100	99	85	50	27	19	14	10	7	4.8	100.0	2.703	2.741	0.53		
MÉLANGE																							
Mélange :						40	28	20	14	10	5.0	2.5	1.25	0.630	0.315	0.160	0.080	TG	% bit.	Pba	% Vbe	DGE	Dens. Max
Formule :						100	100	100	99	85	50	27	19	14	10	7	5.2	416	5.03	0.42	11.4	2.733	2.521
Exigences :	Min :					100	100	100	95	70	40						3.0				11.4		
	Max :					100	100	100	100	90	60						8.0						
SST :		4.72		ESSAI À LA PCG										RECYCLÉ (VIEUX REVÊTEMENT)									
FBE :		10.11		Nombre de girations		10		100		200		% Bitume:		0.45		% de recyclé :		10.00 %		% de bitume vierge :		4.58 %	
Type de bitume :		PG 64-28		% de vide :		14.8		5.6		3.3		Présenté à :		Fonction :		Présenté par :		Représentant :		Fonction :		Date :	
Fournisseur :		PG 64-28		Exigences :		Min		11.0		4.0		2.0		Date :		Vérifié par :		Fonction :		Date :		Vérifié par :	
Densité du bitume :		1.026		ESSAI À L'ORNIÈREUR										Fonction :									
Tenue à l'eau :		82.2		Nombre de cycles :		30000		Fonction :		Date :		Vérifié par :		Fonction :		Date :		Vérifié par :		Fonction :		Date :	
Facteur de justesse (ext.):		0.20		Ornière % :		10.0		Fonction :		Date :		Vérifié par :		Fonction :		Date :		Vérifié par :		Fonction :		Date :	
Facteur de justesse (ign.):		0.00		Exigence :		10.0		Fonction :		Date :		Vérifié par :		Fonction :		Date :		Vérifié par :		Fonction :		Date :	

Figure-A IV-1 Formulation d'un ESG14 avec PG 64-28 de Demix Construction

ANNEXE V

CONSTITUANTS DES MÉLANGES D'ENROBÉ BITUMINEUX CONFECTIONNÉS EN PHASE I

EBHP (Réf)			
Constituants	Densités	Prop. Vol.	Prop. Massique
Bitume PG76-28P	1,015	9,18%	3,69%
10-14 mm	2,729	67,08%	72,52%
Sable "C"	2,511	15,18%	15,10%
Poussière "M"	2,560	8,57%	8,69%
D _{mm} expérimentale : 2,514			

EBHP (FS10)			
Constituants	Densités	Prop. Vol.	Prop. Massique
Bitume PG76-28P	1,015	9,18%	3,69%
10-14 mm	2,729	67,08%	72,61%
Sable "C"	2,511	15,18%	15,12%
Poussière "M"	2,560	7,71%	7,83%
Fumé silice	2,2	0,86%	0,75%
D _{mm} expérimentale : 2,515			

EBHP (FS20)			
Constituants	Densités	Prop. Vol.	Prop. Massique
Bitume PG76-28P	1,015	9,18%	3,70%
10-14 mm	2,729	67,08%	72,70%
Sable "C"	2,511	15,18%	15,14%
Poussière "M"	2,560	6,85%	6,97%
Fumé silice	2,2	1,71%	1,50%
D _{mm} expérimentale : 2,514			

EBHP (FS30)			
Constituants	Densités	Prop. Vol.	Prop. Massique
Bitume PG76-28P	1,015	9,18%	3,70%
10-14 mm	2,729	67,08%	72,79%
Sable "C"	2,511	15,18%	15,16%
Poussière "M"	2,560	6,00%	6,11%
Fumé silice	2,2	2,57%	2,25%
D _{mm} expérimentale : 2,506			

EBHP (Inter-Calc)			
Constituants	Densités	Prop. Vol.	Prop. Massique
Bitume PG76-28P	1,015	9,18%	3,65%
10-14 mm	2,729	67,08%	71,70%
Calcaire 0-5	2,702	15,18%	16,06%
Poussière "M"	2,560	8,57%	8,59%
D _{mm} expérimentale : 2,553			

EBHP (Fines-Calc)			
Constituants	Densités	Prop. Vol.	Prop. Massique
Bitume PG76-28P	1,015	9,18%	3,67%
10-14 mm	2,729	67,08%	72,18%
Sable "C"	2,511	15,18%	15,03%
Filler calcaire	2,700	8,57%	9,12%
D _{mm} expérimentale : 2,545			

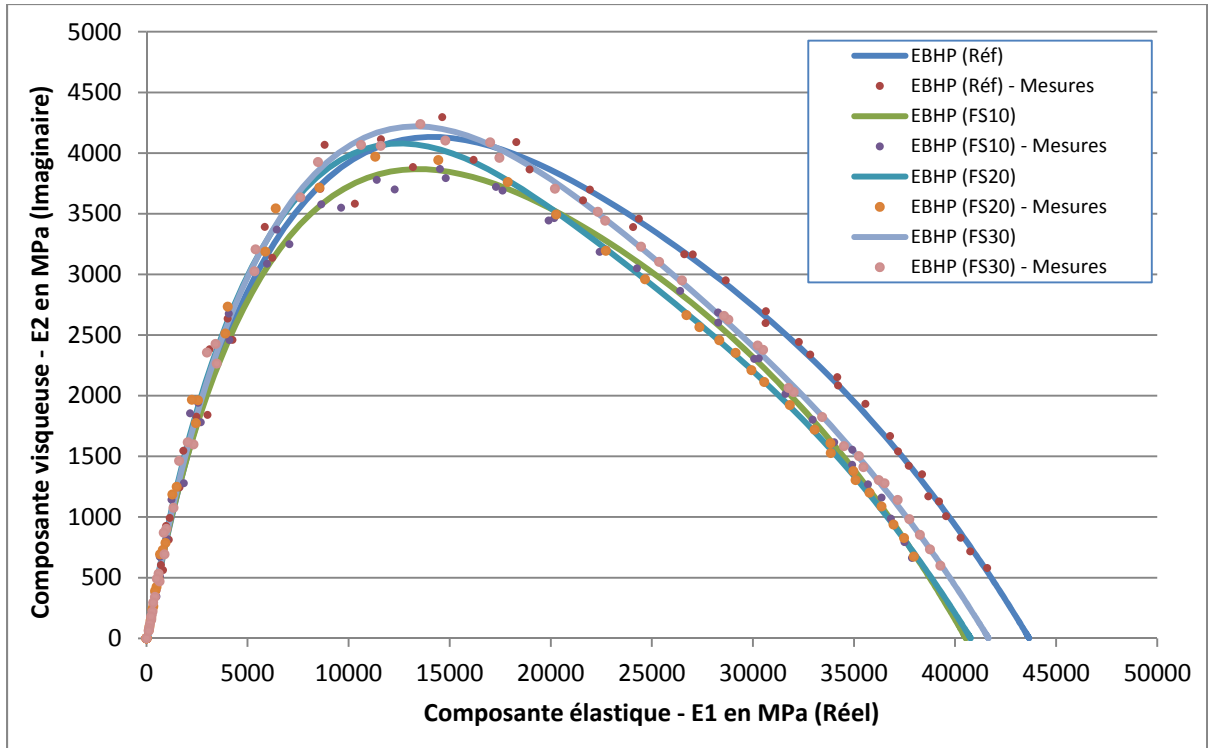
EBHP (Chaux-H)			
Constituants	Densités	Prop. Vol.	Prop. Massique
Bitume PG76-28P	1,015	9,18%	3,70%
10-14 mm	2,729	67,08%	72,64%
Sable "C"	2,511	15,18%	15,12%
Poussière "M"	2,560	7,01%	7,12%
Chaux hydraté	2,300	1,56%	1,42%
D _{mm} expérimentale : 2,514			

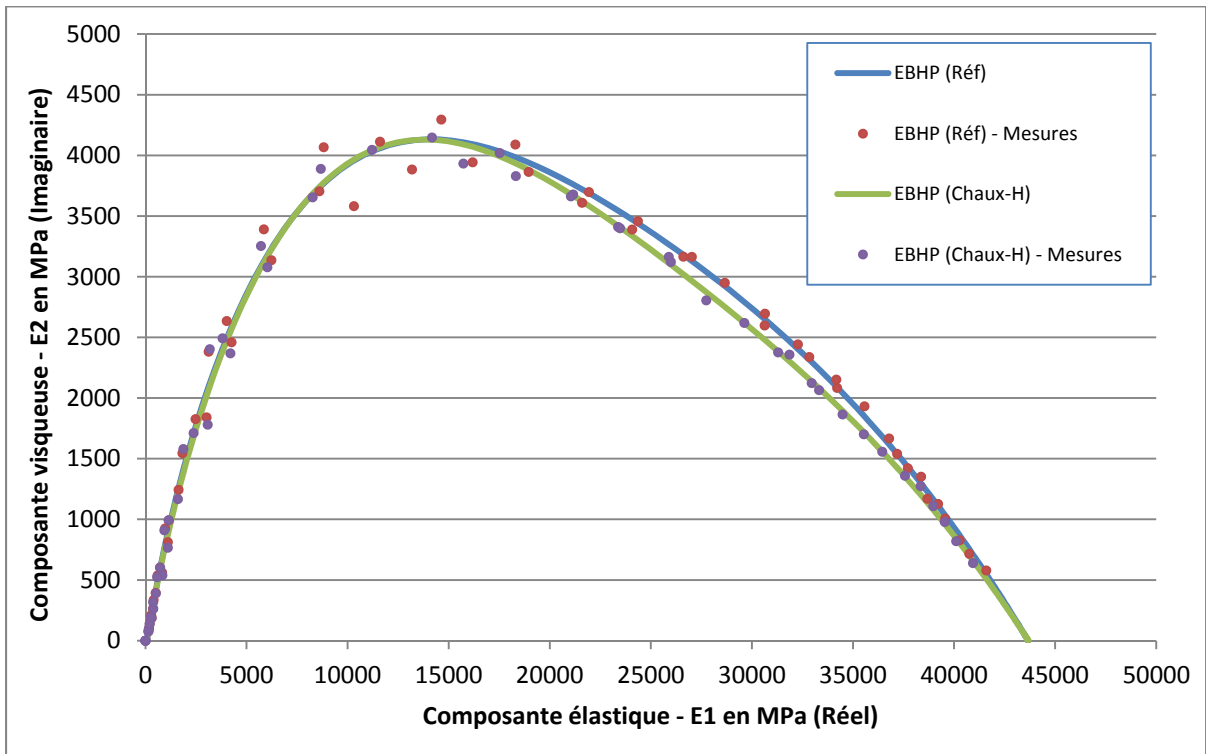
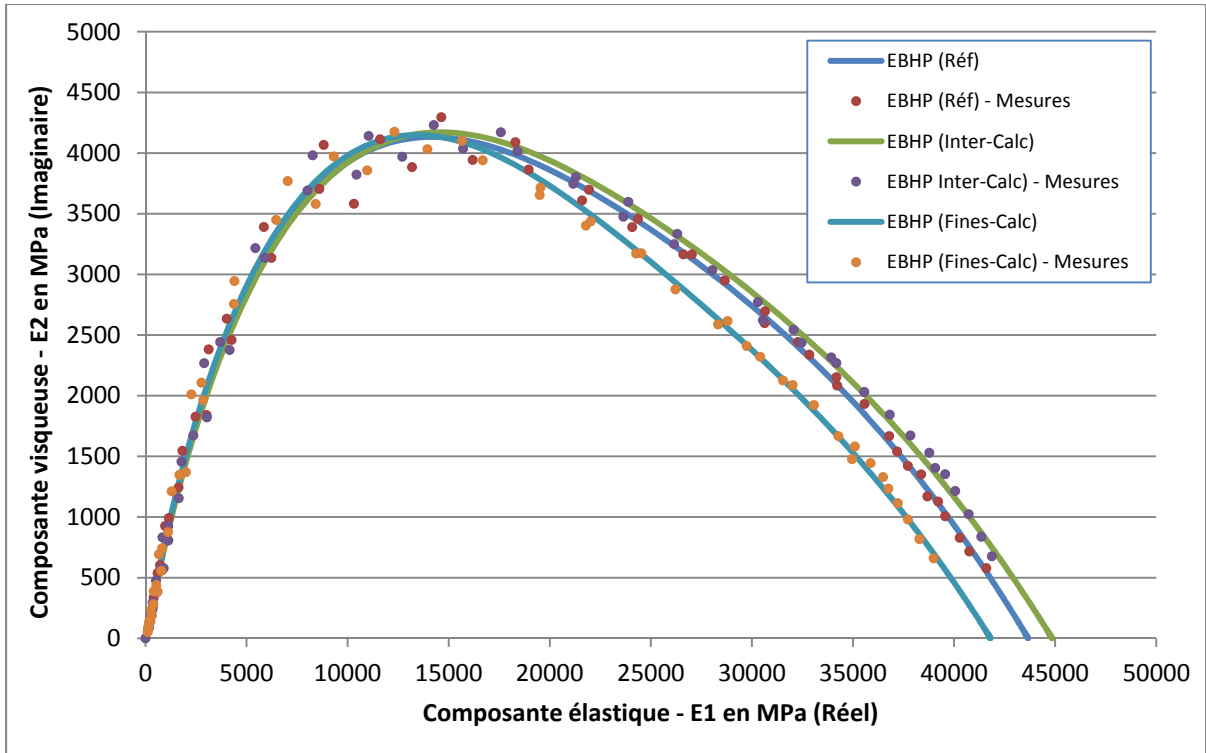
EBHP (PG88-28)			
Constituants	Densités	Prop. Vol.	Prop. Massique
Bitume PG88-28	1,015	9,18%	3,69%
10-14 mm	2,729	67,08%	72,52%
Sable "C"	2,511	15,18%	15,10%
Poussière "M"	2,560	8,57%	8,69%
D _{mm} expérimentale : 2,520			

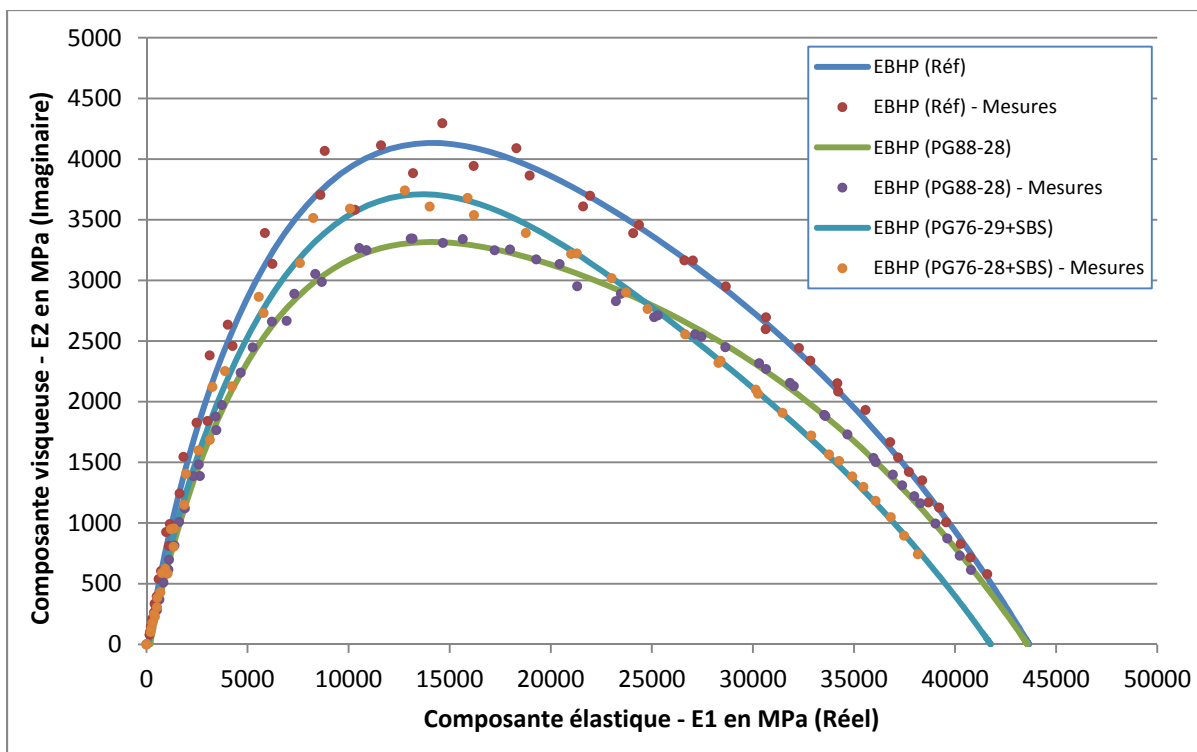
EBHP (PG76-28+SBS)			
Constituants	Densités	Prop. Vol.	Prop. Massique
Bitume PG76-28P	1,015	8,03%	3,23%
10-14 mm	2,729	67,08%	72,52%
Sable "C"	2,511	15,18%	15,10%
Poussière "M"	2,560	8,57%	8,69%
Granules contenant du SBS	1,015	1,15%	0,46%
D _{mm} expérimentale : 2,526			

ANNEXE VI

RÉSULTATS DE MODULE COMPLEXE (E^*) DANS L'ESPACE COLE-COLE DES ENROBÉS TESTÉS EN PHASE I







LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AkzoNobel. 2008. « Adhesion promoters : Technical Bulletin ». 28 p.
<http://sc.akzonobel.com/en/asphalt/Documents/AkzoNobel_Asphalt_TB_Adhesion_Promoters.pdf>.
- Baaj, Hassan. 2002. « Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés ». Lyon, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 264 p.
- Baron, Jacques, et Raymond Sauterey. 1995. *Le béton hydraulique : Connaissance et pratique*, 1ère édition. Paris (France): Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) 560 p.
- Bazin, P., et J.B. Saunier. 1967. « Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes ». In *Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. (Ann Arbor, Michigan).
- Bitume Québec. 2014. « Les enrobés à module élevé adaptés au climats froids ». *Techno-Bitume : Bulletin technique*. n° 9.
- Bitume.info. 2012. « Le retour de la chaux ». *Bitume.info*. p. 19-21.
< <http://www.bitume.info/articlespdf/347.pdf> >. Consulté le 25 août 2013.
- Caquot, A. 1937. « Le rôle des matériaux dans le béton ». Mémoires de la Société des ingénieurs civils de France, 562-582 p.
- Delaporte, Brice, Hervé Di Benedetto, Pierre Chaverot et Gilles Gauthier. 2007. « Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Materials: from Binders to Mastics ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*. (San Antonio, 11-14 march 2007) Vol. 76, p. 455-494.
- Dembicki, Mathew. 1992. « Connecticut towns have hit the road in an effort to reduce the flow of glass waste into landfills. ». *Waste Age Magazine*, p. 87-92.
- Di Benedetto, H., C. de La Roche, H. Baaj, A.C. Pronk et R. Lundström. 2004. « Fatigue of bituminous mixtures ». In *Materials and Structures*. Vol. 37, p. 202-216.
- Di Benedetto, Hervé, Jean-François Corté, Jean-Luc Delorme, Agnès Grisard, Jean-Michel Piau et Chantal De La Roche. 2005. *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Coll. « Mécanique et ingénierie des matériaux ». Paris: Lavoisier, 276 p.

- Di Benedetto, Hervé, Nguyen Hoang, Simon Pouget et Cédric Sauzéat. 2008. « Time-temperature superposition principle for bituminous mixtures : three dimensional approach and extension in the non-linear domain ». In *First International Conference on Transport Infrastructure*. (Beijing, 24-26 Avril 2008). ICTI.
- Eula. 2011. « La chaux hydratée : Un additif éprouvé pour des chaussées bitumineuses plus durables ». 4 p.
< http://www.eula.eu/sites/eula.eu/files/documents/Eula_Asphalt_FR_web.pdf >.
- Eula. 2012. « La chaux hydratée : Un additif reconnu pour des enrobés bitumineux plus durables ». 81 p.
< http://www.eula.eu/sites/eula.eu/files/documents/FR_EuLA_Asphalt_literature_review.pdf >.
- Faheem, A., et H. Bahia. 2010. « Modelling of Asphalt Mastic in Terms of Filler-Bitumen Interaction ». *Journal of road materials and pavement design*.
- Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. « User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction ». En ligne. Consulté le 17 février 2015.
- Guyone, Étienne, et Jean-Paul Troadec. 1994. *Du sac de billes au tas de sable*. Paris: Éditions Odile Jacob, 306 p.
- Kandhal, Prithvi S. 1993. « Waste materials in hot mix asphalt - an overview ». In *Proceedings of the Symposium on a Critical Look at the Use of Waste Materials in Hot-Mix Asphalt, December 8, 1992 - December 8, 1992*. (Miami, FL, USA), 1193, p. 3-16. Coll. « ASTM Special Technical Publication »: Publ by ASTM.
- Lamothe, Sébastien. 2014. « Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécanique ». Thèse de doctorat en génie de la construction. Montréal, École de technologie supérieure, 467 p.
- Lu, Hewei, Weidong Huang, Kun Li, Liping Liu et Lijun Sun. 2011. « Glasphalt mixtures' performance research and analysis ». In *3rd International Conference on Transportation Engineering, ICTE 2011, July 23, 2011 - July 25, 2011*. (Chengdu, China), p. 1427-1432. Coll. « ICTE 2011 - Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Engineering »: American Society of Civil Engineers (ASCE). < [http://dx.doi.org/10.1061/41184\(419\)236](http://dx.doi.org/10.1061/41184(419)236) >.
- Malo, Jean-Michel. 2012. « Incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux ». Montréal, École de technologie supérieure, 237 p.

- 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 ». Montréal, École de technologie supérieure, 278 p.
- Meunier, Mathieu. 2012. « Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux ». Montréal, École de technologie supérieure, 299 p.
- Meunier, Mathieu, et Daniel Perraton. 2015. « Outil de prévision de l'évolution du comportement des chaussées ». In *OPECC*. < opecc.etsmtl.ca >.
- Ministère des Transports du Québec. 2005. *Enrobés : Formulation selon la méthode LC*. Québec: Gouvernement du Québec, 111 p.
- Nguyen, Mai Lan. 2009. « Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux ». Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 314 p.
- Olard, François. 2003. « Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures : Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé ». Thèse de doctorat en génie civil. Lyon, École doctorale des sciences pour l'ingénieur de Lyon, 228 p.
- Olard, Francois, et H. 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, n° 2, p. 185-224.
- Olard, Francois, Patrick Huron, Stéphane Dupriet et Cyrille Billet. 2010. « Grave-Bitume GB5®, Entretien des routes et voiries : techniques et innovations ». *RGRA*, n° 888, p. 54-58.
- 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 chaussée souples ». *Rev. Can. Génie civ.* Vol. 38, p. 1287-1299.
- Perraton, Daniel, Mathieu Meunier et Alan Carter. 2007. « Application des méthodes d'empilement granulaire à la formulation des Stones Matrix Asphalts (SMA) ». *BLPC*, n° 270-271, p. 87-108.
- Powers, T.C. 1969. *The Properties of Fresh Concrete*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 664 p.
- Pronk, A.C. 2003. « Revival of the Huet-Sayegh response model : Notes on the Huet-Sayegh rheological model ». Netherlands.

- Robati, Masoud, Alan Carter et Daniel Perraton. 2014. « A New Conceptual Model for Filler Stiffening Effect on Asphalt Mastic of Micro-Surfacing ». *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Shaopeng, Wu, Yang Wenfeng et Xue Yongjie. 2005. « Preparation and properties of Glass-asphalt Concrete ». In. (Chine), p. 11. Wuhan University of Technology.
- Sohm, J. 2007. « Étude de propagation des ondes dans les enrobés bitumineux ». Lyon, ENTPE de Lyon.
- Touhara, Radouen. 2012. « Étude de la résistance en fatigue des matériaux bitumineux ». Montréal, École de technologie supérieure, 215 p.
- Tunnicliff, D.G. 1962. « Review of Mineral Fillers ». *Journal of Association of Asphalts Paving Technologists*. p. 118-150.