

Enrobé à module élevé pour régions froides:
de sa formulation à son intégration dans les méthodes de
dimensionnement mécaniste empirique en considérant ses
propriétés thermomécaniques et sa résistance en fatigue

par

Samuel PROTEAU GERVAIS

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

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 10 DÉCEMBRE 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

Mme Annie Levasseur, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 21 NOVEMBRE 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de mémoire M. Daniel Perraton. Son humanité, sa disponibilité, son soutien, autant technique que moral, ses encouragements et sa passion du domaine routier m'ont permis de mener à terme ce mémoire avec plus de facilité. Également, je tiens à le remercier de m'avoir offert l'opportunité unique de faire un stage à l'IFSTTAR-Nantes : une belle expérience de vie.

Je veux remercier le personnel de l'IFSTTAR-Nantes pour l'accueil, les nombreux apprentissages et le niveau technique exemplaire. Plus particulièrement, j'aimerais remercier Juliette Blanc et Mai-Lan Nguyen de m'avoir intégré à leurs projets et transmis une partie de leur savoir-faire. Pour sûr, ces connaissances me seront utiles au courant de ma carrière.

L'équipe du LCMB est également responsable du bon déroulement de ma maîtrise. Je tiens à remercier Sébastien Lamothe pour tout son temps, sa rigueur et son niveau d'implication dans le projet. J'aimerais saluer les collègues du LCMB, Charles Neyret, Marion Scabello, Marc-André Bérubé et Sylvain Bibeau, sans oublier le rassembleur Francis Bilodeau. Merci pour le soutien technique et les encouragements, mais surtout pour les belles soirées et les beaux souvenirs.

Enfin, la réalisation de cette maîtrise n'aurait pas été possible sans l'implication financière, matérielle et active d'Eurovia. Je tiens à remercier Amélie Griggio, Pierre Richard et les techniciens de laboratoire du CTA pour la réalisation de nombreux essais malgré les horaires chargés. J'aimerais tout spécialement remercier Marc Proteau et Bertrand Pouteau pour leur temps, leur participation active au projet et les opportunités offertes.

**Enrobé à module élevé pour régions froides:
de sa formulation à son intégration dans les méthodes de dimensionnement mécaniste empirique en considérant ses propriétés thermomécaniques et sa résistance en fatigue**

Samuel PROTEAU GERVAIS

RÉSUMÉ

L'objectif de la recherche est de montrer la supériorité de l'enrobé à module élevé 14 mm (EME-14) par rapport aux enrobés de base standards au Québec. Cette démonstration s'appuie sur ses caractéristiques thermomécaniques et son intégration au sein de différentes méthodes de dimensionnement mécaniste empirique (ME), qui tiennent justement compte de ces caractéristiques thermomécaniques.

Le volet 1 concerne la formulation, la validation et la caractérisation mécanique de l'EME-14. Tel qu'attendu, l'EME-14 formulé présente d'excellentes performances : résistance à l'orniérage élevée, rigidité élevée (E^*) et haute résistance à la fatigue. Cette rigidité et résistance à la fatigue sont des éléments clés qu'intègrent les différentes méthodes de dimensionnement ME. Au volet 2, l'influence du type de signal de sollicitation (sine vs haversine) et de la fréquence sur la résistance à la fatigue de l'EME-14 sont étudiées puisque chacun des logiciels de dimensionnement ME fait référence à un essai de fatigue particulier. Le type de signal n'influence pas la durée de vie en fatigue lorsque l'amplitude de déformation est bien définie. La diminution de la fréquence augmente la durée de vie en fatigue. Le volet 3 permet d'établir des correspondances entre le logiciel de dimensionnement ME français, Alizé-LCPC, et américain, AASHTOWare Pavement ME Design. L'application de ces correspondances permet de produire des dimensionnements similaires à quelques millimètres près. Le volet 4 illustre les réductions d'épaisseur que l'EME-14 permet comparativement à un enrobé plus standard selon l'application respective des méthodes de dimensionnement ME française et américaine. Les dimensionnements produits demeurent dans le même ordre de grandeur et illustrent toujours l'énorme gain que l'EME-14 procure.

En somme, l'EME-14 serait une option viable et performante permettant d'avoir des chaussées plus durables ou plus minces comparativement aux enrobés de base standards. La preuve s'appuie sur son comportement mécanique et des méthodes de dimensionnement ME.

Mots-clés : enrobé à module élevé (EME), dimensionnement mécaniste empirique (ME), fatigue, Alizé-LCPC, AASHTOWare Pavement ME Design

**High modulus asphalt concrete for cold regions:
from its mix design to its integration in mechanistic empirical pavement design methods
considering its thermomechanical properties and fatigue resistance**

Samuel PROTEAU GERVAIS

ABSTRACT

The main goal is to illustrate the superiority of the 14 mm high modulus asphalt concrete (HMAC-14) in comparison to standard base course HMA (*Hot Mix Asphalt*). The thermomechanical properties and their integration in mechanistic empirical (ME) pavement design methods are used as proof.

Firstly, the HMAC-14 was formulated, validated and mechanically characterized. As expected, the HMAC-14 shows great performances: high rutting resistance, high rigidity (E^*) and high fatigue resistance. Rigidity and fatigue resistance are key elements to ME pavement design methods. Secondly, the impact of the type of solicitation signal (sine vs haversine) and the frequency on the fatigue resistance of the HMAC-14 are studied because each ME pavement design method refers to a specific fatigue test. When the deformation amplitude is correctly defined, the type of solicitation signal does not impact the fatigue resistance. A reduced frequency leads to higher fatigue resistance. Thirdly, links and relations are established between the French (Alizé-LCPC) and the American (AASHTOWare Pavement ME Design) ME pavement design methods. The use of these links leads to similar pavement designs at the millimeter scale. Lastly, the respective use of the French and the American ME pavement design methods illustrates the thickness reductions the HMAC-14 procures comparatively to a standard base course HMA. Both methods produce designs at the same scale of magnitude and clearly show the important thickness reduction the HMAC-14 procures.

To conclude, the HMAC-14 is a viable and performing alternative to standard base course HMA leading to either thinner pavement structures (at same life durations) or more durable pavement structures (at same thicknesses). The proof is based on the mechanical performances of the HMAC-14 and the use of ME Pavement design methods.

Keywords : high modulus asphalt concrete (HMAC), mechanistic empirical (ME) pavement design, fatigue, Alizé-LCPC, AASHTOWare Pavement ME Design

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Constituants et propriétés des enrobés à module élevé (EME).....	3
1.2.1 Formulation des EME : Aspects volumétriques	4
1.2.2 Granulats	6
1.2.3 Liants bitumineux	6
1.2.4 Formulation.....	8
1.2.5 Comportements mécaniques	10
1.2.6 Comportement viscoélastique linéaire (VEL) : Module complexe (E*)	11
1.2.6.1 Mesure en laboratoire du module complexe (E*).....	16
1.2.6.2 Principe d'équivalence temps-température (PETT).....	18
1.2.6.3 Modélisation 2S2P1D du module complexe (E*)	20
1.2.7 Fatigue.....	23
1.2.7.1 Mesure en laboratoire de la résistance à la fatigue	23
1.2.7.2 Évolution d'un essai de fatigue.....	25
1.2.7.3 Critères de rupture en fatigue.....	27
1.2.7.4 Loi de fatigue (Droite de Wöhler)	28
1.2.7.5 Loi de cumul des dommages (Miner)	30
1.2.8 Orniérage.....	31
1.2.9 Fissuration thermique.....	32
1.3 Structure de chaussée bitumineuse	33
1.3.1 Couche de surface	34
1.3.2 Couche de base	35
1.3.3 Types de sollicitation dans une chaussée bitumineuse	35
1.3.3.1 Effet de la température.....	36
1.3.3.2 Effet du trafic	37
1.3.4 Calcul des efforts et des déformations dans la structure.....	39
1.3.5 Calcul des contraintes et des déformations dans la structure.....	42
1.4 Dimensionnement des chaussées bitumineuses	45
1.4.1 Approches de dimensionnement empirique.....	45
1.4.2 Approches de dimensionnement mécaniste empirique (ME)	47
1.4.3 Méthodes et logiciels de dimensionnement ME	52
1.4.3.1 Alizé – LCPC	52
1.4.3.2 AASHTOWare Pavement ME Design.....	56
1.4.3.3 OPECC.....	59

CHAPITRE 2	OBJECTIFS ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	61
2.1	Mise en contexte	61
2.2	Objectifs	62
2.3	Programme expérimental	62
2.3.1	Volet 1 – Formulation, validation et caractérisation de l’EME-14.....	65
2.3.2	Volet 2 – Évaluation de l’influence du type de sollicitation et de la fréquence sur la résistance à la fatigue de l’EME-14.....	66
2.3.3	Volet 3 – Validation des correspondances entre les logiciels Alizé-LCPC, OPECC et AASHTOWare Pavement ME Design.....	68
2.3.4	Volet 4 – Comparaison des dimensionnements d’Alizé-LCPC et d’AASHTOWare Pavement ME Design incorporant l’EME-14.....	69
CHAPITRE 3	MATÉRIAUX, FORMULATION, CONFECTIO N DES ÉPROUVETTES ET ESSAIS DE LABORATOIRE	71
3.1	Matériaux utilisés.....	71
3.1.1	Caractéristiques des granulats.....	72
3.1.2	Caractéristiques du bitume.....	77
3.2	Formulation de l’enrobé à module élevé 14 mm (EME-14).....	78
3.2.1	Détermination de la densité maximale.....	80
3.2.2	Détermination de l’aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire (PCG).....	80
3.3	Confection des éprouvettes pour les essais thermomécaniques.....	81
3.3.1	Malaxage des enrobés	81
3.3.2	Cure des enrobés avant les essais.....	84
3.3.3	Fabrication d’éprouvettes à la presse à cisaillement giratoire	84
3.3.3.1	Identification et entreposage des éprouvettes	85
3.3.4	Fabrication d’éprouvettes au compacteur MLPC	86
3.3.4.1	Identification et entreposage des éprouvettes	88
3.3.5	Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés.....	89
3.4	Caractérisation thermomécanique.....	90
3.4.1	Résistance à la déformation des enrobés à l’essai d’orniérage	91
3.4.2	Résistance au retrait thermique empêché (TSRST)	92
3.4.3	Détermination du module complexe (E*) de l’enrobé.....	94
3.4.3.1	Réalisation de l’essai de module complexe (E*)	95
3.4.3.2	Modélisation 2S2P1D du module complexe (E*)	96
3.4.4	Détermination de la résistance à la fatigue des enrobés	98
3.4.4.1	Réalisation de l’essai de fatigue.....	99
3.4.4.2	Analyse et validation de l’essai de fatigue.....	101
3.4.4.3	Détermination de la loi de fatigue (Droite de Wöhler)	111

CHAPITRE 4	FORMULATION, CARACTÉRISATION THERMOMÉCANIQUE ET ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE SOLlicitation SUR LA LOI DE FATIGUE DE L'EME-14	115
4.1	Essais liés à la formulation	115
4.1.1	Densité maximale d_{mm} – Résultats et analyse.....	115
4.1.2	Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG) – Résultats et analyse	116
4.2	Essais thermomécaniques	117
4.2.1	Résistance à l'orniérage – Résultats et analyse.....	117
4.2.2	Résistance au retrait thermique empêché (TSRST)	118
4.2.2.1	Résultats.....	118
4.2.2.2	Analyse des résultats.....	120
4.2.3	Module complexe (E^*)	121
4.2.3.1	Résultats.....	121
4.2.3.2	Modélisation 2S2P1D	123
4.2.3.3	Analyse des résultats.....	124
4.2.4	Résistance à la fatigue.....	128
4.2.4.1	Résultats pour une sollicitation de type sine à 10°C et 10 Hz.....	128
4.2.4.2	Résultats pour une sollicitation de type haversine à 10°C et 10 Hz.....	129
4.2.4.3	Résultats pour une sollicitation de type sine à 10°C et 5 Hz.....	131
4.2.4.4	Analyse des résultats de résistance à la fatigue	132
4.2.4.5	Influence du type de sollicitation sur la résistance à la fatigue	133
4.2.4.6	Influence de la fréquence sur la résistance à la fatigue.....	139
CHAPITRE 5	VALIDATION DES CORRESPONDANCES ET COMPARAISON DES LOGICIELS DE DIMENSIONNEMENT ME DE LA MÉTHODE FRANÇAISE ET AMÉRICAINE	141
5.1	Validation des correspondances entre les logiciels Alizé-LCPC, OPECC et AASHTOWare Pavement ME Design.....	141
5.1.1	Intrants Alizé et OPECC et leur correspondance dans PvME	141
5.1.1.1	Définition de la structure	142
5.1.1.2	Fréquence et température équivalente	143
5.1.1.3	Propriétés des matériaux	144
5.1.1.4	Trafic et durée	150
5.1.1.5	Risque	156
5.1.1.6	Coefficients de calibration	158
5.1.2	Dimensionnement – détermination de l'épaisseur de la couche de base.....	163
5.1.3	Analyse des résultats.....	166

5.2	Comparaison des dimensionnements d'Alizé-LCPC et d'AASHTOWare Pavement ME Design incorporant l'EME-14.....	169
5.2.1	Intrants identiques dans Alizé et PvME.....	169
5.2.1.1	Définition de la structure	169
5.2.1.2	Fréquence et température équivalente	170
5.2.1.3	Propriétés des matériaux autres que la résistance à la fatigue de l'EME-14.....	170
5.2.1.4	Trafic et durée	174
5.2.2	Intrants spécifiques à Alizé.....	175
5.2.2.1	Risque	175
5.2.2.2	Coefficients de calibration	176
5.2.3	Intrants spécifiques à PvME	176
5.2.3.1	Risque	177
5.2.3.2	Coefficients de calibration globaux et spécifiques au mélange	177
5.2.4	Dimensionnement – détermination de l'épaisseur de la couche de base.....	178
5.2.5	Analyse des résultats.....	179
	CONCLUSION	181
ANNEXE I	FICHE TECHNIQUE DE PRODUIT : EME-14.....	185
ANNEXE II	ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME VIAFLEX M®.....	187
ANNEXE III	INTÉGRATION DU k_{fl} SPÉCIFIQUE AU MÉLANGE DANS PvME.....	189
	BIBLIOGRAPHIE	191

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Critères de performance de l'EME-149
Tableau 1.2	Récapitulatif des essais de module complexe utilisés dans le cadre du mémoire17
Tableau 1.3	Récapitulatif des autres essais de module complexe18
Tableau 1.4	Récapitulatif des essais de fatigue utilisés dans le cadre du mémoire24
Tableau 1.5	Récapitulatif des autres essais de fatigue25
Tableau 1.6	Valeurs seuils suggérées par PvME pour la fissuration par fatigue.....59
Tableau 1.7	Niveaux de fiabilité suggérés par PvME59
Tableau 3.1	Récapitulatif du plan d'échantillonnage72
Tableau 3.2	Récapitulatif de l'homogénéisation des différentes classes granulaires.....74
Tableau 3.3	Caractéristiques des granulats fins et du filler75
Tableau 3.4	Caractéristiques des gros granulats76
Tableau 3.5	Vérification de la catégorie des granulats77
Tableau 3.6	Caractéristiques du bitume Viaflex M®78
Tableau 3.7	Granulométrie de l'EME-14 St-Philippe de référence79
Tableau 3.8	Granulométrie de l'EME-14 étudié79
Tableau 3.9	Exigences quant aux vides de l'EME-14 à la PCG81
Tableau 3.10	Masse approximative requise d'enrobé selon l'essai82
Tableau 3.11	Malaxeur thermo-régulé à utiliser en fonction de l'essai82
Tableau 3.12	Temps de cure à 170°C en fonction de l'essai84
Tableau 3.13	Exigences de l'AASHTO TP10 - TSRST93

Tableau 3.14	Déformation en fonction de la température d'essai – Module complexe.....	95
Tableau 3.15	Nombre de cycles en fonction de la fréquence d'essai – Module complexe.....	95
Tableau 3.16	Paramètres de l'essai de module complexe – LC 26-700	96
Tableau 3.17	Exigences pour le module complexe de l'EME-14	96
Tableau 3.18	Paramètres des essais de fatigue	100
Tableau 3.19	Enregistrement des données pour un essai de fatigue.....	100
Tableau 4.1	Résultats des essais de d_{mm}	116
Tableau 4.2	Résultats de l'aptitude au compactage à la PCG	116
Tableau 4.3	Caractéristiques des éprouvettes et résultats du TSRST	119
Tableau 4.4	Caractéristiques des éprouvettes et type d'essai – Module complexe.....	121
Tableau 4.5	Paramètres des modèles 2S2P1D et des équations WLF	124
Tableau 4.6	Influence de la provenance des éprouvettes sur le module complexe	126
Tableau 4.7	Caractéristiques des éprouvettes et durées de vie en fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine (10°C; 10Hz)	128
Tableau 4.8	Paramètres des lois de fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine (10°C; 10Hz)	129
Tableau 4.9	Caractéristiques des éprouvettes et durées de vie en fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Haversine (10°C; 10Hz)	130
Tableau 4.10	Paramètres des lois de fatigue pour ϵ_0^{pk-pk} ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Haversine (10°C; 10Hz).....	130
Tableau 4.11	Caractéristiques des éprouvettes et durées de vie en fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine (10°C; 5Hz)	131
Tableau 4.12	Paramètres des lois de fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine (10°C; 5Hz).....	132
Tableau 4.13	Paramètres des lois de fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine & Haversine (10°C; 10Hz)	137
Tableau 5.1	Définition des structures: matériaux, épaisseurs et interface – Volet 3	142

Tableau 5.2	Fréquence et température équivalente dans Alizé et OPECC.....	143
Tableau 5.3	Station climatique et résumé des données climatiques dans PvME	144
Tableau 5.4	Données climatiques dans PvME.....	144
Tableau 5.5	Propriétés des matériaux granulaires et de surface dans Alizé et OPECC – Volet 3	145
Tableau 5.6	Propriétés des matériaux bitumineux en couche de base dans Alizé et OPECC – Volet 3	145
Tableau 5.7	Propriétés des matériaux bitumineux dans PvME – Volet 3	146
Tableau 5.8	Propriétés mécaniques des bitumes (<i>Level 1</i>) dans PvME – Volet 3	147
Tableau 5.9	Module complexe des enrobés bitumineux (<i>Level 1</i>) dans PvME – Volet 3	148
Tableau 5.10	Propriétés des matériaux granulaires dans PvME – Volet 3	149
Tableau 5.11	Granulométrie et autres propriétés d'ingénierie des matériaux granulaires dans PvME	150
Tableau 5.12	Paramètres de trafic et de durée dans Alizé – Volet 3	151
Tableau 5.13	Définition de l'ÉCAS américain dans Alizé et OPECC	151
Tableau 5.14	Paramètres de trafic et de durée dans OPECC – Volet 3	151
Tableau 5.15	Définition du type de chaussée et de la durée de service dans PvME	152
Tableau 5.16	Paramètres du trafic et définition de l'ÉCAS américain dans PvME – Volet 3	153
Tableau 5.17	Distribution du trafic lourd selon les différentes classes dans PvME.....	154
Tableau 5.18	Distribution du trafic lourd durant l'année dans PvME	155
Tableau 5.19	Détermination du nombre et du type d'essieu des différentes classes de véhicule dans PvME	155
Tableau 5.20	Distribution du trafic lourd en fonction du poids du camion durant l'année dans PvME.....	156
Tableau 5.21	Risque dans Alizé et OPECC – Volet 3.....	157

Tableau 5.22	Correspondances dans PvME pour considérer le risque d’Alizé – Volet 3	158
Tableau 5.23	Coefficients de calibration dans Alizé et OPECC – Volet 3	159
Tableau 5.24	Coefficients de calibration utilisés dans PvME afin d’évaluer l’évolution de la fissuration par fatigue de la chaussée (FC_P) en considérant l’approche du calcul de risque proposée par Alizé (Risque Alizé) – Volet 3	161
Tableau 5.25	Coefficients de calibration utilisés dans PvME afin d’évaluer l’évolution de la fissuration par fatigue de la chaussée (FC_P) en considérant l’approche du calcul de risque proposée par PvME (Risque PvME) – Volet 3	162
Tableau 5.26	Récapitulatif des dimensionnements avec Alizé et PvME – Volet 3	166
Tableau 5.27	Définition des structures: matériaux, épaisseurs et interface – Volet 4.....	170
Tableau 5.28	Propriétés des matériaux granulaires et de surface dans Alizé – Volet 4.....	170
Tableau 5.29	Propriétés des matériaux bitumineux en couche de base dans Alizé – Volet 4.....	171
Tableau 5.30	Propriétés des matériaux bitumineux dans PvME – Volet 4	172
Tableau 5.31	Propriétés mécaniques des bitumes (<i>Level 1</i>) dans PvME – Volet 4	172
Tableau 5.32	Module complexe des enrobés bitumineux (<i>Level 1</i>) dans PvME – Volet 4	173
Tableau 5.33	Propriétés des matériaux granulaires dans PvME – Volet 4	174
Tableau 5.34	Paramètres de trafic et de durée dans Alizé – Volet 4	174
Tableau 5.35	Paramètres du trafic et définition de l’ÉCAS américain dans PvME – Volet 4	175
Tableau 5.36	Risque dans Alizé – Volet 4.....	176
Tableau 5.37	Coefficients de calibration dans Alizé – Volet 4	176
Tableau 5.38	Risque dans PvME – Volet 4	177

Tableau 5.39	Coefficients de calibration dans PvME – Volet 4.....	178
Tableau 5.40	Récapitulatif des dimensionnements avec Alizé et PvME – Volet 4.....	179
Tableau 5.41	Écarts d'épaisseur entre Alizé et PvME et gains sur l'épaisseur de l'EME-14.....	179

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Composition volumétrique d'un enrobé bitumineux compacté.....	5
Figure 1.2	Comportement du bitume en fonction de la température.....	7
Figure 1.3	Comportements mécaniques des enrobés bitumineux	11
Figure 1.4	Courbes isothermes (Épr. PL1-A1).....	13
Figure 1.5	Courbes isochrones (Épr. PL1-A1).....	14
Figure 1.6	Courbe dans le plan Cole-Cole (Épr. PL1-A1).....	15
Figure 1.7	Courbe dans l'espace de Black (Épr. PL1-A1)	16
Figure 1.8	Courbe maîtresse $T_R = 10^\circ\text{C}$ (Épr. PL1-A1).....	20
Figure 1.9	Modèle rhéologique 2S2P1D.....	21
Figure 1.10	Évolution du module dynamique $ E^* $ en fonction du nombre de cycles – Essai de fatigue	26
Figure 1.11	Représentation graphique et paramètres de la droite de Whöler	29
Figure 1.12	Structure d'une chaussée	34
Figure 1.13	Schématisation des sollicitations induites par la température.....	37
Figure 1.14	Schématisation des sollicitations induites par le trafic	38
Figure 1.15	Modèle multicouche de Burmister en coordonnées cylindriques	40
Figure 1.16	Vue en plan d'un demi-essieu jumelé tandem.....	43
Figure 1.17	Principe général de l'approche mécaniste empirique de dimensionnement de chaussées souples.....	49
Figure 1.18	Correspondances entre les paramètres de la loi de fatigue utilisée dans Alizé et ceux de l'équation (1.36).....	55
Figure 1.19	Correspondances entre les paramètres de la loi de fatigue utilisée dans PvME et ceux de l'équation (1.36)	57

Figure 1.20	Schématisation du taux de fissuration par fatigue (FC_P) de PvME.....	58
Figure 2.1	Organigramme des volets 1 et 2 du programme expérimental	63
Figure 2.2	Organigramme du volet 3 du programme expérimental	64
Figure 2.3	Organigramme du volet 4 du programme expérimental	65
Figure 2.4	Types de chargements cycliques sinusoïdaux réalisés – Essais de fatigue.....	67
Figure 3.1	Illustration du procédé utilisé pour homogénéiser les différentes classes granulaires à partir d'un séparateur mécanique	73
Figure 3.2	Ensemble des matériaux granulaires échantillonnés et homogénéisés	74
Figure 3.3	Granulométrie de l'EME-14 et CMVM	79
Figure 3.4	Malaxeurs thermo-régulés pour la confection de l'EME-14 (a) Capacité de 80 kg (b) Capacité de 35 kg	83
Figure 3.5	Patron de carottage et de sciage à partir d'une briquette PCG (\emptyset 150 mm)	85
Figure 3.6	Patron de carottage et de sciage A pour des essais de fatigue et de E* à partir d'une plaque MLPC	87
Figure 3.7	Patron de carottage et de sciage B pour des essais de fatigue, de E* et de TSRST à partir d'une plaque MLPC.....	88
Figure 3.8	Nomenclature des éprouvettes provenant de plaques MLPC	89
Figure 3.9	Localisation des points de mesurage – Essai d'orniérage.....	92
Figure 3.10	Évolution de la contrainte en fonction de la température pendant l'essai TSRST	94
Figure 3.11	Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur la courbe du module complexe dans le plan Cole-Cole.....	97
Figure 3.12	Évolution de la température en fonction du nombre de cycles – Fatigue.....	102
Figure 3.13	Évolution du module dynamique en fonction du nombre de cycles – Fatigue.....	103

Figure 3.14	Évolution du module dynamique en fonction de l'angle de phase – Fatigue.....	104
Figure 3.15	Évolution des écarts des extensomètres par rapport à la moyenne en fonction du nombre de cycles – Fatigue.....	105
Figure 3.16	Évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles – Fatigue.....	106
Figure 3.17	(a) Écart entre le signal de la déformation mesuré et calculé (b) Évolution de l'indice de qualité des extensomètres, du signal de la contrainte et du signal de la déformation en fonction du nombre de cycles – Fatigue	107
Figure 3.18	Évolution de l'amplitude de la déformation et de la déformation moyenne en fonction du nombre de cycles – Fatigue.....	108
Figure 3.19	Évolution de l'amplitude de la contrainte et de la contrainte moyenne en fonction du nombre de cycles – Fatigue.....	109
Figure 3.20	Évolution du centre de la déformation des extensomètres en fonction du nombre de cycles – Fatigue	110
Figure 3.21	Évolution du centre de la contrainte en fonction du nombre de cycles – Fatigue.....	111
Figure 3.22	Critère de rupture $N_{f50\%}$ (a) Détermination du $ E^* _0$ (b) Détermination du $N_{f50\%}$	113
Figure 3.23	Critère de rupture $N_{f\phi E_{max}-N}$	113
Figure 3.24	Critère de rupture $N_{f\phi E_{max}-E^*}$	114
Figure 4.1	Évolution de la teneur en vides à la PCG	117
Figure 4.2	Résultats de la résistance à l'orniérage.....	118
Figure 4.3	Résultats du TSRST	119
Figure 4.4	Courbes maîtresses, points expérimentaux et modèles 2S2P1D (plaques MLPC vs briquettes PCG).....	122
Figure 4.5	Points expérimentaux et modèles 2S2P1D dans le plan Cole-Cole (plaques MLPC vs briquettes PCG).....	122
Figure 4.6	Points expérimentaux et modèles 2S2P1D dans l'espace de Black (plaques MLPC vs briquettes PCG).....	123

Figure 4.7	Points expérimentaux et modèles 2S2P1D dans l'espace de Black (plaques MLPC vs briquettes PCG) avec emphase sur $T = 40^\circ\text{C}$	125
Figure 4.8	Droites de fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine (10°C ; 10Hz).....	129
Figure 4.9	Droites de fatigue pour $\varepsilon_0^{\text{pk-pk}}$ ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Haversine (10°C ; 10Hz).....	131
Figure 4.10	Droites de fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine (10°C ; 5Hz).....	132
Figure 4.11	Droites de fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine (10°C ; 10Hz; ε_0) vs Haversine (10°C ; 10Hz; $\varepsilon_0^{\text{pk-pk}}$).....	134
Figure 4.12	Droites de fatigue pour ε_0 et $\varepsilon_0^{\text{pk-pk}}$ ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Haversine (10°C ; 10Hz).....	136
Figure 4.13	Droite de fatigue ($N_{f50\%}$) suivant les conditions d'essai sine et haversine (10°C ; 10Hz) en considérant la valeur ε_0 comme amplitude de sollicitation.....	137
Figure 4.14	Décomposition des signaux pour une sollicitation de type haversine (a) Déformation (b) Contrainte	138
Figure 4.15	Relaxation du signal de contrainte lors d'une sollicitation de type haversine.....	139
Figure 4.16	Droites de fatigue ($N_{f50\%}$) – Sine (10°C ; 10Hz) vs Sine (10°C ; 5Hz)	140
Figure 5.1	Correspondances entre les coefficients de calibration d'OPECC, d'Alizé et de PvME	160
Figure 5.2	Évolution de la fissuration et du dommage de la structure #1	164
Figure 5.3	Évolution de la fissuration et du dommage de la structure #2	165

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2PB	<i>2 Points Bending</i> (Essai en flexion deux points)
2S2P1D	Modèle rhéologique composé de deux ressorts, deux éléments paraboliques et un amortisseur
3PB	<i>3 Points Bending</i> (Essai en flexion trois points)
4PB	<i>4 Points Bending</i> (Essai en flexion quatre points)
AADTT	<i>Average Annual Daily Truck Traffic</i>
AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
À dét.	À déterminer
Alizé	Alizé-LCPC (Logiciel)
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
BBSG	Béton bitumineux semi-grenu
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
CAM	Coefficient d'agressivité moyen
CMVM	Courbe de masse volumique maximale
cos	Cosinus
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
CTA	Centre Technique Amériques d'Eurovia
D2S	Intervalle d'acceptation de 2 résultats
DJMA	Débit journalier moyen annuel
d_{mb}	Densité brute du mélange
d_{mm}	Densité maximale du mélange

DOT	<i>Department of Transportation</i>
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
EB	Enrobé bitumineux
ÉCAS	Équivalent de charge axiale simple
Éch.	Échantillon
EME	Enrobé à module élevé
Ép.	Épaisseur
Épr.	Éprouvette
ESG	Enrobé semi-grenu
ÉTS	École de technologie supérieure
FC	<i>Fatigue Cracking</i>
FC_P	<i>Fatigue Cracking Percentage</i>
GB	Grave bitume
GNM	Grosseur nominale maximale
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IDRRIM	Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
IQ	Indice de qualité
IRI	Indice de rugosité international
LA	Los Angeles
LC	Laboratoire des chaussées

LCMB	Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
LTPP	<i>Long Term Pavement Performance</i>
Max	Maximum
MD	Micro-Deval
ME	Mécaniste empirique
MG	Matériaux granulaire
Min	Minimum
MJA	Moyenne journalière annuelle
MLPC	Matériel des laboratoires des ponts et chaussées
MMC	Mécanique des milieux continus
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MTS	<i>Material Testing Systems</i>
NA	Non applicable
NF	Norme française
NQ	Norme québécoise
NR	Non réalisé
NS	Non spécifié
OPECC	Outil de prévision de l'évolution du comportement des chaussées
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PETT	Principe d'équivalence temps-température

PG	<i>Performance Grade</i> (Grade de performance)
PL	Plaque
Pts	Points
PvME	<i>AASHTOWare Pavement ME Design</i> (Logiciel)
RDC	Recherche et développement coopérative
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
sin	Sinus
SSS	Saturé superficiellement sec
SWCC	<i>Soil Water Characteristic Curve</i>
Tb	Température basse du grade de performance d'un bitume
TBA	Température bille anneau
TCD	Traction-compression directe
Te	Température élevée du grade de performance d'un bitume
TSRST	<i>Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength</i>
VAM	<i>Voids of Aggregate Mineral</i>
V_b	Volume de bitume total
V_{ba}	Volume de bitume absorbé
V_{be}	Volume de bitume effectif
VEL	Viscoélastique linéaire
V_{gb}	Volume brut du granulat
V_{ge}	Volume effectif du granulat
V_i	Volume des vides interstitiels

V_{mb}	Volume brut de l'enrobé compacté
V_{mm}	Volume de l'enrobé sans vides interstitiels
WASHO	<i>Western Association of State Highway Officials</i>
WLF	Loi de William, Landel et Ferry

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

a	Rayon de l'aire circulaire représentant un pneu
A	Masse dans l'air de l'éprouvette sèche (d_{mb}) ou Amplitude du signal (IQ)
a_1	$= N_{f1}(\theta_{test}, f_{test}) E^*(\theta_{test}, f_{test}) ^{a_3}$
a_2	Coefficient représentant la pente de la droite de fatigue dans le domaine bi-logarithmique ($\log N_f$ vs $\log \varepsilon_0$) ($a_2 = -1/b$)
a_3	Coefficient représentant la pente de la droite de la relation $\log N_{f1}$ vs $\log E_\theta^* $
a_T	Fonction de translation
b	Pente de fatigue sous forme de loi bi-logarithmique ($b = -1/a_2$)
B	Masse dans l'air de l'éprouvette partiellement SSS (d_{mb})
BTU	<i>British Thermal Unit</i>
β	Paramètre lié à l'amortisseur Newtonien : $\eta = (E_0 - E_{00}) * \beta * \tau$ (Modèle 2S2P1D)
β_{a1}	Coefficient de calage
β_{a2}	Coefficient de calage
β_{a3}	Coefficient de calage
β_{f1}	Coefficient de calibration local ou spécifique au mélange (PvME)
β_{f2}	Coefficient de calibration local ou spécifique au mélange (PvME)
β_{f3}	Coefficient de calibration local ou spécifique au mélange (PvME)
β_{risk}	Coefficient de calage associé au risque
c	Coefficient associant la variation de la déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée (0.02 cm^{-1})
C	Coefficient fonction de la teneur en bitume et en vides (PvME) ou Masse de l'éprouvette partiellement saturée dans l'eau (d_{mb})

C_1	Constante de l'enrobé bitumineux dans la loi WLF
C_2	Constante de l'enrobé bitumineux dans la loi WLF
C_H	Coefficient fonction de l'épaisseur (PvME)
D	Dommage
d/D	Diamètre minimal (d) et maximal (D) des particules d'une classe granulaire
DI_{Bottom}	Cumul de dommage (PvME)
δ	Constante sans dimension (Modèle 2S2P1D) ou Écart-type de la distribution de $\log(N_f)$ à la rupture
$\Delta\varepsilon_{EXTi}$	Écart des déformations mesurées par l'extensomètre i par rapport à la moyenne
\emptyset	Diamètre
E	Module élastique ou module de Young (Enrobé bitumineux)
E_0	Module vitreux ($\omega \rightarrow \infty$) (Modèle 2S2P1D)
E_{00}	Module statique ($\omega \rightarrow 0$) (Modèle 2S2P1D)
E_1	Module d'élasticité dynamique (Composante élastique)
E_2	Module de perte (Composante visqueuse)
E^*	Module complexe (Enrobé bitumineux)
E_{HMA}	Module dynamique de l'enrobé en couche de base (PvME)
E_i	Module élastique de la couche i
$ E_0^* $	Module dynamique initial
$ E^* $	Module dynamique (Enrobé bitumineux)
$ E_n^* $	Module dynamique au moment n
ε	Déformation
ε_0	Amplitude de la déformation imposée

ε_0 Exti	Centre du signal de la déformation de l'extensomètre i
ε_0 i	Niveau d'amplitude de déformation i (Amplitude la plus faible)
ε_0 i+1	Niveau d'amplitude de déformation supérieur
ε_0 pk-pk	Amplitude de la déformation imposée pic-à-pic
ε_6	Déformation menant à la rupture du matériau à 10^6 cycles
ε_6 (θ_{test} , f_{test})	Déformation menant à la rupture du matériau à 10^6 cycles à la température (θ_{test}) et fréquence d'essai (f_{test})
ε_A Exti	Amplitude du signal de la déformation de l'extensomètre i
ε_t	Déformation horizontale en traction en bas de couche de revêtement
ε_t adm	Déformation horizontale admissible en traction en bas de couche de revêtement
η	Viscosité newtonienne
f	Fréquence
FC _{Bottom}	Fissuration par fatigue (PvME)
Fr-eq	Fréquence équivalente ou réduite
f_i	Facteur au mois i
f_{site}	Fréquence sur site
f_{test}	Fréquence d'essai
G	Module élastique ou module de Young (Bitume)
G^*	Module complexe (Bitume)
$G_{\text{calculé}}$	Grandeur du signal calculé
$G_{\text{mesuré}}$	Grandeur du signal mesuré
h	Paramètre des éléments parabolique ($0 < k < h < 1$) (Modèle 2S2P1D)
H	Hauteur de l'éprouvette

H_{ac}	Épaisseur totale du revêtement (pouces) (PvME)
h_f	Hauteur d'arrêt de la compaction à la PCG
H_{HMA}	Épaisseur totale du revêtement (pouces) (PvME)
h_i	Épaisseur de la couche i
i	Partie imaginaire du nombre complexe où $i^2 = -1$
k	Paramètre des éléments parabolique ($0 < k < h < 1$) (Modèle 2S2P1D)
k_c	Coefficient de calage lié au calage laboratoire-chantier
k_{f1}	Coefficient de calibration global (PvME)
k_{f2}	Coefficient de calibration global (PvME)
k_{f3}	Coefficient de calibration global (PvME)
k_r	Coefficient de calage lié au risque de calcul retenu
k_s	Coefficient de calage lié à l'homogénéité du sol support
m/m	Déformation
Mr	Module de résilience effectif du sol support
$\mu m/m$	Microdéformation
n	Nombre de points analysés
N	Nombre de cycles de chargement
NE	Nombre équivalent d'ÉCAS
N_{10}	$10^{\text{ième}}$ giration (Aptitude au compactage PCG)
N_{200}	$200^{\text{ième}}$ giration (Aptitude au compactage PCG)
N_{Design}	Giration de design ($100^{\text{ième}}$ pour l'EME-14) (Aptitude au compactage PCG)
N_f	Nombre de cycles menant à la rupture ou durée de vie en fatigue
N_{fl}	Durée de vie pour une ε_0 de 1 m/m

N_{f6}	Durée de vie de 10^6 cycles
$N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})$	Durée de vie pour une ε_0 de 1 m/m à la température (θ_{test}) et fréquence d'essai (f_{test})
$N_{f50\%}$	Nombre de cycles associé à une réduction de 50% de $ E^* $
$N_{f\Delta\phi_{\text{ext}}}$	Nombre de cycles associé au moment où les déformations mesurées par un extensomètre s'éloignent de x % par rapport à la moyenne
$N_{f\Delta\phi_{\text{Eext}}}$	Nombre de cycles associé au moment où l'angle de phase mesuré par un extensomètre s'éloigne de x° par rapport à la moyenne.
$N_{f\phi_{\text{Emax}}-E^*}$	Nombre de cycles associé au pic ($ E^* ; \phi_E$)
$N_{f\phi_{\text{Emax}}-N}$	Nombre de cycles associé à la valeur maximale de ϕ_E
$N_{f(\theta, f)}$	Nombre de cycles associé à la rupture du matériau en fatigue pour une déformation (ε_0) à une quelconque température et fréquence (θ, f)
$N_{f\text{-HMA}}$	Durée de vie en nombre de passages d'essieux (PvME)
N_{fi}	Nombre de cycles associé à la rupture du matériau à la déformation i
$N_{f\text{II/III}}$	Nombre de cycles cernant la transition entre les phases II et III
N_f^{labo}	Durée de vie en fatigue déterminée en laboratoire
$N_{f(S^*N)\text{max}}$	Nombre de cycles associé au pic ($N; S^*N$)
N_f^{Site}	Nombre de cycles associé à la rupture du matériau à la déformation (ε_t), température (θ_{site}) et fréquence (f_{site}) du site
n_i	Nombre de cycles ou passages à la déformation i
ν	Coefficient de Poisson
v_i	Coefficient de Poisson de la couche i
ω	Pulsation
PSI	Indice de viabilité de la chaussée
%	Pour cent

π	Pi
ϕ	Angle de phase
ϕ_E	Angle de phase du module complexe (Enrobé bitumineux)
ϕ_G	Angle de phase du module complexe (Bitume)
q	Pression
r	Coordonnée cylindrique radiale
R	Niveau de fiabilité
R^2	Coefficient de détermination
SN	<i>Structural Number</i> (Nombre structural)
SN_f	Écart-type sur le $\log(N_f)$ à la rupture
Sh	Écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériaux mis en œuvre
S_0	Erreur de l'estimation ($S_0 = 0,45$ pour chaussée souple)
S_{adm}	Sollicitation admissible
S_{max}	Sollicitation maximale produite par un ÉCAS
\S	Section
σ	Contrainte
σ_0	Amplitude de la contrainte ou Centre du signal de la contrainte
σ_A	Amplitude de la contrainte
σ_r	Contrainte radiale (Coordonnées cylindriques)
σ_t	Contrainte tangentielle (Coordonnées cylindriques)
σ_x	Contrainte en x (Coordonnées cartésiennes)
σ_y	Contrainte en y (Coordonnées cartésiennes)

σ_z	Contrainte verticale (z) (Coordonnées cartésiennes)
t	Temps
T	Température
T_{consigne}	Consigne de température pendant l'essai de fatigue
TC_{annuel}	Trafic cumulé annuel
TC_i	Trafic cumulé au mois i
T_g	Température de transition vitreuse
T_i	Température i
t_{lag}	Déphasage entre le signal de déformation et de contrainte
T_R	Température de référence
T_{rupture}	Température de rupture à l'essai de TSRST
τ	Constante de temps, dépend de la température de calcul (Modèle 2S2P1D)
τ_{rz}	Contrainte de cisaillement (Coordonnées cylindriques)
τ_{xy}	Contrainte de cisaillement sur le plan x-y (Coordonnées cartésiennes)
τ_{xz}	Contrainte de cisaillement sur le plan x-z (Coordonnées cartésiennes)
τ_{yz}	Contrainte de cisaillement sur le plan y-z (Coordonnées cartésiennes)
θ	Température
θ_{eq}	Température équivalente
θ_{site}	Température sur site
θ_{test}	Température d'essai
u	Variable centrée réduite associée au risque ou à la fiabilité
V_a	Teneur en vides de l'enrobé (PvME)
Vi	Teneur en vides

W ₁₈	Nombre d'ÉCAS admissible
z	Coordonnée cylindrique verticale
Z _R	Déviation normale associée au risque de calcul (1-R)

UNITÉS CALORIFIQUES

Température

°C	Degré Celsius
°F	Degré Fahrenheit

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

ft/pi	<i>Foot/Pied</i>
in/po	<i>Inch/Pouce</i>
km	Kilomètre
m	Mètre
mm	Millimètre
µm	Micromètre

Volume

cm ³	Centimètre cube
mm ³	Millimètre cube

UNITÉS DE MASSE

Masse

g	Gramme
kg	Kilogramme

masse volumique

g/cm ³	gramme par centimètre cube
pcf	<i>Pound per Cubic Foot</i>

UNITÉS MÉCANIQUES

Vitesse

mph	<i>Miles Per Hour</i>
-----	-----------------------

Angle plan

°	Degré
rad	Radian

UNITÉS DE TEMPS**Temps**

hr/h	<i>Hour/Heure</i>
s	Seconde

Contrainte, pression

MPa	Mégapascal
Pa	Pascal
psi	<i>Pound per Square Inch</i>

Fréquence

Hz	Hertz
----	-------

Force

MN	Méganewton
N	Newton

INTRODUCTION

Le réseau routier supérieur québécois, représentant 30 988 kilomètres de chaussées, ne cesse de se détériorer. Effectivement, le pourcentage de chaussées en bon état a chuté de 79,9 % à 78,9% entre 2014 et 2017 malgré des investissements considérables. «Au cours de l'exercice financier de 2017-2018, [...] des investissements totalisant 482,5 millions de dollars ont été consacrés à la conservation des chaussées» (MTQ, 2018f). En d'autres mots, «la longueur des travaux de réfection réalisés sur des chaussées déficientes n'a pas été suffisante pour contrer la dégradation naturelle du réseau et, donc, pour maintenir la proportion de chaussées en bon état» (MTQ, 2018f). Également, le ministère des Transports du Québec (MTQ) dit s'engager, dans son cycle de gestion de la performance au ministère, à s'améliorer. Cette amélioration passe notamment par l'optimisation des processus (MTQ, 2018f). En ce sens, l'amélioration de l'état du réseau routier n'est possible que par une augmentation des investissements et/ou l'utilisation de matériaux routiers plus performants.

Au niveau matériau, l'enrobé à module élevé (EME) adapté aux régions froides serait une alternative prometteuse aux enrobés bitumineux de base standards. Effectivement, l'enrobé à module élevé présente d'excellentes performances : bonne résistance à l'orniérage, module complexe élevé et haute résistance à la fatigue. La fissuration par fatigue est responsable en grande proportion de la détérioration des chaussées bitumineuses. C'est l'utilisation de méthodes de dimensionnement mécaniste empirique (ME) qui permettrait de mettre en valeur les propriétés mécaniques supérieures de l'EME par rapport aux enrobés de base standards.

Dans le cadre d'un projet de recherche et de développement coopératif (RDC2), le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), l'entreprise Eurovia et le laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) travaillent à montrer la valeur ajoutée de l'enrobé à module élevé (EME-14) en s'appuyant, notamment, sur ses caractéristiques thermomécaniques et des méthodes de dimensionnement mécaniste empirique.

Le mémoire est séparé en deux sections comportant chacune d'elles deux volets. La première section touche majoritairement l'aspect matériau. En effet, au volet 1, la formulation, la validation et la caractérisation d'un EME-14 adapté aux régions froides sont faites. De plus, le volet 2 aborde l'évaluation de l'influence du type de sollicitation (sine vs haversine) et de la fréquence sur la résistance à la fatigue de l'EME-14.

La deuxième section concerne les méthodes de dimensionnement ME. Au volet 3, les correspondances entre les deux grandes méthodes de dimensionnement française (Alizé-LCPC) et américaine (*AASHTOWare Pavement ME Design*) sont établies et validées selon le mode de dégradation de fissuration par fatigue (*Bottom-Up Fatigue Cracking*). Cet aspect est intéressant puisque les entreprises françaises, qui s'implantent en Amérique, s'interrogent sur les liens qui existent entre la méthode qu'elles maîtrisent (Alizé-LCPC) et la méthode préconisée en Amérique (*AASHTOWare Pavement ME Design*). Enfin, au volet 4, des structures de chaussée intégrant les propriétés thermomécaniques de l'EME-14 sont dimensionnées selon la méthode française et américaine, toujours en fonction du critère de fissuration par fatigue. Ainsi, on valide, pour chacune des méthodes, l'apport de l'EME-14 par rapport à un enrobé bitumineux de base standard et on compare les dimensionnements respectifs à chacune des méthodes.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

La revue de la littérature vise à faire le point sur les acquis et à éclaircir les notions de base se rapportant aux chaussées bitumineuses et aux enrobés bitumineux à module élevé. Notamment, les connaissances jugées nécessaires au dimensionnement des chaussées bitumineuses sont ici présentées. Ce chapitre est articulé selon trois thèmes principaux : l'enrobé à module élevé (EME), la structure de chaussée bitumineuse et leur dimensionnement. À l'échelle du matériau, les constituants et les comportements mécaniques sont abordés. À l'échelle de la structure, les couches, les sollicitations et les calculs de contraintes et de déformations sont présentés. Enfin, les principes des approches de dimensionnement empirique et mécaniste empirique (ME) ainsi que leurs outils sont exposés.

1.2 Constituants et propriétés des enrobés à module élevé (EME)

Les enrobés à module élevé (EME) ont été développés en France à la fin des années 1970 et les premières applications sur route débutent dans les années 1980 (Bitume Québec, 2014; Di Benedetto et al., 2005; Espersson, 2014). Comme leur nom l'indique, les EME ont une rigidité (Module complexe; E^*) plus élevée comparativement aux enrobés de base conventionnels tels que les graves bitumes (GB) (Bitume Québec, 2014; Di Benedetto et al., 2005; Espersson, 2014). Les performances supérieures des EME ne s'arrêtent pas là. Effectivement, les EME présentent une résistance à l'orniérage et une résistance à la fatigue supérieures aux enrobés de base conventionnels (Bitume Québec, 2014; Di Benedetto et al., 2005; Espersson, 2014). En France, ces performances supérieures s'expliquent par l'utilisation de bitumes durs et d'un squelette granulaire dense et continu permettant de hauts taux de compaction (Bitume Québec, 2014; Di Benedetto et al., 2005; Espersson, 2014; Setra-LCPC, 1994). En régions froides, le bitume dur doit être remplacé par un bitume mou hautement modifié atteignant un grade de performance élevé : PG 88-28 (*Performance Grade*) (Bitume Québec, 2014). Les EME

s'utilisent en couche de base et de liaison (§1.3)(Bitume Québec, 2014; Setra-LCPC, 1994). Ils procurent un apport structural important aux structures de chaussée et s'appliquent aux constructions neuves, aux renforcements et aux réfections (Bitume Québec, 2014). Ainsi ils sont bien adaptés aux routes à trafic agressif : trafic lourd important, voies lentes ou autre. Par rapport aux enrobés conventionnels, les EME permettent une réduction d'épaisseur à durée de vie égale ou une augmentation de la durée de vie à épaisseur égale (Bitume Québec, 2014; Di Benedetto et al., 2005).

1.2.1 Formulation des EME : Aspects volumétriques

L'enrobé à module élevé, comme tout enrobé bitumineux classique, est constitué d'un mélange de granulats (pierre, criblure, sable et filler) et d'un liant bitumineux. Les granulats forment le squelette granulaire et dictent, en grande partie, la rigidité de l'enrobé. De son côté, le liant bitumineux assure la cohésion et confère le comportement viscoélastique à l'enrobé. En termes de masse, les granulats et le bitume représentent respectivement autour de 95 % et 5 %. Une fois mis en place et compacté, un troisième composant, l'air, vient influencer le comportement mécanique de l'enrobé bitumineux. La composition volumétrique d'un enrobé bitumineux compacté est présentée à la Figure 1.1.

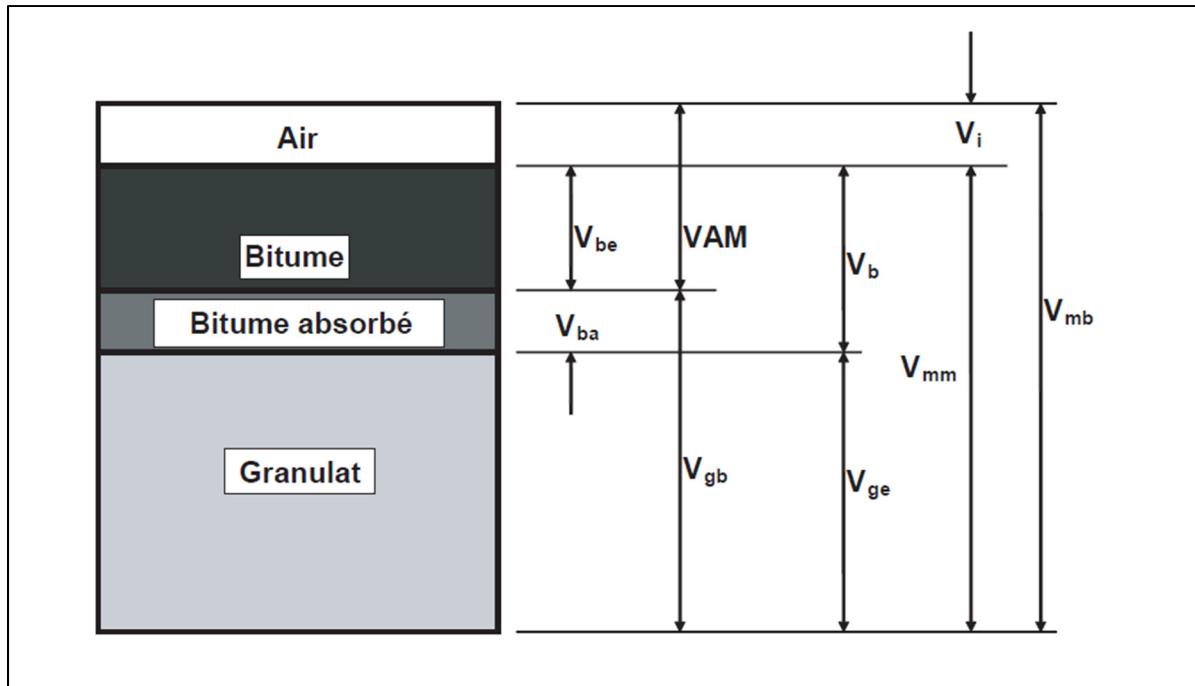


Figure 1.1 Composition volumétrique d'un enrobé bitumineux compacté
Tirée de MTQ (2005)

Avec :

- VAM : Volume des vides entre les grains du granulat de l'enrobé compacté
(Voids of Aggregate Mineral)
- V_{mb} : Volume brut de l'enrobé compacté
- V_{mm} : Volume de l'enrobé sans vides interstitiels
- V_{be} : Volume de bitume effectif
- V_i : Volume des vides interstitiels
- V_b : Volume de bitume total
- V_{ba} : Volume de bitume absorbé
- V_{gb} : Volume brut du granulat
- V_{ge} : Volume effectif du granulat

1.2.2 Granulats

Étant donné la part importante des granulats dans la composition de l'enrobé bitumineux (95 % massique), ceux-ci nécessitent une attention particulière. Le squelette granulaire est formé du mélange homogène de différentes classes granulaires (d/D) dans des proportions précises. Ces classes granulaires se divisent en trois grandes catégories : les gros granulats ($d > 5$ mm), les granulats fins ($D < 5$ mm) et les fillers ($D < 630 \mu\text{m}$)(BNQ, 2014). Au Québec, les granulats doivent répondre à des exigences vis-à-vis leurs caractéristiques intrinsèques, de fabrication et complémentaires en fonction du type de construction (neuve ou resurfaçage), du type de route (autoroute, nationale ou régionale et collectrice), du débit journalier moyen annuel (DJMA) et de la couche (surface ou base)(MTQ, 2012). Puisque les EME sont utilisés pour des chaussées fortement sollicitées en couche de base, le cas le plus critique est ici présenté : autoroute à très haut DJMA. Ainsi, la catégorie 2c serait exigée pour les gros granulats et la catégorie 1 serait exigée pour les granulats fins (MTQ, 2012). C'est ce qui serait exigé pour les granulats d'une GB 20 mm (GB-20) ou tout autre enrobé utilisé en couche de base. Pour l'EME-14, Bitume Québec (2014) recommande une catégorie 2a pour les gros granulats et la catégorie 2 pour les granulats fins. Ainsi, les gros granulats de l'EME-14 ont les mêmes exigences au niveau de la résistance à l'usure (Micro-Deval) et aux chocs (Los Angeles) et une exigence plus élevée concernant les caractéristiques de fabrication (fragmentation, particules plates et particules allongées) que celles d'une GB-20. Les exigences pour les granulats fins de l'EME-14 au niveau de la résistance à l'usure (MD) et de friabilité sont plus faibles que celles exigées pour une GB-20. Ceci s'explique par la volonté des entreprises d'utiliser des granulats fins aux spécifications plus permissives, sans toutefois nuire aux performances exemplaires de l'EME. En France, les exigences pour les caractéristiques des granulats sont en fonction de la classe du trafic et de l'usage de l'enrobé bitumineux (liaison ou base et fondation)(IDRRIM, 2013). En ce sens, à trafic égal, les exigences sont les mêmes pour une GB et un EME.

1.2.3 Liants bitumineux

Même s'il ne représente que 5 % massique de la composition l'enrobé bitumineux, le liant bitumineux joue un rôle crucial autant sur le comportement mécanique que sur le prix de celui-

ci. Effectivement, c'est le liant qui confère le comportement viscoélastique à l'enrobé bitumineux et qui assure son imperméabilité et sa cohésion (Lamothe, 2014).

Cette cohésion est variable selon les sollicitations thermiques (climat) et les sollicitations mécaniques (trafic) (Corté & Di Benedetto, 2004). En d'autres mots, le liant bitumineux est doté d'une susceptibilité thermique et cinétique. Cette susceptibilité thermique fait passer le liant à travers une gamme de consistances qui impacte sur le comportement mécanique de l'enrobé. À très haute température, le liant est un liquide newtonien peu visqueux et l'enrobé est, ainsi, malléable. À très basse température, le liant est un solide vitreux élastique et fragile. Entre ces deux limites, le liant présente un comportement viscoélastique (Sohm, 2011). La Figure 1.2 présente l'évolution du comportement du bitume en fonction de la température. De son côté, la susceptibilité cinétique correspond à des changements de comportement du bitume en fonction du temps d'application des charges. Ceci dit, le liant doit assurer la bonne résistance de l'enrobé bitumineux à l'ornièrage (à haute température), à la fatigue (à température moyenne) et à la fissuration thermique (à basse température) (Sohm, 2011).

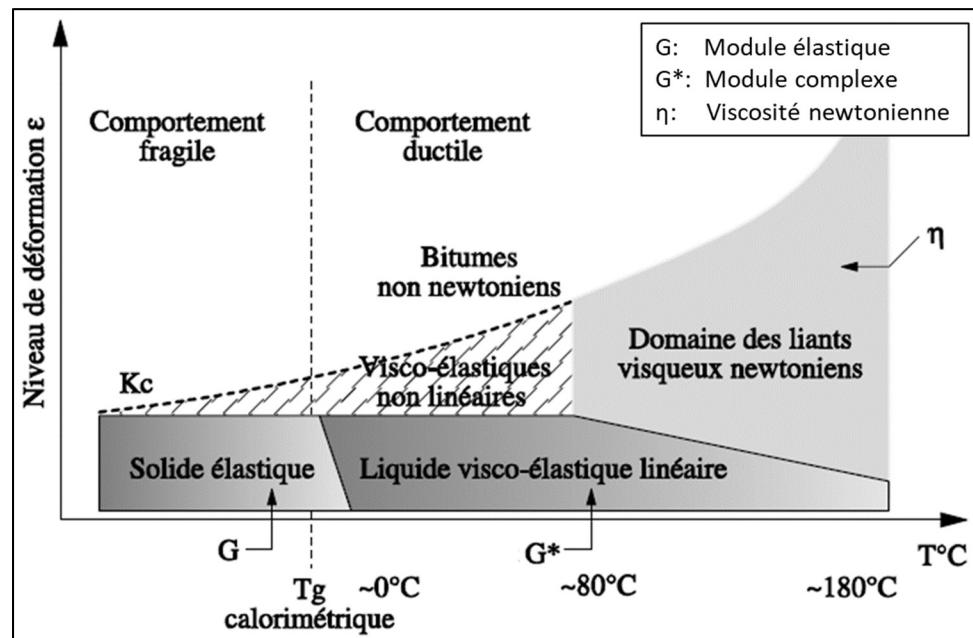


Figure 1.2 Comportement du bitume en fonction de la température
Tirée de Di Benedetto et Corté (2004)

En France, ce sont des bitumes purs et très durs qui sont utilisés pour la formulation des EME. Pour les régions froides, l'utilisation de ces bitumes durs n'est pas envisageable puisqu'ils mèneraient à une fissuration thermique importante, ruinant ainsi la chaussée dès le premier hiver. Ce n'est que depuis peu qu'il est envisageable de produire un bitume modifié au polymère permettant d'obtenir des performances à température élevée (T_e , $[H]igh$) comparable à celle des bitumes durs français tout en conservant de bonnes résistances à température basse (T_b , $[L]ow$). Le bitume ainsi produit présente une très grande plage d'utilisation avec un excellent grade de performance (PG H-L) : PG 88-28 (Bitume Québec, 2014).

1.2.4 Formulation

La formulation des enrobés bitumineux consiste à déterminer et optimiser la proportion de ses différents constituants (granulats et bitume) en vue de respecter différents critères de performance (Di Benedetto et al., 2005). Cette vérification des performances visées se fait par l'entremise de différents essais de laboratoire qui mettent en lumière le comportement et les caractéristiques de l'enrobé. Puisque l'amélioration de la performance d'un critère se fait habituellement au détriment d'un autre (exemple : l'augmentation de la teneur en bitume augmente la résistance en fatigue, mais réduit la résistance à l'orniérage), l'optimisation consiste en un compromis permettant de respecter tous les critères (Perraton, 2012).

N'étant pas encore normalisé au Québec, Bitume Québec propose, pour l'EME, une formulation et des critères de performance se rapprochant de ce qui est habituellement fait par le Laboratoire des chaussées (LC) (Tableau 1.1). En plus des critères classiques, Bitume Québec propose des critères de performance concernant le comportement rhéologique de l'EME : module complexe, résistance à la fatigue et résistance au retrait thermique empêché (Bitume Québec, 2014). Ces nouveaux critères permettent d'amener la formulation à un niveau supérieur. De plus, la connaissance du comportement rhéologique permettrait l'utilisation de logiciels de dimensionnement mécaniste empirique (ME).

Tableau 1.1 Critères de performance de l'EME-14
Adapté de Bitume Québec (2014)

Critères de performance classiques - Méthode LC		
Type d'enrobé	EME-14	Méthode d'essai
Usages	Couche de base et de liaison	NA
Nombre minimal de classes granulaires distinctes à utiliser	NA	
Tamis	(% passant)	
Fuseau granulométrique*	28 mm	100
	20 mm	100
	14 mm	90-100
	10 mm	80-90
	5 mm	58-70
	2,5 mm	40-52
	80 µm	8-16
	2,5 mm	NA
Zone de restriction	1,25 mm	NA
	630 µm	NA
	315 µm	NA
	Vides à 10 girations (%)	≥ 11,0
Résistance à l'ornierage sur plaques de 100 mm à 60°C à 30 000 cycles (% max. de déformation)	Vides à 100 girations (%)	4,0 à 7,0
	Vides à 200 girations (%)	≥ 2,0
	Compacité (% min.)	≥ 93,0
Tenue à l'eau (% min.)		≤ 5,0
Tenue à l'eau (% min.)		≥ 75,0
Critères de performance supplémentaires		
Grade de bitume	PG 88-28	NA
Teneur en bitume minimale (%)	3,75 massique	LC 26-006
Module dynamique $ E^* $ en traction-compression directe		
(10°C;10Hz) (MPa)	≥ 14 000	LC 26-700
(15°C;10Hz) (MPa)	≥ 11 000	
Résistance à la fatigue en traction-compression directe $N_{f50\%}$ (10°C;10Hz)		
ε_6 (µm/m)	≥ 130	Mode opératoire ÉTS
Résistance au retrait thermique empêché (TSRST)		
Température de rupture (°C)	≤ -28,0	AASHTO TP10-93

*À titre indicatif seulement

LC 26-007
LC 26-350

LC 26-003

LC 26-320

LC 26-410

AASHTO T283 / LC 26-001

LC 26-700

ÉTS

1.2.5 Comportements mécaniques

La Figure 1.3 illustre le domaine de chacun des quatre types de comportement de l'enrobé (Di Benedetto et al., 2005) :

- le comportement non-linéaire, qui se produit à haute amplitude de déformation et pour un faible nombre de cycles de chargement, traduit une non linéarité entre les déformations et les contraintes;
- le comportement viscoélastique linéaire (VEL), qui se produit pour des déformations de faible amplitude ($\varepsilon < 100 \mu\text{m/m}$) et un faible nombre de cycles de chargement ($N < 100$), traduit une quasi-linéarité entre la déformation et la contrainte. Le module complexe (E^*) de l'enrobé bitumineux est déterminé dans ce domaine;
- le comportement en fatigue, qui se produit pour des déformations de faible amplitude ($\varepsilon \approx [50; 200] \mu\text{m/m}$) et un nombre élevé de cycles de chargement ($N > 10 000$), traduit une dégradation de l'enrobé en fonction du nombre de cycles. C'est le phénomène de fatigue;
- le comportement irréversible, qui se produit pour des sollicitations près de la limite de rupture, traduit une accumulation des déformations permanente. C'est le phénomène d'orniérage.

À la Figure 1.3, il faut noter que la température influence la position de la ligne rouge. Le dimensionnement ME en fatigue d'une chaussée peut se faire lorsque le comportement viscoélastique linéaire et en fatigue sont connus. Ces deux comportements sont abordés plus en détail dans les sections 1.2.6 et 1.2.7.

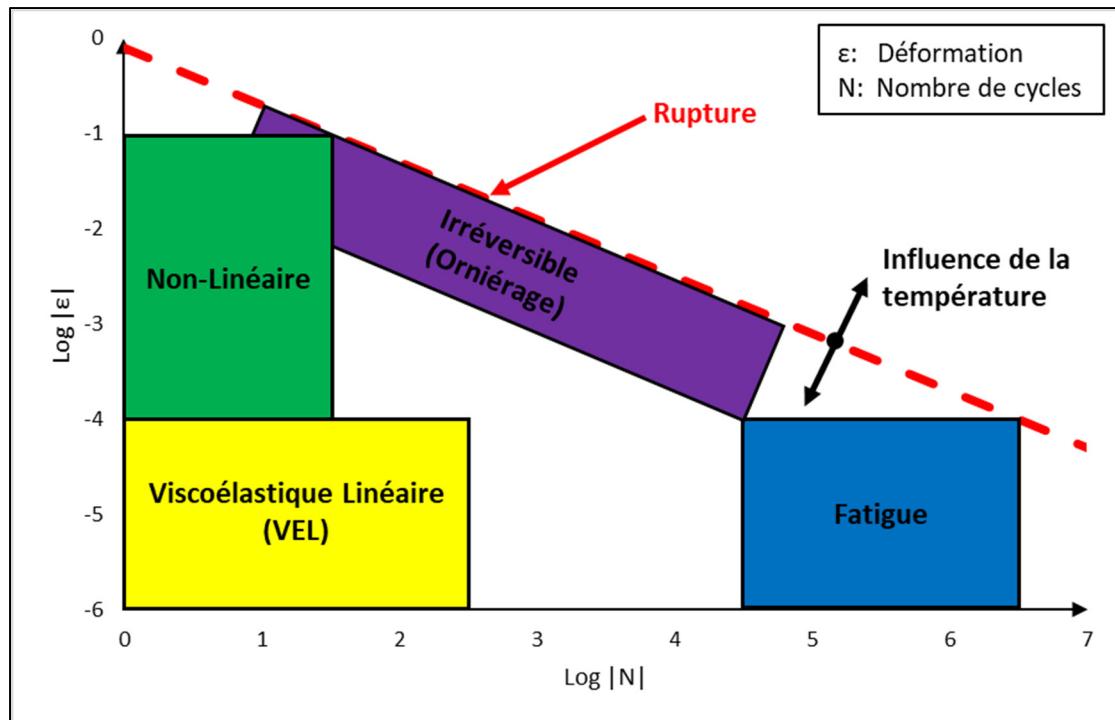


Figure 1.3 Comportements mécaniques des enrobés bitumineux
Adaptée de Di Benedetto et al. (2005)

1.2.6 Comportement viscoélastique linéaire (VEL) : Module complexe (E^*)

Pour les méthodes de dimensionnement ME, la prise en compte de l'évolution de la raideur des matériaux bitumineux suivant la température et la fréquence de chargement est au premier plan et influence directement le dimensionnement des chaussées. C'est le module complexe (E^*) qui permet de traduire cette évolution de la raideur du matériau bitumineux suivant la température et la fréquence de sollicitation. Effectivement, le module complexe intervient dans le calcul des contraintes et des déformations des structures modélisées (modèles multicouches élastiques linéaires isotropes) sous forme du module de Young (E) de l'enrobé bitumineux pour une fréquence (effet du trafic) et une température (effet du climat) données (ex : $E = |E^*|@[10^\circ\text{C}; 10\text{Hz}]$)(Di Benedetto et al., 2005). Il devient donc primordial de caractériser l'influence couplée des sollicitations mécaniques et thermiques sur la rigidité de l'enrobé bitumineux, car celle-ci dicte l'effet structural de la couche d'enrobé bitumineux.

La notion de module complexe à l'échelle du matériau impose l'hypothèse d'un matériau continu, isotrope, viscoélastique linéaire et thermosensible (Di Benedetto et al., 2005). L'ensemble de ces hypothèses visent à simplifier le comportement VEL décrit par le module complexe.

Le module complexe peut se déterminer par l'application d'un chargement quasi statique, d'un chargement sinusoïdal ou d'un chargement cyclique non sinusoïdal (Di Benedetto et al., 2005). La section 1.2.6.1 présente plus en détail différentes méthodes d'essai pour déterminer le module complexe. Les chargements sinusoïdaux permettent d'obtenir directement le module complexe :

Le module complexe E^* est le nombre complexe défini comme le rapport entre l'amplitude complexe de la contrainte sinusoïdale de pulsation ω appliquée au matériau $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$ et l'amplitude complexe de la déformation sinusoïdale qui en résulte en régime établi. Compte tenu du caractère viscoélastique du matériau, la déformation accuse un retard sur la contrainte, se traduisant par un angle de déphasage ϕ entre les deux signaux : $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)$. (Di Benedetto et al., 2005)

Le module complexe se définit alors :

$$E^*(t) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} \quad (1.1)$$

$$E^*(t) = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi_E)}} = |E^*| e^{i\phi_E} \quad (1.2)$$

Avec :

E^* Module complexe

$|E^*|$ Norme du module complexe, Module dynamique, Module de rigidité

σ_0 Amplitude de la contrainte

ε_0	Amplitude de la déformation
ω	Pulsation ($2\pi f$) (rad/s)
f	Fréquence (Hz)
ϕ_E	Angle de phase (compris entre 0 et $\pi/2$) où ($\phi_E = \omega * t_{lag}$)
i	Partie imaginaire du nombre complexe où $i^2 = -1$
t_{lag}	Déphasage entre σ_0 et ε_0

Pour les différents couples fréquence-température, les résultats expérimentaux ($|E^*|$, ϕ_E , E_1 et E_2) sont présentés sous quatre graphiques. Le graphique des courbes isothermes, en coordonnées bi-logarithmiques, présente le module dynamique en fonction de la fréquence pour les températures d'essais (Figure 1.4). Les pentes traduisent la susceptibilité cinétique de l'enrobé bitumineux (Di Benedetto et al., 2005). Bref, une forte pente signifie que l'enrobé est plus sensible à la fréquence et, inversement, une pente douce signifie que l'enrobé est moins sensible à la fréquence. Les résultats expérimentaux présentés sont ceux de l'éprouvette PL1-A1 testée dans le cadre de ce mémoire.

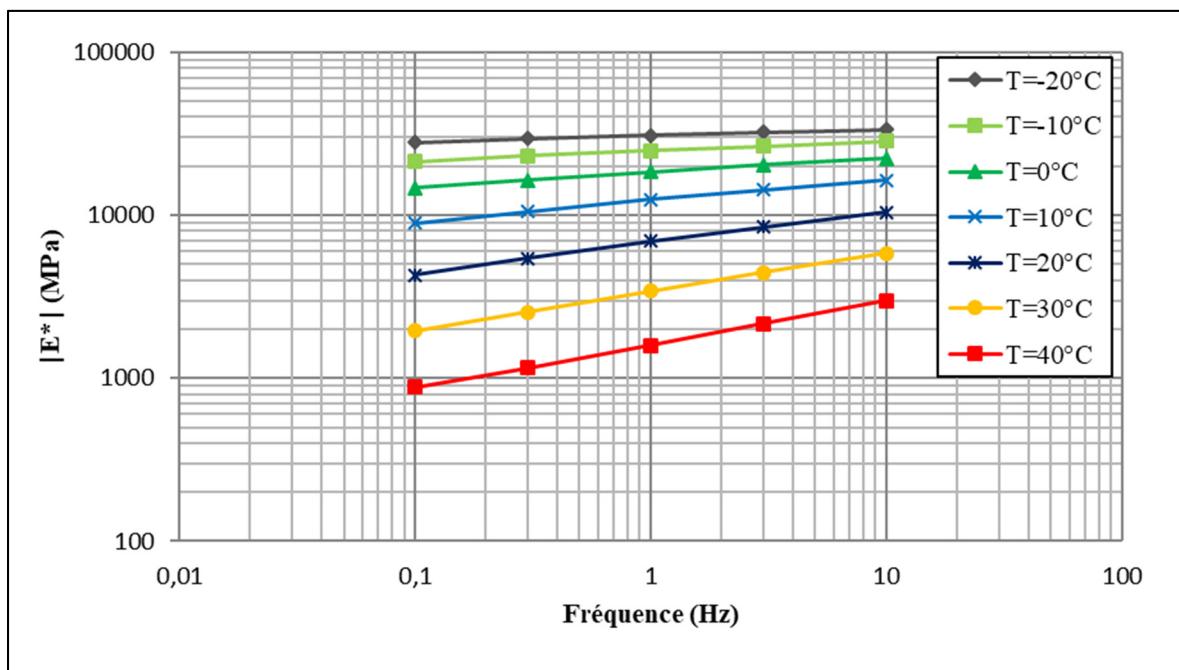


Figure 1.4 Courbes isothermes (Épr. PL1-A1)

Le graphique des courbes isochrones, en coordonnées semi-logarithmiques, présente le module dynamique en fonction de la température pour les fréquences d'essai (Figure 1.5). Ici, les pentes traduisent la susceptibilité thermique de l'enrobé bitumineux (Di Benedetto et al., 2005). Rapidement, une forte pente signifie que l'enrobé est plus sensible au changement de température et, inversement, une pente douce signifie que l'enrobé est moins sensible au changement de température.

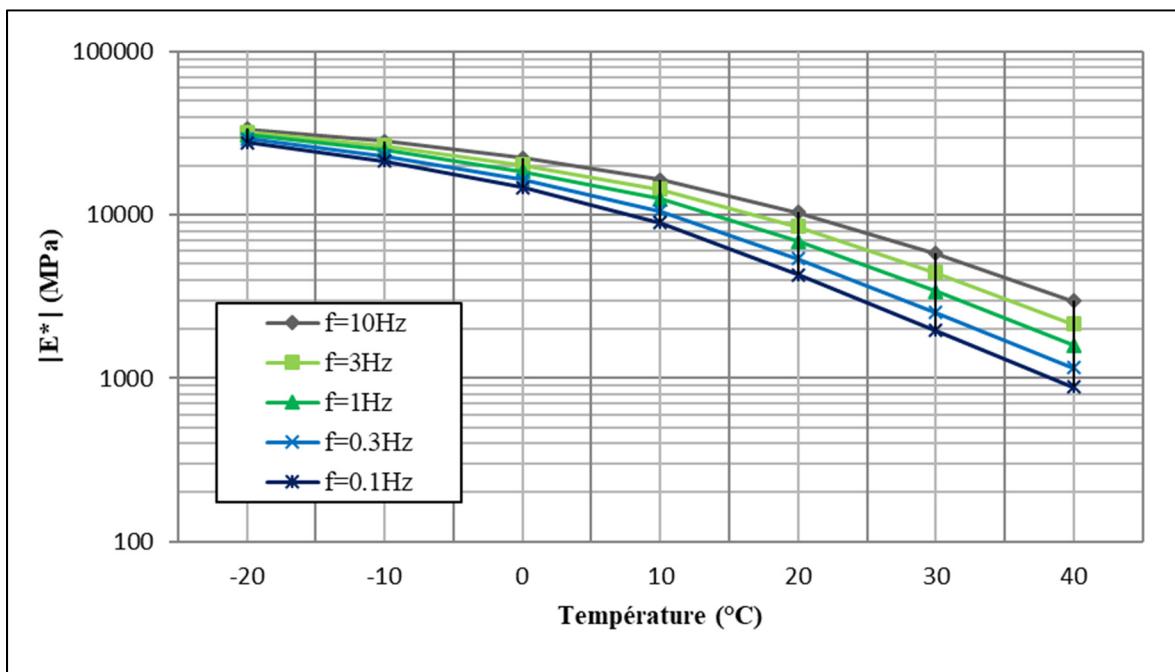


Figure 1.5 Courbes isochrones (Épr. PL1-A1)

Le graphique de la courbe dans le plan Cole-Cole présente, en abscisse, la composante élastique (E_1) et, en ordonnée, la composante visqueuse (E_2)(Figure 1.6). Si le principe d'équivalence temps-température (PETT) est respecté (§1.2.6.2), l'ensemble des points expérimentaux permettent le traçage d'une courbe unique (Di Benedetto et al., 2005). Enfin, cette courbe caractéristique à l'enrobé bitumineux permet le calage de modèles rhéologiques comme 2S2P1D. Le module dynamique ($|E^*|$) se calcule ainsi :

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (1.3)$$

Avec :

- $|E^*|$ Norme du module complexe, Module dynamique, Module de rigidité
- E_1 Module d'élasticité dynamique (composante élastique)
- E_2 Module de perte (composante visqueuse)

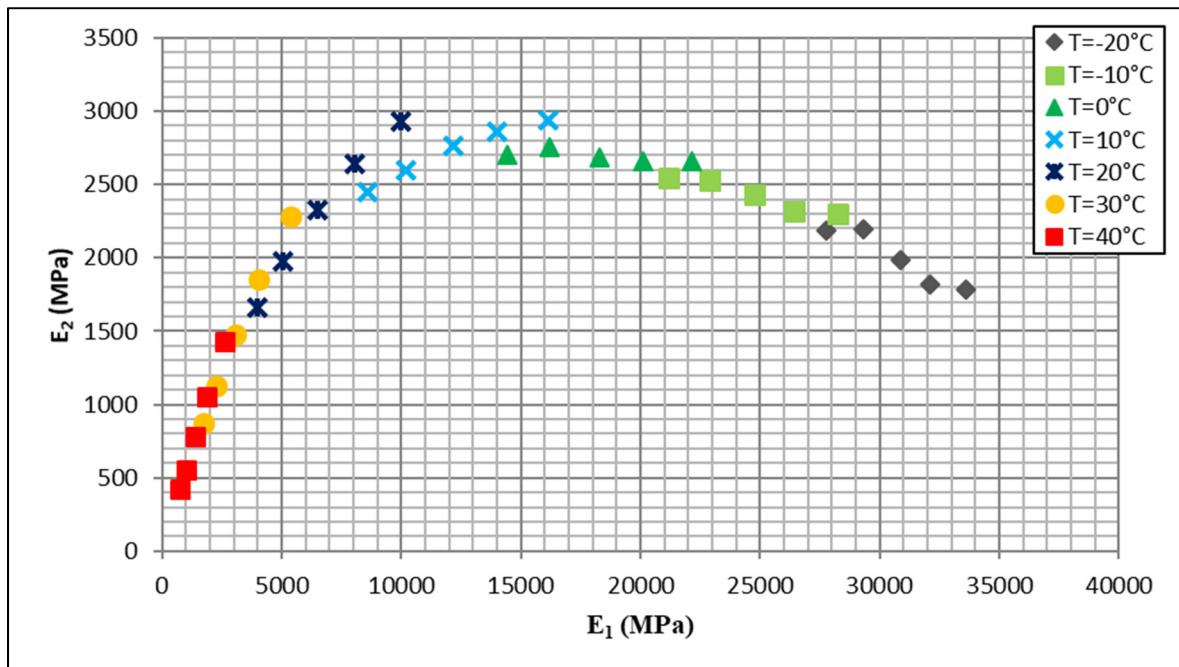


Figure 1.6 Courbe dans le plan Cole-Cole (Épr. PL1-A1)

Le graphique de la courbe dans l'espace de Black présente, en abscisse, l'angle de phase et, en ordonnée logarithmique, le module dynamique (Figure 1.7). Si le PETT est respecté, l'ensemble des points expérimentaux permettent le traçage d'une courbe unique (Di Benedetto et al., 2005). Cette courbe caractéristique sert également au calage de modèles rhéologiques.

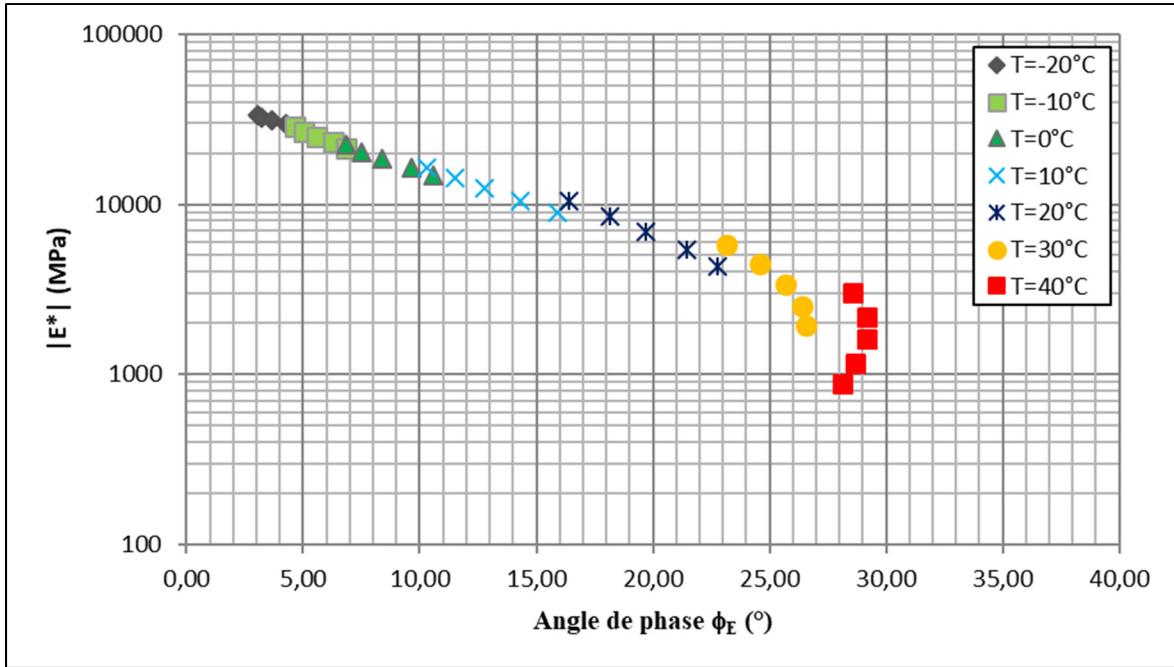


Figure 1.7 Courbe dans l'espace de Black (Épr. PL1-A1)

1.2.6.1 Mesure en laboratoire du module complexe (E^*)

Il existe plusieurs types d'essais pour définir le module complexe des enrobés bitumineux. Ces types d'essais sont définis plus en détail dans le Tableau 1.2 et le Tableau 1.3. Lorsque le type de chargement des essais est sinusoïdal (sine), le module complexe est directement obtenu. Les essais de module complexe peuvent être réalisés en conditions homogènes ou non homogènes. Un essai homogène facilite l'analyse des résultats. Effectivement, l'état de contrainte et de déformation est égal dans toute l'éprouvette, ainsi la détermination de la propriété mécanique se fait sans hypothèse complémentaire (Di Benedetto et al., 2005). De son côté, l'essai non homogène complexifie l'analyse des résultats. Puisque l'état de contrainte et de déformation varie au sein de l'éprouvette, la détermination de la propriété mécanique se fait par l'entremise d'hypothèses et de calculs plus ou moins complexes (Di Benedetto et al., 2005). L'ensemble des essais utilisés pour la détermination du module complexe sont dits de détermination. Les essais de détermination permettent de définir les propriétés mécaniques recherchées (ici le module complexe) par l'entremise d'une méthode théorique faisant appel à la modélisation de la structure et l'utilisation des lois de comportement de l'enrobé bitumineux. Les sollicitations

appliquées sur l'éprouvette, simples et définies, donnent accès à l'état de contrainte et de déformation de l'éprouvette (Di Benedetto et al., 2005).

Tableau 1.2 Récapitulatif des essais de module complexe utilisés dans le cadre du mémoire
Adapté de Di Benedetto et al. (2005) (Schémas de principe)

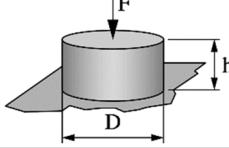
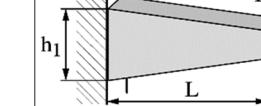
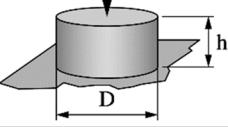
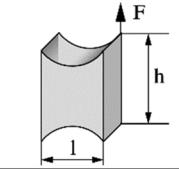
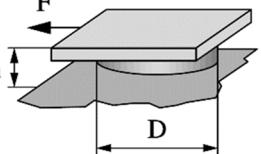
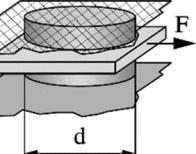
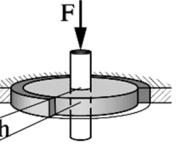
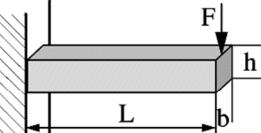
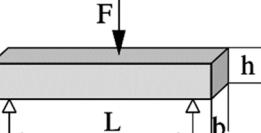
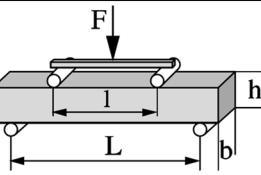
Essai	Traction-compression directe (TCD)	Flexion 2 points (2PB)	Traction-compression directe (TCD)
Norme	LC 26-700	NF P98-260-2	AASHTO T 342
Pays	Canada	France	États-Unis
Schéma de principe			
Type de chargement	Sinusoidal	Sinusoidal	Sinusoidal
État de contrainte et déformation	Homogène	Non-homogène	Homogène
Type d'interprétation considéré	Essai de détermination	Essai de détermination	Essai de détermination
Températures d'essai (°C)	-20; -10; 0; 10; 20; 30; 40	-10; 0; 10; 15; 20; 30	4; 20; T_{haute}
Fréquences d'essai (Hz)	0,1; 0,3; 1; 3; 10	1; 3; 10; 30	0,01; 0,1; 1; 10

Tableau 1.3 Récapitulatif des autres essais de module complexe
Adapté de Di Benedetto et al. (2005)

Essai	Schéma de principe
Essai de scission LCPC	
Essai de cisaillement à hauteur constante	
Shearing test machine	
Co-axial shear test	
Flexion 2 points (2PB)	
Flexion 3 points (3PB)	
Flexion 4 points (4PB)	

1.2.6.2 Principe d'équivalence temps-température (PETT)

Le module complexe varie en fonction de la température (T), la fréquence de sollicitation et, par le fait même, la pulsation (ω). Pour avoir une signification, chaque valeur de module dynamique doit être associée à un couple fréquence-température. C'est en observant les

courbes isothermes qu'il est possible de voir qu'une même valeur de module dynamique peut être associée à différents couples fréquence-température. Ainsi, il est possible de constater qu'une augmentation de la fréquence a un effet équivalent à une diminution de la température et vice-versa, qu'une diminution de la fréquence a un effet équivalent à une augmentation de la température et vice-versa.

Lorsque les points expérimentaux forment des courbes uniques dans le plan Cole-Cole et l'espace de Black, deux espaces indépendants de la fréquence et de la température, l'enrobé bitumineux respecte ainsi le principe d'équivalence temps-température (PETT). Le matériau est dit thermorhéologiquement simple (Di Benedetto et al., 2005). La grande utilité de ce principe est de tracer une courbe unique, dite maîtresse, du module dynamique en fonction d'une fréquence réduite ($\log|E^*|$; $\log(Fr\text{-}éq)$) pour une température de référence (T_R), habituellement 10°C (Figure 1.8). Cette courbe unique prend forme avec la translation des différentes isothermes suivant l'axe des abscisses. De cette manière, il est possible d'extrapoler des raideurs pour atteindre des fréquences inatteignables en laboratoire. Le module dynamique peut alors s'exprimer seulement en fonction de la fonction de translation a_T (Di Benedetto et al., 2005) :

$$|E^*|(\omega; T) = |E^*|(\omega * f(T)) = |E^*|(\omega * a_T; T_R) \quad (1.4)$$

Avec :

$ E^* $	Norme du module complexe, Module dynamique, Module de rigidité
ω	Pulsation ($2\pi f$) (rad/s)
T	Température
a_T	Fonction de translation ($a_T(T) = f(T)/f(T_R)$ et $a_{TR} = 1$)
T_R	Température de référence

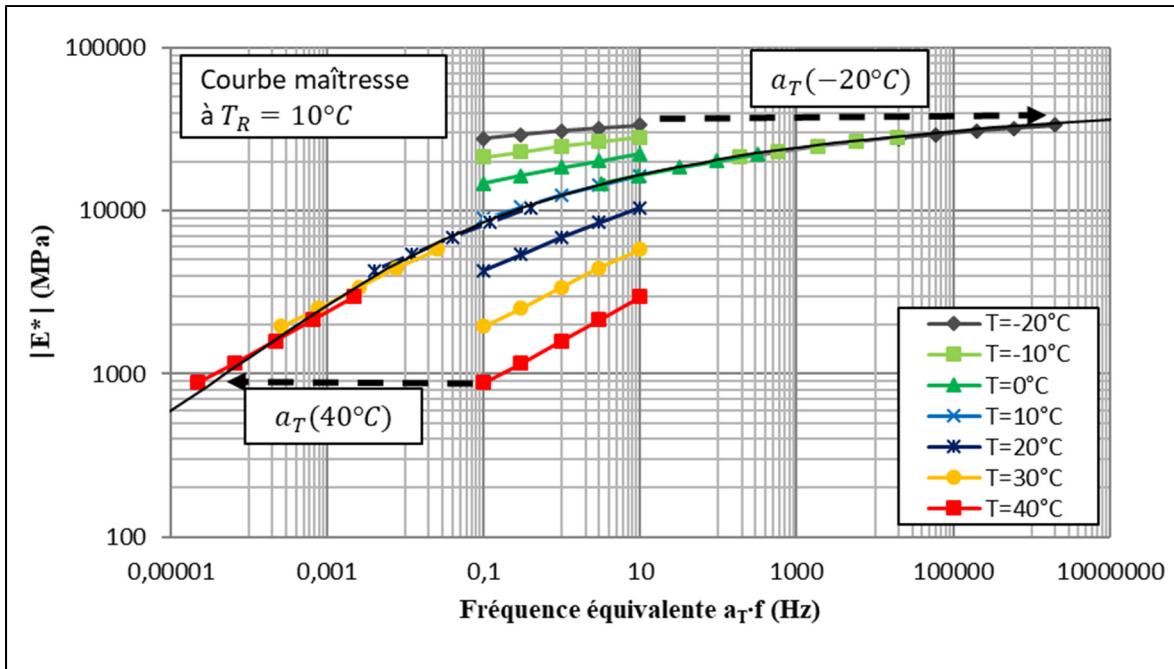


Figure 1.8 Courbe maîtresse $T_R = 10^\circ\text{C}$ (Épr. PL1-A1)

La fonction de translation peut s'exprimer de différentes manières. La loi WLF propose (Williams, Landel, & Ferry, 1955):

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T_i - T_R)}{C_2 + (T_i - T_R)} \quad (1.5)$$

Avec :

C_1 et C_2 Constantes de l'enrobé bitumineux

T_i Température i

T_R Température de référence

1.2.6.3 Modélisation 2S2P1D du module complexe (E^*)

Pour modéliser le comportement de l'enrobé bitumineux dans le domaine des petites déformations, soit son comportement VEL, plusieurs modèles rhéologiques sont disponibles.

Le modèle 2S2P1D, composé de deux ressorts (2 Springs) (E_{00} et E_0-E_{00}), deux éléments

paraboliques (2 *Parabolic Elements*) (k et h) et d'un amortisseur (1 *Dashpot*) (η), est le plus polyvalent puisqu'il permet de modéliser le module complexe de l'ensemble des matériaux bitumineux : le bitume, le mastic et l'enrobé bitumineux (Di Benedetto et al., 2005)(Figure 1.9).

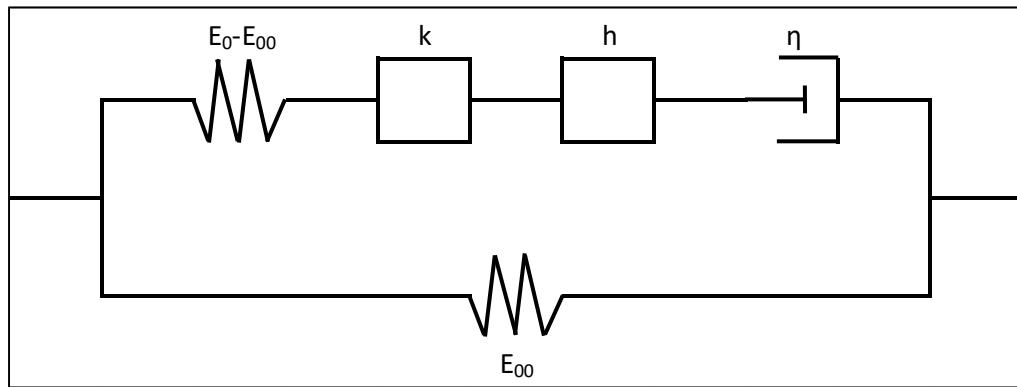


Figure 1.9 Modèle rhéologique 2S2P1D
Adaptée de Olard (2003)

Le modèle 2S2P1D est une généralisation du modèle de Huet-Sayegh par l'ajout d'un amortisseur linéaire (Newtonien) en série avec les deux éléments paraboliques et le ressort $E_0 - E_{00}$. Cet ajout permet une modélisation plus précise du comportement purement visqueux, c'est-à-dire, aux hautes températures et/ou aux faibles fréquences (Di Benedetto et al., 2005). Le module complexe sous le modèle 2S2P1D se présente sous la forme suivante (Olard, 2003):

$$E^*(i\omega\tau_E) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (1.6)$$

Avec :

k et h	Exposants tel que : $0 < k < h < 1$
E_0	Module vitreux ($\omega \rightarrow \infty$)(Fréquences élevées et/ou températures basses)
E_{00}	Module statique ($\omega \rightarrow 0$)(Fréquences basses et/ou températures élevées)
δ	Constante sans dimension
β	Paramètre lié à l'amortisseur Newtonien : $\eta = (E_0 - E_{00}) * \beta * \tau$
τ_E	Constante de temps, dépend de la température de calcul

Lorsque l'enrobé bitumineux est thermorhéologiquement simple et que le PETT est respecté, τ_E est exprimé en fonction de a_{TE} :

$$\tau_E(T) = a_{TE}(T) \cdot \tau_{0E} \quad (1.7)$$

Avec :

$$\tau_{0E} = \tau_E(T_R) \quad (1.8)$$

Comme a_{TE} est caractérisé par les constantes C_1 et C_2 de la loi WLF, la calibration du modèle consiste à limiter l'erreur entre les points expérimentaux et le modèle en déterminant la valeur des sept paramètres de base (E_0 , E_{00} , k , h , β , δ et τ), de C_1 et de C_2 .

Le coefficient de Poisson complexe (ν^*) peut également s'exprimer en fonction du modèle 2S2P1D (Nguyen, 2009; Perraton, Di Benedetto, Sauzéat, Nguyen, & Pouget, 2018):

$$\nu^*(i\omega\tau_v) = \nu_{00} + \frac{\nu_0 - \nu_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_v)^{-k} + (i\omega\tau_v)^{-h} + (i\omega\beta\tau_v)^{-1}} \quad (1.9)$$

Avec :

k et h Exposants tel que : $0 < k < h < 1$

ν_0 Coefficient de Poisson vitreux ($\omega \rightarrow \infty$)(Fréquences élevées et/ou températures basses)

ν_{00} Coefficient de Poisson statique ($\omega \rightarrow 0$)(Fréquences basses et/ou températures élevées)

δ Constante sans dimension

β Paramètre lié à l'amortisseur Newtonien : $\eta = (E_0 - E_{00}) * \beta * \tau$

$$\gamma_{Ev} = \frac{\tau_E}{\tau_v} = \frac{1}{30}$$

Lorsque l'enrobé bitumineux est thermorhéologiquement simple et que le PETT est respecté, τ_v est exprimé en fonction de a_{Tv} :

$$\tau_v(T) = a_{Tv}(T) \cdot \tau_{0v} \quad (1.10)$$

Avec :

$$\tau_{0v} = \tau_v(T_R) \quad (1.11)$$

1.2.7 Fatigue

«Le phénomène de fatigue d'un matériau se caractérise par sa rupture après application répétée d'un grand nombre de sollicitations (en pratique $N > [10 000 cycles]$) dont l'amplitude [de sollicitation] est inférieure à celle conduisant à la rupture au premier chargement» (Di Benedetto et al., 2005). Dans une chaussée bitumineuse, c'est le passage répété des véhicules, particulièrement les véhicules lourds, qui crée des sollicitations sous forme de traction et de compression à la base des couches du revêtement (Baaj, 2002). La rupture, caractérisée par une fissuration par fatigue, survient à la suite d'une accumulation de dommage qui dégrade le matériau. Cet endommagement se traduit par une chute du module dynamique $|E^*|$ en fonction du nombre de cycles. C'est à température moyenne (0 à 45°C) que le phénomène de fatigue devient le mode prépondérant de dégradation d'une chaussée bitumineuse (Bahia & Anderson, 1995).

1.2.7.1 Mesure en laboratoire de la résistance à la fatigue

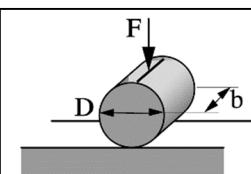
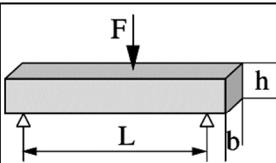
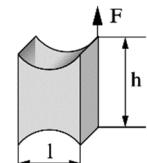
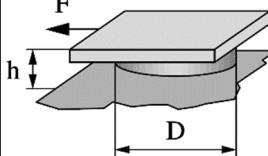
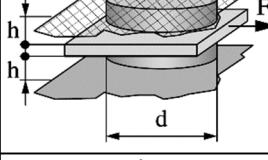
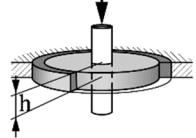
En laboratoire, l'objectif des essais de fatigue est de quantifier la résistance des enrobés bitumineux sous l'effet de sollicitations répétées. Cette «résistance à la fatigue pour N cycles de sollicitations [correspond à] la valeur de la sollicitation conduisant à la rupture pour N cycles» (Di Benedetto et al., 2005). Les essais de laboratoire consistent à simuler le comportement d'une couche de chaussée en fatigue en imposant sur une éprouvette de matériau des sollicitations répétées (Di Benedetto et al., 2005). De manière générale, les essais de fatigue sont semblables à ceux de module complexe. En effet, très souvent, les chargements sont

sinusoïdaux et demeurent dans le domaine VEL. Trois types d'essais existent : les essais en flexion, les essais de traction (et traction-compression) et les essais en cisaillement (Di Benedetto et al., 2005). Les essais de fatigue sont réalisés soit en contrôle de force (de contrainte pour les essais homogènes) ou en contrôle de déplacement (de déformation pour les essais homogènes). Le Tableau 1.4 fait le sommaire des essais de fatigue utilisés dans le cadre du mémoire : l'essai en flexion deux points (2 Points Bending : 2PB) et quatre points (4 Points Bending : 4PB) et l'essai de traction-compression directe (TCD). Le Tableau 1.5 fait le sommaire des autres essais de fatigue.

Tableau 1.4 Récapitulatif des essais de fatigue utilisés dans le cadre du mémoire
Schémas de principe tirés de Di Benedetto et al. (2005)

Essai	Traction-compression directe (TCD)	Flexion 2 points (2PB)	Flexion 4 points (4PB)
Norme	LCMB-ÉTS	NF EN 12697-24	AASHTO T 321-17
Pays	Canada	France	États-Unis d'Amérique
Schéma de principe			
Type de chargement	Sinusoïdal; Haversine	Sinusoïdal	Haversine
État de contrainte et déformation	Homogène	Non-homogène	Non-homogène
Type d'interprétation considéré	Essai de détermination	Essai de détermination	Essai de détermination
Logiciel ME associé	NA	Alizé-LCPC	AASHTOWare Pavement ME Design
$ E^* _0$	$ E^* $ au 100 ^{ème} cycle	$ E^* $ au 100 ^{ème} cycle	$ E^* $ au 50 ^{ème} cycle
Critère de rupture associé au logiciel	NA	$N_{f50\%}$	$N_{f(S^*N)max}$
Nbr. d'éprouvettes (niveaux x répétitions)	9 (3 x 3)	18 (3 x 6)	9 (3 x 3)
Température d'essai (°C)	10	10	20
Fréquences d'essai (Hz)	5; 10	25	10

Tableau 1.5 Récapitulatif des autres essais de fatigue
Adapté de Di Benedetto et al. (2005)

Essai	Schéma de principe
Essai de traction	
Traction indirecte	
Essai en flexion	
Flexion 3 points (3PB)	
Essais en cisaillement	
Essai de scission LCPC	
Essai de cisaillement à hauteur constante	
Shearing test machine	
Co-axial shear test	

1.2.7.2 Évolution d'un essai de fatigue

Pendant un essai de fatigue, les sollicitations répétées mènent à l'endommagement du matériau. Pour suivre cet endommagement, il faut poser l'hypothèse d'un endommagement homogène au sein du matériau. Cette hypothèse permet de quantifier l'endommagement via la mesure du module complexe (mesure macroscopique). Également, lors d'un essai de fatigue

différents phénomènes sont à l'œuvre. Il faut tenter d'isoler le phénomène de fatigue des phénomènes biaisants : l'échauffement, la thixotropie et la non-linéarité. L'évolution du module dynamique $|E^*|$ en fonction du nombre de cycles suit habituellement trois phases (Figure 1.10).

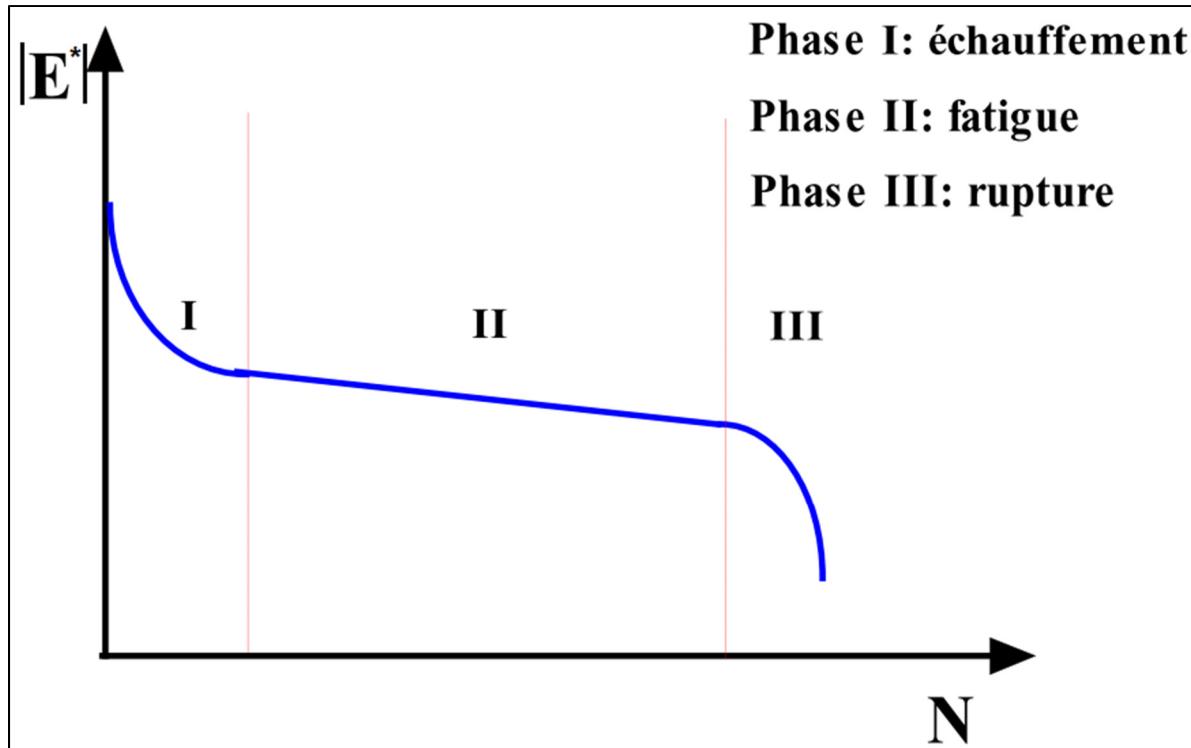


Figure 1.10 Évolution du module dynamique $|E^*|$ en fonction du nombre de cycles – Essai de fatigue
Tirée de Baaj (2002)

Phase I : Dans cette première phase, dite phase d'échauffement ou d'adaptation, la chute du module dynamique $|E^*|$ à vitesse décroissante est très fortement due aux phénomènes d'échauffement de l'éprouvette et de thixotropie du bitume. Il faut noter que ces deux phénomènes n'endommagent pas de manière permanente l'éprouvette. Effectivement, si l'essai était arrêté dans cette phase et qu'il était redémarré à nouveau, le module dynamique initial $|E^*|_0$ resterait le même.

Phase II : Dans cette deuxième phase, dite de fatigue, la chute du module dynamique $|E^*|$ est quasi-linéaire. C'est le phénomène de fatigue qui est prédominant. Au cours de cette phase, des microfissures apparaissent au sein du matériau.

Phase III : Dans cette troisième phase, dite de rupture, la chute rapide du module dynamique $|E^*|$ est non-linéaire. Cette chute est très difficile à interpréter de manière analytique et traduit l'apparition d'une ou de macrofissures. C'est l'accumulation des microfissures dans les phases précédentes qui donne naissance à cette macrofissure.

1.2.7.3 Critères de rupture en fatigue

Le type d'essai, le contrôle de l'essai (force ou déplacement) et la dimension des éprouvettes testées viennent affecter la durée de vie en fatigue (N_f) de l'enrobé bitumineux. D'un point de vue purement théorique, la durée de vie d'une éprouvette correspond au nombre de cycles N où le mode d'endommagement change de mécanisme, c'est-à-dire, la transition entre les phases II et III (Lamothe, 2014). Effectivement, dans la phase III, l'apparition de macrofissures invalide l'hypothèse de l'endommagement homogène au sein de matériau. Ainsi, le suivi de l'endommagement par l'entremise du module complexe n'a plus aucun sens physique.

Afin de cerner la transition des phases II et III, plusieurs critères de rupture existent. Le plus largement répandu est le critère de rupture classique $N_{f50\%}$, qui correspond au nombre de cycles menant à une réduction du module dynamique initial $|E^*|_0$ de 50 %. Un deuxième critère de rupture s'applique au suivi de l'angle de phase $N_{f\phi E_{max}-N}$ et correspond au nombre de cycles associé à la valeur maximale de l'angle de phase. Un troisième critère $N_{f\phi E_{max}-E^*}$ correspond au cycle associé au couple ($|E^*|; \phi_E$) qui forme le pic. D'autres critères existent et s'appliquent au suivi des mesures des différents extensomètres posés sur l'éprouvette. $N_{f\Delta ext}$ correspond au nombre de cycles où les déformations mesurées par un extensomètre s'éloignent de x % par rapport à la moyenne. $N_{f\Delta\phi ext}$ correspond au nombre de cycles où l'angle de phase mesuré par un extensomètre s'éloigne de x° par rapport à la moyenne.

Ultimement, il serait intéressant de trouver un critère de rupture permettant de trouver la même durée de vie indépendamment du type d'essai de fatigue. Ayant ainsi un espace commun, il serait possible d'établir des lois permettant de passer à la durée de vie d'un essai 2PB ou à celle d'un essai 4PB à partir d'un essai en TCD par exemple. De cette manière, il serait possible de ne réaliser qu'un seul type essai de fatigue pour, ensuite, transposer les résultats en 2PB ou en 4PB. Effectivement, il faut noter que chacune des méthodes de dimensionnement ME réfère à un type d'essai de fatigue et un critère de rupture bien précis.

1.2.7.4 Loi de fatigue (Droite de Wöhler)

Le comportement en fatigue d'un enrobé bitumineux se représente graphiquement dans un domaine bi-logarithmique mettant en ordonnée la durée de vie (N_f) et en abscisse l'amplitude de la sollicitation (ε_0) (Figure 1.11). Pour une même sollicitation, de grands écarts de durée de vie peuvent être observés. Il est possible d'atteindre un rapport d'un à dix entre la plus faible et la plus grande durée de vie. Ces écarts de durée de vie s'expliquent par l'hétérogénéité du matériau et le phénomène de fatigue lui-même. Il faut donc un grand nombre de répétitions à chacun des niveaux de sollicitation pour obtenir un ensemble de durées de vie représentatif du phénomène de fatigue de l'enrobé bitumineux. (Di Benedetto et al., 2005). De plus, il est important de réaliser les essais sur une plage d'amplitudes suffisamment grande.

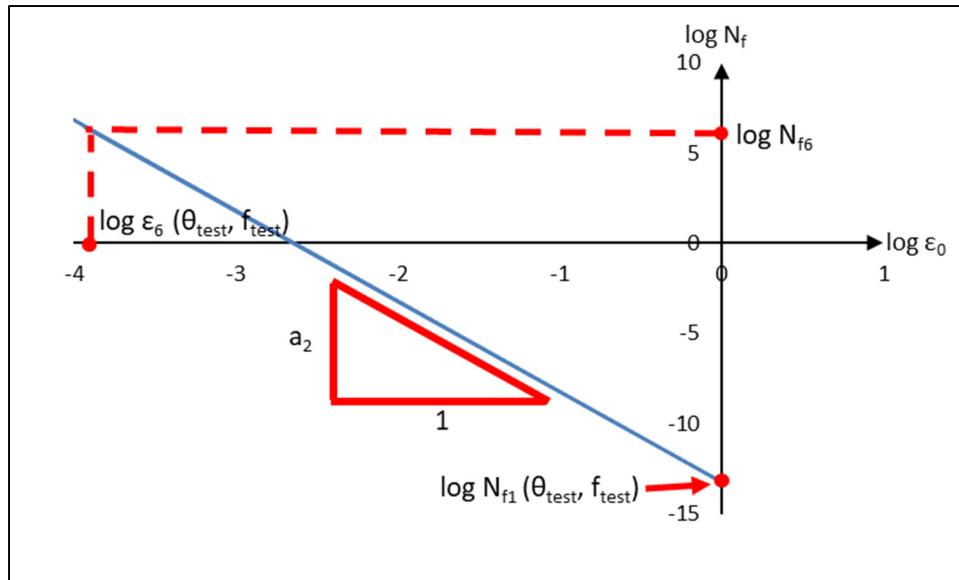


Figure 1.11 Représentation graphique et paramètres de la droite de Whöler

La loi de fatigue est donnée par l'équation suivante (Perraton, Di Benedetto, & Carter, 2011):

$$N_f = N_{f1}(\theta, f) * \epsilon_0^{-a_2} \quad (1.12)$$

Avec :

N_f	Nombre de cycles correspondant à la rupture du matériau en fatigue pour une déformation (ϵ_0), une température (θ) et une fréquence (f) données
$N_{f1}(\theta, f)$	Durée de vie pour une ϵ_0 de 1 m/m à θ et f
ϵ_0	Amplitude de déformation imposée (m/m) à θ et f
a_2	Coefficient représentant la pente de la droite de fatigue dans le domaine bi-logarithmique ($\log N_f$ vs $\log \epsilon_0$)

La température a un effet sur la durée en fatigue des enrobés bitumineux. «En première approximation pour les matériaux bitumineux[,] l'effet de la température translate simplement la droite de fatigue sans affecter la pente» (Perraton et al., 2011). L'équation qui suit traduit cet effet de la température en mettant en relation la variation de la durée de vie en fatigue avec la norme du module complexe :

$$N_f(\theta, f) = N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) * \varepsilon_0^{-a_2} * \left[\frac{|E^*(\theta, f)|}{|E^*(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})|} \right]^{-a_3} \quad (1.13)$$

Avec :

$N_f(\theta, f)$	Nombre de cycles correspondant à la rupture du matériau en fatigue pour une déformation (ε_0) à une quelconque température et fréquence (θ, f)
$N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})$	Durée de vie pour une ε_0 de 1 m/m conduit à la température et fréquence d'essai ($\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}$)
ε_0	Amplitude de déformation imposée (m/m) à θ et f
a_2	Coefficient représentant la pente de la droite de fatigue dans le domaine bi-logarithmique ($\log N_f$ vs $\log \varepsilon_0$)
a_3	Coefficient représentant la pente de la droite de la relation $\log N_{f1}$ vs $\log E^* $

1.2.7.5 Loi de cumul des dommages (Miner)

Pour modéliser l'endommagement de l'enrobé bitumineux, la loi de cumul des dommages de Miner est la plus utilisée. Elle permet de prédire la rupture du matériau en cumulant les dommages élémentaires associés à différentes sollicitations de niveaux différents (Di Benedetto et al., 2005). L'aspect chronologique des sollicitations n'a pas d'impact sur l'endommagement final. En effet, peu importe l'ordre dans lequel les différentes sollicitations de différents niveaux sont faites, l'endommagement final demeure le même. Lors de l'essai de fatigue, comme sur chantier, l'enrobé bitumineux est complètement détérioré lorsque le dommage D atteint un (1) ou 100 %. En ayant accès au module dynamique initial et au module dynamique au moment «n», il est possible d'établir l'endommagement d'un matériau. Ceci s'applique aussi bien sur le suivi d'un essai de fatigue que sur un suivi en chantier.

$$D = \frac{|E_0^*| - |E_n^*|}{|E_0^*|} \quad (1.14)$$

Avec :

D	Dommage
$ E_0^* $	Module dynamique initial
$ E_n^* $	Module dynamique au moment n

En référence à la droite de Wöhler et pour prendre en compte des sollicitations de niveaux différents, l'équation du dommage est la suivante :

$$D = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (1.15)$$

Avec :

D	Dommage
n_i	Nombre de cycles à la déformation i
N_{fi}	Nombre de cycles correspondant à la rupture du matériau à la déformation i

1.2.8 Orniérage

L'orniérage est le phénomène d'accumulation des déformations permanentes menant à la modification du profil transversal de la chaussée sous l'effet du trafic (Di Benedetto et al., 2005). L'orniérage n'est pas un aspect à négliger puisqu'il peut mettre en danger les usagers de la route. L'aquaplanage est un exemple de problème que la présence d'ornière peut amener.

Les facteurs menant à la présence d'ornière se divisent en deux catégories de paramètres : les paramètres de formulation et les paramètres de sollicitation. Les paramètres de formulation touchent davantage l'enrobé bitumineux lui-même. Effectivement, la nature et la teneur en bitume, la teneur en sable, la forme et la texture des particules, le type et la teneur en filler et la compacité du mélange sont de bons exemples d'aspects de formulation pouvant avoir un

impact direct sur la résistance à l'orniérage d'un enrobé bitumineux. Les paramètres de sollicitation sont plus en lien avec les facteurs environnementaux (température élevée, présence d'eau) et les conditions d'exploitation (vitesse lente, charges élevées et trafic intense).

Les ornières elles-mêmes sont séparées en deux catégories : les ornières à petit et à grand rayon (Perraton, 2012). Les ornières à petit rayon viennent généralement d'un problème lié aux enrobés bitumineux. Ces ornières se présentent sous trois catégories : les ornières de post-compaction, de fluage et d'usure (Lamothe, 2004). Celles de post-compaction ont lieu lorsque l'enrobé bitumineux mis en place présente une compacité trop faible. Ainsi, le trafic vient compacter l'enrobé en place. Les ornières de fluage viennent de la composante visqueuse du bitume qui fait fluer latéralement, sous les sollicitations du trafic, l'enrobé bitumineux (bitume et granulats). Ce type d'ornière mène à la présence de bourrelets à la surface de la chaussée. Enfin, les ornières d'usure ont lieu seulement en surface par polissage de l'enrobé bitumineux et l'arrachement et le désenrobage des granulats.

Les ornières à grand rayon viennent généralement d'un problème de tassement au niveau des couches structurelles non liées (Di Benedetto et al., 2005). Cinq principales causes peuvent mener à ce type d'orniérage (Lamothe, 2004):

1. Un sous dimensionnement vis-à-vis du trafic;
2. Une sous-compaction des matériaux de fondation et de sous-fondation;
3. Un mauvais drainage (présence d'eau);
4. Un sous dimensionnement vis-à-vis du gel-dégel;
5. Un tassement du sol d'infrastructure.

1.2.9 Fissuration thermique

La fissuration thermique est habituellement responsable des premières fissures transversales à la surface de la chaussée (Bitume Québec, 2014). La fissuration thermique s'explique par le comportement différentiel des composantes de l'enrobé bitumineux et du comportement différentiel de l'enrobé bitumineux et de la fondation face à une chute de température.

Effectivement, lorsque la température chute, le bitume tend à se contracter. Les granulats, qui compose l'enrobé bitumineux et qui se contractent très peu lors de la baisse de température, s'oppose à la contraction du bitume (Lachance Tremblay, 2014). À ceci s'ajoute l'effet de la fondation sur laquelle est posé, voire collé, l'enrobé bitumineux grâce à un liant d'imprégnation. Comme les granulats dans l'enrobé bitumineux, le matériau granulaire de la couche de fondation ne se contracte pratiquement pas lors d'une baisse de température. Ainsi, le retrait thermique empêché crée des efforts de tension dans l'enrobé bitumineux menant à sa fissuration. Perraton et Olard (2013) propose la définition suivante : «La variation volumétrique différentielle dans l'enrobé entre le granulat et le bitume engendre des concentrations de contraintes qui peuvent induire des microfissures dans le mastic lorsque cette tension atteint la résistance maximale en traction du bitume».

1.3 Structure de chaussée bitumineuse

C'est à l'échelle de la chaussée qu'un matériau innovant, avec des propriétés mécaniques supérieures, prend sa valeur. Des premières simulations peuvent être faites grâce à des méthodes de dimensionnement ME afin d'avoir une idée de son apport dans une structure de chaussée (Figure 1.12). Une structure de chaussée doit remplir différentes fonctions : être confortable et sécuritaire pour les usagers, être durable dans le temps, optimiser le prix de construction et les coûts d'entretien et respecter l'environnement (Carter & Perraton, 2018). Les structures de chaussées bitumineuses sont multicouches et chacune des couches joue un rôle bien précis (Setra-LCPC, 1994). Au niveau des couches de revêtement en enrobé bitumineux, il y a la couche de roulement, de liaison et de base. Celles-ci reposent sur le corps de la chaussée, habituellement composé de matériaux granulaires. Le corps de la chaussée se présente en deux parties : la fondation et la sous-fondation. Enfin, l'ensemble de la structure repose sur le sol support, aussi appelé infrastructure. L'objectif de la structure est de bien répartir les charges du trafic routier sur le sol support (Duong, 2017).

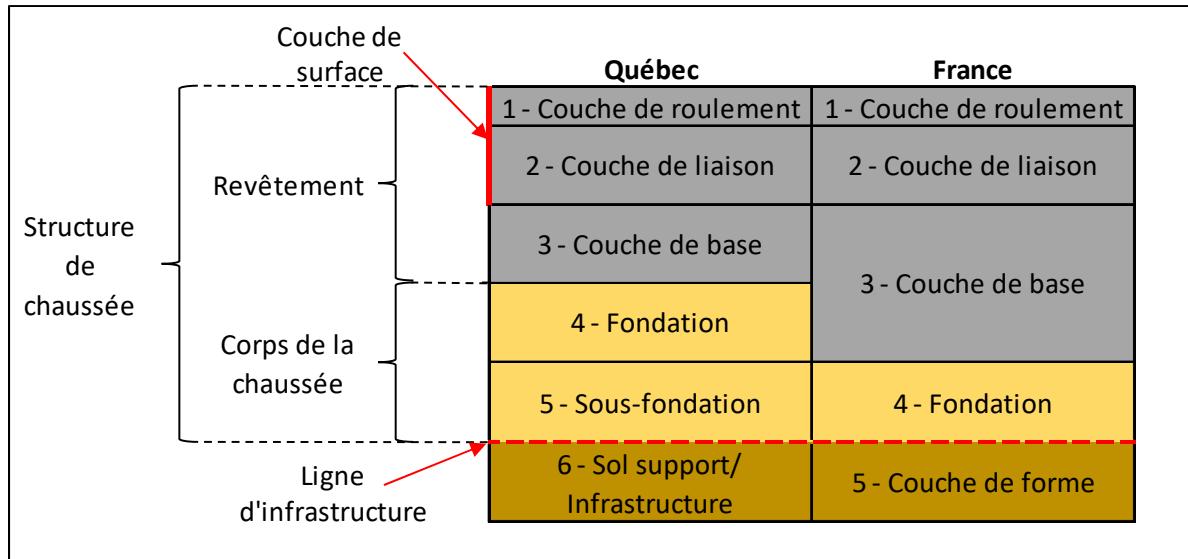


Figure 1.12 Structure d'une chaussée
Adaptée de J Corté & Goux (1994)

1.3.1 Couche de surface

La couche de surface est composée de la couche de roulement et de la couche de liaison. Puisqu'il est difficile de formuler un enrobé bitumeux qui rencontre toutes les exigences requises par une couche de surface, ces exigences sont réparties sur la couche de roulement et la couche de liaison (Setra-LCPC, 1994).

La couche de roulement est : «la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat» (Setra-LCPC, 1994). La fonction de la couche de roulement est d'assurer un confort de roulement et la sécurité des usagers. C'est par une bonne adhérence pneu-chaussée que cette sécurité est obtenue. Brièvement, l'enrobé de la couche de roulement doit avoir une macrotexture permettant un bon drainage de l'eau, évitant ainsi les risques d'aquaplanage, et une microtexture permettant une bonne adhérence avec le pneu (Carter & Perraton, 2018). Habituellement, l'épaisseur de la couche de roulement est assez mince. Parfois, elle est si mince qu'elle devient une simple couche d'usure avec pratiquement aucun apport structural.

La couche de liaison, qui n'est pas toujours présente, joue davantage un rôle de protection de la structure (Setra-LCPC, 1994). D'une part, elle est habituellement constituée d'un enrobé bitumineux plus rigide et d'une compacité élevée permettant d'éviter les ornières à faible rayon. De plus, elle permet d'étanchéiser la structure et de drainer les infiltrations d'eau afin de protéger les couches sous-jacentes et d'assurer l'intégrité structurale. Elle procure également une certaine protection thermique et limite/ralentit la montée des fissures de fatigue (Di Benedetto et al., 2005).

1.3.2 Couche de base

La couche de base, posée en épaisseur plus importante, assure plusieurs fonctions. D'une part, elle joue un rôle structural important dans la chaussée. En effet, elle permet de réduire les contraintes et déformations transmises au corps de la chaussée et au sol support par diffusion latérale (Di Benedetto et al., 2005). De cette manière, elle assure que les charges du trafic transmises n'induisent pas de déformation permanente ni à la fondation, la sous-fondation ni l'infrastructure (ornière à grand rayon) (Di Benedetto et al., 2005). D'autre part, il faut noter que les couches de revêtement sont liées par l'utilisation de liant d'accrochage. Ainsi, le revêtement devient un bloc monolithique à la base duquel les sollicitations répétées du trafic créent des efforts répétés de traction et de compression. C'est le phénomène de fatigue qui mène à une fissuration à la base de la couche de base. Ensuite, ces fissures montent jusqu'à la surface. De plus, par son épaisseur non négligeable, la couche de base amène une certaine protection au gel. Enfin, il devient évident qu'un enrobé bitumineux en couche de base nécessite les caractéristiques mécaniques suivantes : un module élevé et une excellente résistance en fatigue (Di Benedetto et al., 2005). C'est exactement ce que propose l'EME.

1.3.3 Types de sollicitation dans une chaussée bitumineuse

L'effet des sollicitations externes sur la structure de chaussée est complexe. Effectivement, cet effet traduit simultanément plusieurs phénomènes qui se produisent de manière couplée. Il y a des phénomènes mécaniques, thermiques, physiques et chimiques. Les deux sollicitations ayant le plus d'effet sur la chaussée sont les variations de température et le passage des

véhicules (Di Benedetto et al., 2005). Les variations de température extérieure créent des effets thermiques notables au sein de la structure de chaussée. Le passage des véhicules, aussi appelé l'effet du trafic, produit des contraintes et des déformations dans la chaussée. Ces deux effets (effet de la température et effet du trafic) seront détaillés dans les sections 1.3.3.1 et 1.3.3.2. Ces effets sont considérés comme nettement plus dommageables pour la structure de chaussée que les dégradations liées au vieillissement des matériaux et à l'effet de l'eau (Di Benedetto et al., 2005). Ceux-ci seront laissés de côté dans le présent mémoire.

1.3.3.1 Effet de la température

L'effet de la température se présente sous deux effets mécaniques principaux (Di Benedetto et al., 2005). Tout d'abord, la rigidité (module complexe) de l'enrobé bitumineux varie en fonction de la température. En effet, l'enrobé bitumineux est thermosensible. En bref, une température élevée tend à le ramollir et une température basse tend à le rigidifier. Le caractère visqueux de l'enrobé bitumineux dépend, à la fois, de la température et de la vitesse de chargement (effet du trafic) (Di Benedetto et al., 2005). De cette manière, les amplitudes des contraintes et déformations en traction et compression varient en fonction de la température. Ceci peut influencer sur la vitesse d'apparition des phénomènes de fatigue et d'orniérage.

Par ailleurs, les changements de températures créent des dilatations et des contractions thermiques dans les enrobés bitumineux. Ainsi, des contraintes et des déformations se créent au sein du matériau (Di Benedetto et al., 2005)(Figure 1.13). Ces contraintes thermiques sont particulièrement néfastes lors de températures très basses. À ces températures, il se produit le phénomène de fissuration thermique (§1.2.9). Brièvement, la chute de température crée des contraintes de traction dans l'enrobé bitumineux puisque son retrait thermique est empêché par les granulats qui le composent et par la couche de fondation. Les basses températures affectent aussi le caractère visqueux du matériau. Ainsi, à basse température, l'enrobé bitumineux est très peu visqueux et peine à dissiper rapidement les contraintes de traction. Lorsque ces contraintes de traction dépassent la résistance en traction du matériau, il y a fissuration thermique. Les fissures apparaissent et se propagent au fil des cycles thermiques rencontrés.

Sur chantier, celles-ci se présentent sous forme de fissures transversales à intervalle régulier (Carter & Perraton, 2018).

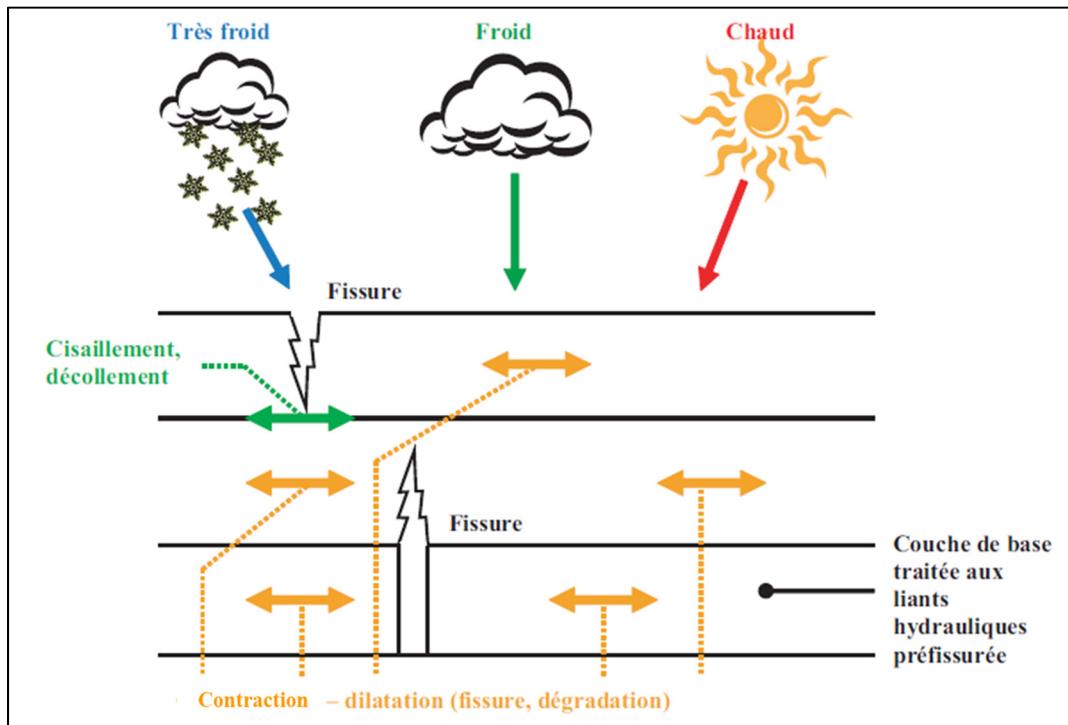


Figure 1.13 Schématisation des sollicitations induites par la température
Tirée de Sohm (2011) et adaptée de Di Benedetto et al. (2005)

1.3.3.2 Effet du trafic

C'est l'effet du passage des véhicules, presque exclusivement les véhicules lourds, qui induit des sollicitations dans la structure de chaussée. Les différentes couches de celle-ci subissent des écrasements, des efforts de compression et, seulement pour les couches liées, des efforts de tension (Di Benedetto et al., 2005) (Figure 1.14). L'amplitude de ces déformations cycliques demeure faible (≈ 50 à 200 $\mu\text{m}/\text{m}$). Très souvent, l'hypothèse du modèle utilisé pour calculer les champs de contraintes et déformations dans la chaussée est le modèle multicouche élastique linéaire isotrope. Ainsi, il devient nécessaire d'avoir accès au module dynamique, au coefficient de Poisson et à l'épaisseur de chacune des couches (Di Benedetto et al., 2005).

C'est le bitume qui confère à l'enrobé bitumineux son comportement viscoélastique. En ce sens, l'enrobé bitumineux est fortement dépendant de la vitesse de sollicitation et de la température. En bref, une vitesse de sollicitation élevée tend à le rigidifier et une vitesse de sollicitation basse tend à le ramollir. Cette dépendance vis-à-vis de la vitesse de sollicitation remet en doute, sous certaines conditions, l'hypothèse du comportement élastique des couches de revêtement. Effectivement, les effets de non-linéarité et les irréversibilités s'accumulent au cours de la durée de vie de la structure qui peut atteindre des millions de cycles (Di Benedetto et al., 2005).

Au bas des couches de revêtement, les tractions cycliques répétées créent des micros dommages, qui, par accumulation, mènent à la ruine de l'enrobé bitumineux. C'est le phénomène de fatigue. Le collage des différentes couches de revêtement fait en sorte que les tractions les plus élevées se trouvent au bas du revêtement, car les couches de revêtement sont assimilées à une poutre en flexion. C'est pour cette raison que les fissures de fatigue apparaissent au bas de la couche et se propagent vers le haut (*Bottom-up Fatigue Cracking*). De leur côté, les compressions répétées créent, sur l'ensemble de la structure chaussée, des déformations permanentes. C'est le phénomène d'orniérage tel que vu à la section 1.2.8.

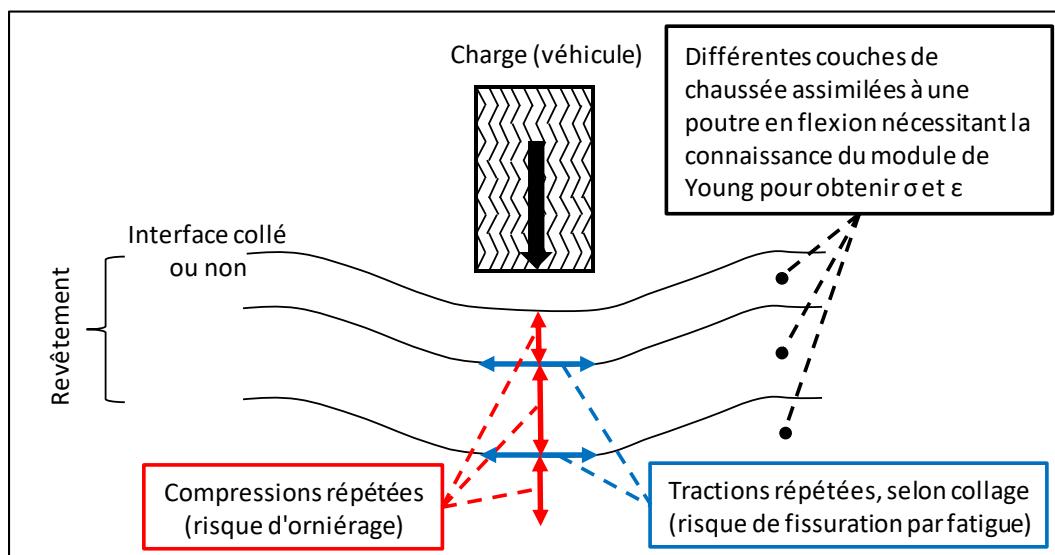


Figure 1.14 Schématisation des sollicitations induites par le trafic
Adaptée de Di Benedetto et al. (2005)

1.3.4 Calcul des efforts et des déformations dans la structure

Afin de bien comprendre le comportement de la structure de chaussée bitumineuse soumise aux efforts du trafic, le modèle multicouche de Burmister est utilisé. À ses débuts, en 1943, le modèle de Burmister ne considérait qu'un système à deux couches comme les modèles de Boussinesq et Hogg. En 1945, le modèle de Burmister permet de considérer un système à trois couches. Enfin, avec la venue de l'ordinateur et les avancées informatiques, le modèle peut maintenant considérer un système avec «n» couches (Huang, 2004). Ainsi, il est possible de schématiser beaucoup plus précisément de vraies structures de chaussée. Il devient possible de schématiser l'ensemble des structures traditionnellement vues.

Le modèle de Burmister permet de calculer les efforts et les déplacements dans la structure grâce à un modèle multicouche élastique linéaire isotrope infini en plan (Burmister, Palmer, Barber, & Middlebrooks, 1944). Ce modèle est schématisé à la Figure 1.15 et vient évidemment avec quelques hypothèses (Huang, 2004):

1. Chaque couche est un solide homogène, isotrope et a un comportement élastique linéaire. Ceci se traduit par un module de Young (E) et un coefficient de Poisson (ν);
2. Chaque couche n'a aucun poids propre et est infinie en plan;
3. Chaque couche a une épaisseur finie (h), sauf la dernière qui a une épaisseur infinie;
4. La pression (q) est appliquée sur une aire circulaire de rayon (a) de manière uniforme à la surface du modèle;
5. Les conditions de continuité sont satisfaites aux interfaces des couches selon le collage. (En condition collée, les contraintes verticales et de cisaillement et les déplacements verticaux et radiaux transmis aux interfaces. En condition décollée, les contraintes de cisaillement et les déplacements radiaux sont de zéro aux interfaces.)

Ce modèle accorde les charges multiples (roues jumelées, tandem, tridem, etc.) en additionnant les effets de charges élémentaires (Agal, 2005). C'est le principe de superposition. L'utilisation de coordonnées cylindriques permet de faciliter la résolution des équations.

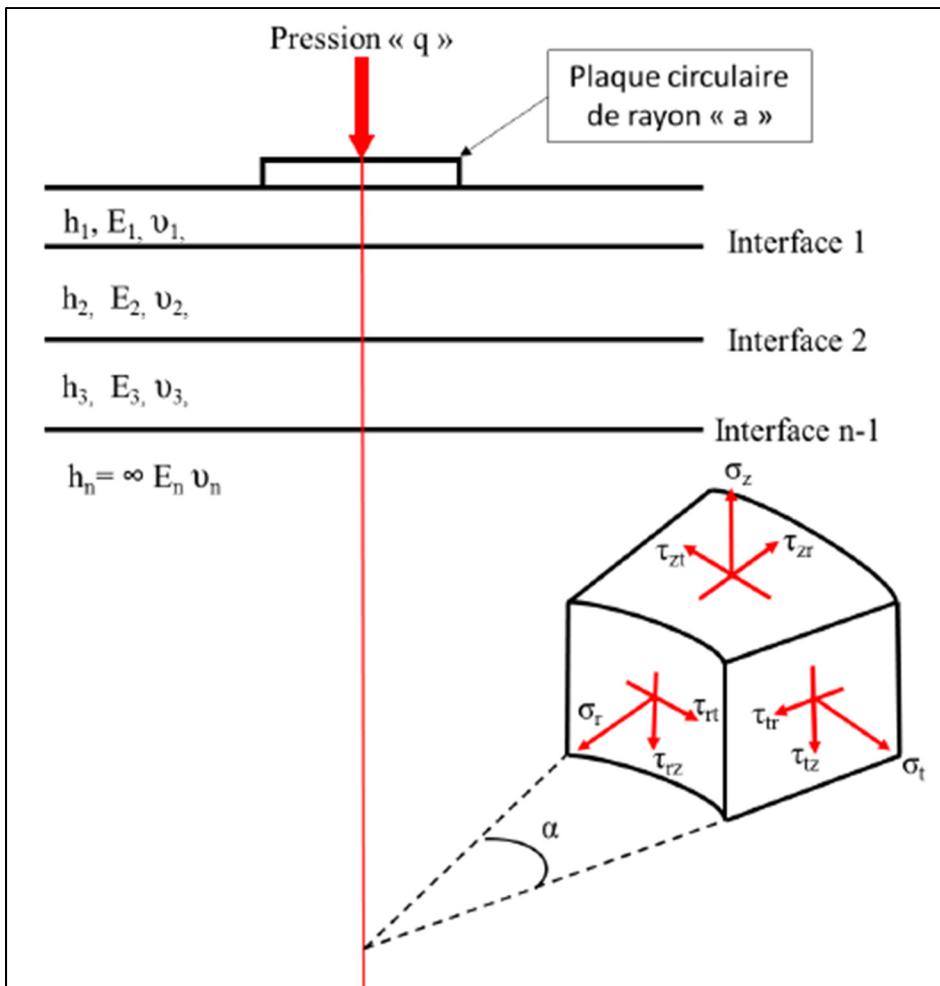


Figure 1.15 Modèle multicouche de Burmister
en coordonnées cylindriques
Adaptée de Yoder & Witczak (1975)

Pour résoudre un problème à charge axisymétrique (distribution symétrique autour de l'axe de la contrainte) en milieu homogène, isotrope et élastique, il faut trouver la fonction de tension (Φ_i) de chacune des couches qui satisfait l'équation différentielle directrice (Agal, 2005; Huang, 2004). L'équation différentielle directrice pour chacune des couches est la suivante (Huang, 2004) :

$$\nabla^4 \Phi_i = 0 \quad (1.16)$$

Pour un problème à charge axisymétrique l'opérateur ∇^4 est égal à (Huang, 2004) :

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (1.17)$$

Avec :

r	Coordonnée cylindrique radiale
z	Coordonnée cylindrique verticale

Pour une structure de n couches, il y aura n fonctions de tension (Φ_i). Ces fonctions sont définies par les conditions à l'interface de chacune d'elles (collée ou décollée). La fonction de tension de la couche i qui vérifie $\nabla^4 \Phi_i = 0$ est de la forme suivante (Huang, 2004):

$$\Phi_i = \frac{H^3 J_0(mp)}{m^2} \left[A_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - B_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} + C_i m \lambda e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i m \lambda e^{-(\lambda - \lambda_{i-1})} \right] \quad (1.18)$$

Avec :

ρ	r/H
λ	z/H
H	Distance entre la surface et le dessus de la dernière couche
J_0	Fonction de Bessel de première espèce d'ordre zéro
r	Distance radiale
z	Profondeur du point de mesure
m	Paramètre

Ai, Bi, Ci, Di Constantes d'intégration déterminées selon la condition à l'interface

Une fois la fonction de tension définie, il est possible de trouver les contraintes et les déplacements avec les équations de l'équilibre élastique suivantes (Huang, 2004):

Contraintes :

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - v) \nabla^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right] \quad (1.19)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left[v \nabla^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \right] \quad (1.20)$$

$$\sigma_t = \frac{\partial}{\partial z} \left[v \nabla^2 \Phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right] \quad (1.21)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - v) \nabla^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right] \quad (1.22)$$

Déplacement vertical :

$$w = \frac{1 + v}{E} \left[(1 - 2v) \nabla^2 \Phi + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right] \quad (1.23)$$

Déplacement radial :

$$u = -\frac{1 + v}{E} \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial z} \right] \quad (1.24)$$

Avec :

E Module de Young

v Coefficient de Poisson

1.3.5 Calcul des contraintes et des déformations dans la structure

La grande majorité des charges réellement rencontrées sur chaussée est plus complexe que la charge simple utilisée pour le modèle multicouche de Burmister : pression (q) appliquée sur une aire circulaire de rayon (a) de manière uniforme à la surface du modèle. Effectivement, les

véhicules lourds ont souvent des roues jumelées sur un essieu tandem, tridem et, plus rarement, un essieu quadruple. Pour accommoder ce type de charges, le principe de superposition est utilisé (Huang, 2004). De cette manière, l'essieu est représenté par un assemblage de charges simples. Par exemple, la Figure 1.16 présente un demi-essieu jumelé tandem. Le principe de superposition consiste à faire la somme des contraintes et des déformations individuelles de chacune des charges simples. La superposition permet d'avoir accès aux champs de contraintes et de déformations sous l'essieu désiré.

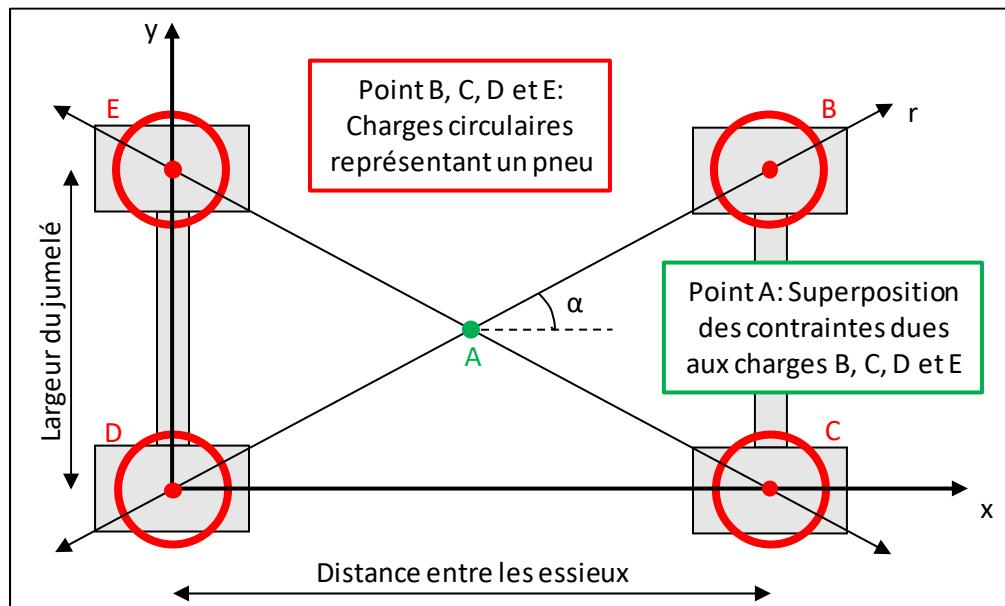


Figure 1.16 Vue en plan d'un demi-essieu jumelé tandem
Adaptée de Huang (2004)

Prenons l'exemple de la Figure 1.16 pour présenter plus en détail le principe de superposition. La contrainte verticale (σ_z) et le déplacement vertical (w) causés par les charges B, C, D et E au point A s'obtiennent facilement en faisant la somme des contraintes et des déplacements de chacune des charges puisqu'ils pointent tous dans la même direction (z) (Huang, 2004). Toutefois, la contrainte radiale (σ_r), la contrainte tangentielle (σ_t) et la contrainte de cisaillement (τ_{rz}) de chacune des charges ne peuvent pas simplement s'additionner, car elles ne pointent pas dans la même direction. Pour appliquer le principe de superposition, il faut redéfinir les contraintes en coordonnées cartésiennes (x, y et z). Pour le point B, le passage des

contraintes en coordonnées cylindriques aux contraintes en coordonnées cartésiennes se fait avec les équations suivantes (Huang, 2004) :

$$\sigma_x = \sigma_r \cos^2 \alpha + \sigma_t \sin^2 \alpha \quad (1.25)$$

$$\sigma_y = \sigma_r \sin^2 \alpha + \sigma_t \cos^2 \alpha \quad (1.26)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_r - \sigma_t) \sin \alpha \cos \alpha \quad (1.27)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{rz} \sin \alpha \quad (1.28)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{rz} \cos \alpha \quad (1.29)$$

Avec les contraintes en coordonnées cartésiennes, le principe de superposition s'applique en portant une attention particulière aux signes des contraintes (σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{yz} et τ_{xz}).

Pour les analyses de fatigue, c'est la déformation horizontale principale mineure qui est utilisée. Elle est dite mineure puisqu'elle est négative. C'est cette déformation en bas de couche qui fait apparaître la fissuration par fatigue (*Bottom-up Fatigue Cracking*). Elle s'obtient par les équations suivantes (Huang, 2004):

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (1.30)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (1.31)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (1.32)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+v)}{E} \tau_{xy} \quad (1.33)$$

Avec :

ε_t	Déformation horizontale principale mineure
ε_x	Déformation principale (direction x)
ε_y	Déformation principale (direction y)
γ_{xy}	Cisaillement sur le plan x (direction y)

1.4 Dimensionnement des chaussées bitumineuses

Le dimensionnement des chaussées bitumineuses se fait selon deux principales approches de dimensionnement : empirique et mécaniste empirique (ME). Ces deux types d'approches et les logiciels de dimensionnement mécaniste empirique sont présentés plus en détail dans les sections suivantes.

1.4.1 Approches de dimensionnement empirique

L'empirisme s'attache principalement à l'expérience sans nécessairement comprendre les principes scientifiques et physiques à l'œuvre (Agal, 2005; Carter, 2017). En effet, le suivi et l'observation du comportement des chaussées expérimentales réelles, lors d'essais en vraie grandeur, tentent d'établir des relations de causalité entre différents phénomènes. Ces relations sont analysées d'une manière statistique afin de quantifier l'importance de chacun des intrants sur la durée de vie de la chaussée (Agal, 2005; Duong, 2017). Il faut retenir que les relations et les conclusions tirées d'une planche d'essai ne s'appliquent qu'aux conditions précisément rencontrées (matériaux, sol support, météo, etc.). Ainsi, la généralisation et l'extrapolation vers de nouvelles conditions comportent leur lot de risques (Agal, 2005). C'est pourquoi des facteurs de correction sont insérés dans les méthodes et que l'ingénieur concepteur utilise toujours son jugement face aux dimensionnements.

Chronologiquement, l'approche de dimensionnement empirique voit le jour en 1920 (Huang, 2004). En 1931, en France, une première piste d'essai, située dans l'enceinte de la Maison-Blanche du Bois de Vincennes, permet d'étudier l'usure des revêtements (Duong, 2017). Aux États-Unis, entre 1940 et 1961, trois importantes pistes d'essai sont réalisées sous la supervision du *Highway Research Board* (HRB)(Huang, 2004). C'est en 1941 que la première piste d'essai (*Maryland Road Test*), ayant pour but d'étudier l'effet de différents types d'essieux sur la durée de vie de chaussées rigides, est réalisée. Entre 1952 et 1954, le *Western Association of State Highway Officials* (WASHO) met en œuvre et suit une piste d'essai en enrobés bitumineux en Idaho (*WASHO Road Test*) ayant des objectifs similaires à ceux du *Maryland Road Test*. Cette piste d'essai donne naissance aux abaques de dimensionnement de Jeuffroy et Bachelez (Duong, 2017). Enfin, la piste d'essai la plus importante est réalisée et suivie entre 1956 et 1961 en Illinois. Cette piste d'essai est nommée l'*American Association of State Highway Officials* (AASHO Road Test).

La piste d'essai de l'AASHO a été construite à Ottawa en Illinois puisque le sol était uniforme et qu'il était représentatif de plusieurs régions aux États-Unis. De plus, le climat est assez représentatif du nord des États-Unis (Duong, 2017). L'objectif de cette planche d'essai était de proposer une méthode de dimensionnement nationale. Elle devient la base sur laquelle s'appuient la plupart des méthodes empiriques actuelles (Carter, 2017). Cette planche d'essai mène à la réalisation d'un premier guide intérimaire de dimensionnement en 1961. Ce dernier est révisé en 1972 et 1981. En 1986, le guide est révisé, raffiné et étendu à un plus grand nombre de régions (Huang, 2004). Enfin, une dernière révision en 1993 donne naissance au guide: AASHTO 1993 (Carter, 2017; Huang, 2004; Perraton, Baaj, & Carter, 2010). Bien que les équations empiriques utilisées prennent racine dans l'*AASHO Road Test*, cette approche de dimensionnement est, encore aujourd'hui, une méthode acceptée et largement utilisée dans le domaine routier (Perraton et al., 2010). Le dimensionnement empirique des chaussées bitumineux est largement utilisé puisqu'il est simple et qu'il ne requiert que peu d'intrants. Il permet, dans la majorité des cas, d'arriver à des dimensionnements respectant l'ensemble des besoins requis. Ces critères sont parfois respectés à cause d'un surdimensionnement des

structures. Effectivement, plusieurs facteurs de correction tentent de rattraper l'incertitude de l'extrapolation.

Au Québec, CHAUSSÉE 2, l'outil de dimensionnement de chaussée développé par le ministère des Transports du Québec (MTQ), est séparé en trois modules : le module de calcul structural et deux modules d'analyse du gel. Le module de calcul structural utilise encore l'équation de l'AASHTO 1993 (St-Laurent, 2006), soit:

$$\log W_{18} = Z_R S_0 \quad (1.34)$$

$$+ 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}}$$

$$+ 2.32 \log(145.04 \text{ Mr}) - 8.07$$

Avec :

W ₁₈	Nombre d'équivalent de charge axiale simple (ÉCAS) admissible
S ₀	Erreur de l'estimation (S ₀ = 0,45 pour chaussée souple)
Z _R	Déviation normale associée au risque de calcul (1-R)
R	Niveau de fiabilité
PSI	Indice de viabilité de la chaussée
Mr	Module de résilience effectif du sol support (MPa)
SN	Nombre structural

1.4.2 Approches de dimensionnement mécaniste empirique (ME)

«Un dimensionnement suivant une approche [mécaniste empirique] vise à fixer l'épaisseur des couches d'une structure de chaussée pour des performances cibles en considérant l'évolution des contraintes et des déformations dans la structure liée à celle des sollicitations (climat et trafic)» (Perraton et al., 2011). «Le phénomène de fatigue est considéré comme le phénomène d'endommagement prépondérant à température moyenne dans les structures de chaussées souples» (Perraton et al., 2011). Logiquement, l'approche mécaniste empirique se

doit de proposer un modèle d'endommagement par fatigue performant. C'est donc sur ce phénomène que se concentre ce mémoire. D'une manière générale, l'approche utilise des modèles d'endommagement mécanique qui tiennent compte du comportement mécanique des enrobés bitumineux établi en laboratoire (Perraton et al., 2010; Perraton et al., 2011). De cette manière, l'approche permet de bien illustrer les bénéfices qu'apportent les matériaux innovants. Ces modèles d'endommagement sont calibrés afin de faire correspondre l'endommagement prédit en laboratoire à celui observé sur chaussée. Une approche mécaniste empirique, comme son nom l'indique, comporte une partie de mécanique rationnelle (mécaniste) et une partie d'éléments expérimentaux (empirique) (Setra-LCPC, 1994). La Figure 1.17 présente le principe général derrière les méthodes de dimensionnement mécaniste empirique.

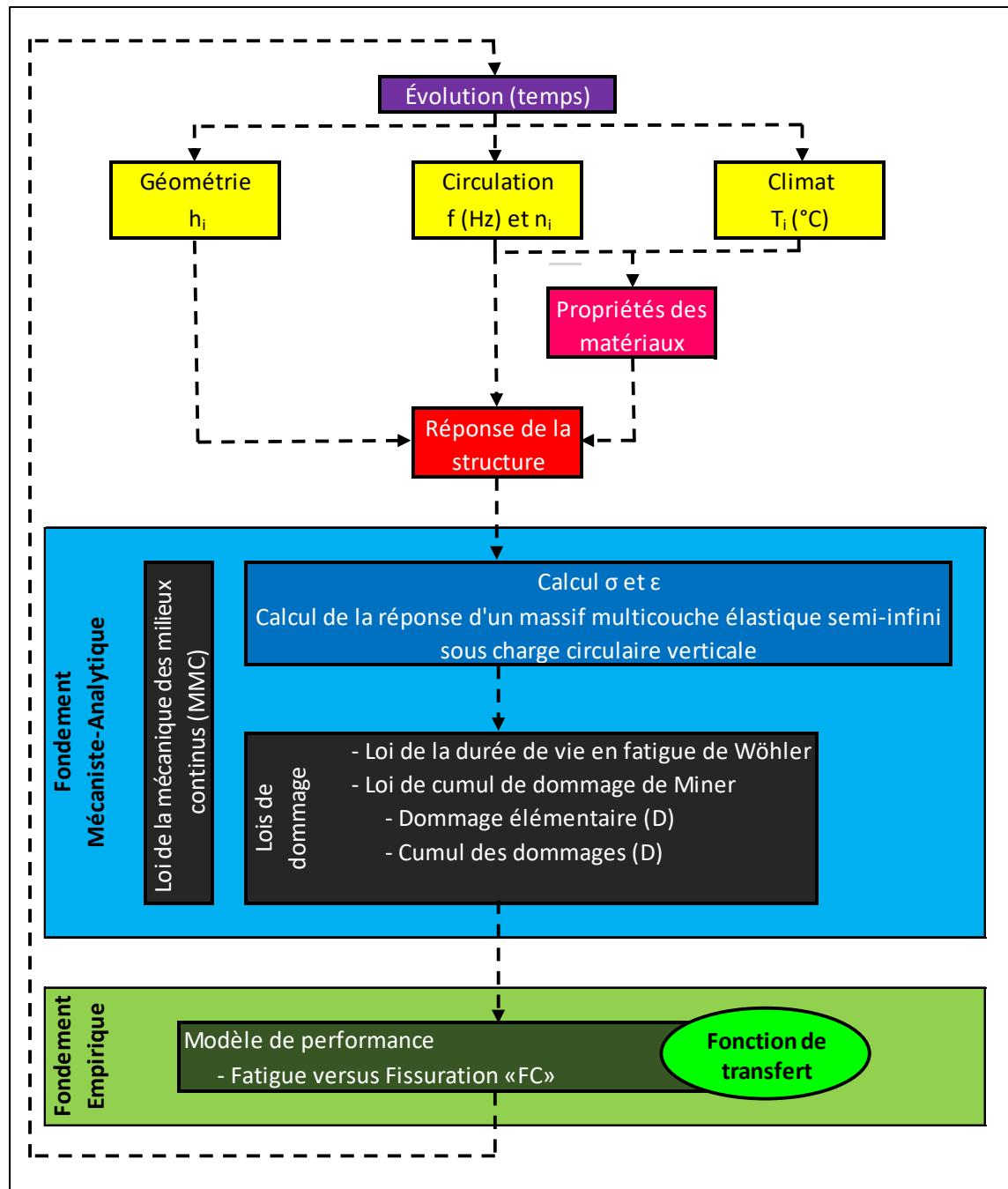


Figure 1.17 Principe général de l'approche mécaniste empirique de dimensionnement de chaussées souples
Adaptée de Perraton et al. (2011)

La partie mécaniste de l'approche fait appel à des lois issues de la mécanique des milieux continus (MMC) et au comportement rhéologique des matériaux, principalement le module

complexe et la résistance à la fatigue pour les enrobés bitumineux (Perraton et al., 2011). D'une part, le modèle multicouche de Burmister (§1.3.4 et §1.3.5) permet de modéliser la structure de la chaussée pour, ensuite, calculer les champs de contraintes (σ) et de déformations (ε) en fonction des sollicitations extérieures (trafic, climat) en admettant que les matériaux soient homogènes, isotropes et linéairement élastiques (Perraton et al., 2011). La déformation horizontale principale mineure (ε_t), déformation en traction en bas de couche de revêtement, est indispensable au modèle d'endommagement par fatigue (Huang, 2004). Effectivement, «la relation entre la durée de vie et l'amplitude de la sollicitation est à la base du modèle permettant de décrire la performance en fatigue des matériaux» (Perraton et al., 2011). Cette performance en fatigue des enrobés bitumineux est déterminée en laboratoire. La résistance à la fatigue est analytiquement définie par les coefficients de la droite de Wöhler (§1.2.7.4). La loi de cumul des dommages de Miner propose une définition analytique de l'endommagement (§1.2.7.5). De cette manière, l'évolution de l'endommagement en fatigue du matériau se fait selon un calcul prévisionnel suivant les sollicitations subies par la chaussée. L'important ici est de se rappeler que les lois de dommage proposées sont établies à partir de résultats de laboratoire sous des conditions de sollicitations idéalisées et simplifiées et qu'elles-mêmes posent certaines hypothèses. L'équation suivante présente la forme générale utilisée par différentes méthodes de dimensionnement mécaniste empirique pour représenter le modèle de fatigue (*Bottom-up fatigue cracking*):

$$N_f^{\text{Site}} = a_1 \cdot |E^*(\theta_{\text{site}}, f_{\text{site}})|^{-a_3} \cdot \varepsilon_t^{-a_2} \quad (1.35)$$

Avec :

N_f^{Site}	Nombre de cycles correspondant à la rupture du matériau en fatigue pour la déformation (ε_t) à la température (θ_{site}) et la fréquence (f_{site}) du site
$ E^*(\theta_{\text{site}}, f_{\text{site}}) $	Module dynamique à la température (θ_{site}) et la fréquence (f_{site}) du site
ε_t	Déformation horizontale en bas de couche sur site
a_1	$= N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) E^*(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) ^{a_3}$ (§1.2.7.4)

Par ailleurs, la partie empirique vise à arrimer les résultats du calcul prévisionnel (lois de dommage en fatigue déterminées en laboratoire) aux dommages par fatigue observés sur route (A. AASHTO, 2008; Carter, 2017; Duong, 2017; Huang, 2004; Perraton et al., 2011; Setra-LCPC, 1994). Il est très difficile de prévoir avec exactitude l'évolution des sollicitations et tous les facteurs pouvant influencer la durée de vie d'une chaussée. À l'échelle de la chaussée, des phénomènes d'endommagement complexes doivent être pris en compte dans les lois de dommage du matériau (Perraton et al., 2011). Parmi ces phénomènes, on y retrouve :

1. Les différences entre les conditions de sollicitations en laboratoire et en chantier (temps de repos, fréquence, louvoiement);
2. La variabilité au sein des matériaux (hétérogénéité)
3. La variabilité au niveau du sol support;
4. Les différents phénomènes physiques et chimiques;
5. Autres.

Le calage des résultats des modèles de calcul permet de rattraper les simplifications des modèles mathématiques et rhéologiques. Il rattrape également les biais attachés à la représentativité des essais de laboratoire pour décrire les propriétés des matériaux. Il permet de corriger l'écart entre le calcul prévisionnel et les dommages observés sur chaussée. Le calage se fait par l'établissement de fonctions de transfert. Ce sont les fonctions de transfert qui permettent de caler directement la loi de durée de vie en fatigue établie en laboratoire à l'endommagement sur chaussée (Huang, 2004; Perraton et al., 2011). De cette manière le dommage en laboratoire se traduit en un dommage à l'échelle de la chaussée. Pour y arriver, les fonctions de transfert introduisent certains coefficients de calage sur la loi de durée de vie en fatigue (Perraton et al., 2011). Ces coefficients de calage sont habituellement établis en comparant la réponse du calcul prévisionnel avec des observations faites sur chaussée. Par exemple, dans le *Strategic Highway Research Program* (SHRP), les observations faites sur les sections de chaussée *Long Term Pavement Performance* (LTPP) permettent la définition des coefficients de calage (Huang, 2004). Un autre exemple en France est celui du manège de fatigue qui permet l'établissement de coefficients de calage pour les nouveaux matériaux. L'équation suivante présente la forme générale utilisée par différentes méthodes de

dimensionnement mécaniste empirique pour représenter le modèle de fatigue (*Bottom-up fatigue cracking*) avec les coefficients de calage :

$$N_f^{\text{Site}} = a_1 \cdot \beta_{\text{risk}} \cdot \beta_{a_1} \cdot |E^*(\theta_{\text{site}}, f_{\text{site}})|^{-a_3 \cdot \beta_{a_3}} \cdot \varepsilon_t^{-a_2 \cdot \beta_{a_2}} \quad (1.36)$$

Avec :

$$a_1 = N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) |E^*(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})|^{a_3} \quad (\S 1.2.7.4)$$

β_{risk} Coefficient de calage associé au risque

β_{a1}, β_{a2} et β_{a3} Coefficients de calage

1.4.3 Méthodes et logiciels de dimensionnement ME

Les méthodes de dimensionnement mécaniste empirique de chaussée sont rendues plus accessibles grâce aux logiciels informatiques. Toutefois, il est nécessaire de comprendre leurs fondements afin de produire des dimensionnements de chaussée justes et en contrôle du risque. Dans les sections qui suivent, une comparaison entre la méthode de dimensionnement ME française (Alizé-LCPC) et américaine (*AASHTOWare Pavement ME Design*) est faite. Celle-ci se concentre essentiellement sur les modèles d'endommagement en fatigue. Les fonctions de transfert, qui viennent modifier les lois de durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux, appliquent des coefficients de calage différents d'une méthode à l'autre. C'est cette différence qui est ici mise en lumière. Enfin, l'outil de prévision de l'évolution du comportement des chaussées (OPECC), développé par le laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB), est introduit.

1.4.3.1 Alizé – LCPC

Pour le dimensionnement de chaussée, Alizé-LCPC (Alizé) utilise le principe de sollicitations admissibles. «Les valeurs des sollicitations admissibles dans les couches de chaussée sont déterminées à partir des caractéristiques du comportement en fatigue des matériaux, du trafic cumulé et du risque de calcul. Un coefficient multiplicateur de “calage” est introduit pour

corriger les écarts entre les prédictions tirées de la démarche de calcul et l'observation du comportement des chaussées» (Setra-LCPC, 1994). Il faut se rappeler que le module complexe et que la loi de fatigue sont établis par des essais en flexion 2 points (2PB) selon les normes NF P98-260-2 et NF EN 12697-24. Ces sollicitations admissibles sont comparées aux sollicitations produites par un équivalent de charge axiale simple (ÉCAS). L'épaisseur des couches est déterminée lorsque :

$$S_{\max} \leq S_{\text{adm}} \quad (1.37)$$

Avec :

S_{\max}	Sollicitation maximale produite par un ÉCAS
S_{adm}	Sollicitation admissible

Pour le phénomène de fatigue, la sollicitation admissible est la déformation horizontale admissible en traction à la base des couches bitumineuses ($\varepsilon_{t \text{ adm}}$) (Setra-LCPC, 1994) :

$$\varepsilon_{t \text{ adm}} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}; 25\text{Hz}) \cdot \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C}; 10\text{Hz})}{E(\theta_{\text{eq}}; f)}} \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s \quad (1.38)$$

Avec :

$\varepsilon_{t \text{ adm}}$	Déformation horizontale admissible en traction en bas de couche
$\varepsilon_6(10^\circ\text{C}; 25\text{Hz})$	Déformation menant à une durée de vie de 10^6 cycles
$E(10^\circ\text{C}; 10\text{Hz})$	Module dynamique à 10°C et 10 Hz
$E(\theta_{\text{eq}}; f)$	Module dynamique à θ_{eq} et f
NE	Nombre d'essieux équivalents
b	Pente de fatigue sous forme de loi bi-logarithmique (-1/5)
k_r	Coefficient de calage lié au risque de calcul retenu
k_c	Coefficient de calage lié au calage laboratoire-chantier
k_s	Coefficient de calage lié à l'homogénéité du sol support

Simplement, l'équation passe à travers les étapes suivantes :

1. Translation de la droite de Wöhler pour tenir compte de la température équivalente (θ_{eq}) et de la fréquence (f) de la simulation.
2. Détermination de la déformation menant à une rupture au nombre de cycles correspondant au nombre équivalent d'ÉCAS (NE).
3. Ajustement de la déformation par les coefficients multiplicateurs k_r , k_c et k_s .

L'équation utilisée par Alizé peut s'adapter à la forme générale utilisée par différentes méthodes de dimensionnement mécaniste empirique (équation 1.36) pour représenter le modèle de fatigue (*Bottom-up fatigue cracking*) avec les coefficients de calage. Elle devient :

$$NE = 10^6 \cdot \varepsilon_6(10^\circ\text{C}; 25\text{Hz})^{-1/b} \cdot E(10^\circ\text{C}; 10\text{Hz})^{-1/2b} \cdot \left[\frac{1}{k_r} \right]^{1/b} \cdot \left[\frac{1}{k_c \cdot k_s} \right]^{1/b} \cdot E(\theta_{eq}; f)^{1/2b} \cdot \varepsilon_t^{1/b} \quad (1.39)$$

Avec :

ε_t Déformation en traction en bas de couche de revêtement

La Figure 1.18 présente les correspondances entre les paramètres de la loi de fatigue utilisée dans Alizé à ceux de la forme générale présentée à l'équation (1.36).

$$NE = 10^6 \cdot \varepsilon_6(10^\circ C; 25Hz)^{-1/b} \cdot E(10^\circ C; 10Hz)^{-1/2b} \cdot \left[\frac{1}{k_r} \right]^{1/b} \cdot \left[\frac{1}{k_c \cdot k_s} \right]^{1/b} \cdot E(\theta_{eq}; f_{eq})^{1/2b} \cdot \varepsilon_t^{1/b}$$

$$N_f^{Site} = a_1 \beta_{risk} \beta_{a_1} |E^*_{(\theta_{site}, f_{site})}|^{-a_3} \beta_{a_3} \varepsilon_t^{-a_2} \beta_{a_2}$$

Avec:

$$\beta_{a_2} = 1$$

$$\beta_{a_3} = 1$$

Figure 1.18 Correspondances entre les paramètres de la loi de fatigue utilisée dans Alizé et ceux de l'équation (1.36)

La fonction de transfert utilise deux coefficients de calage (β_{a_1} et β_{risk}) :

$$\beta_{a_1} = \left[\frac{1}{k_c \cdot k_s} \right]^{1/b} \quad (1.40)$$

$$\beta_{risk} = \left[\frac{1}{k_r} \right]^{1/b} \quad (1.41)$$

J Corté & Goux (1994) définissent les coefficients k_i comme suit :

- k_r est un coefficient de calage lié au risque de calcul retenu, l'écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériaux mis en œuvre (Sh), la pente de la loi de fatigue du matériau dans le domaine bi-logarithmique (b) et l'écart-type sur le $\log(N_f)$ à la rupture (SN_f);
- k_c est un coefficient de calage destiné à ajuster les résultats de la loi de fatigue établie en laboratoire au comportement observé de chaussées de même type;
- k_s est un coefficient minorateur tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant le revêtement.

1.4.3.2 AASHTOWare Pavement ME Design

AASHTOWare Pavement ME Design (PvME) traduit ses modèles d'endommagement en dommages quantifiables et observables sur la chaussée. En effet, PvME présente l'état de la chaussée sous six critères (A. AASHTO, 2008):

1. Orniérage total (revêtement et corps de la chaussée) (mm);
2. Orniérage du revêtement (mm);
3. Fissuration thermique (m/km);
4. Fissuration par fatigue (*Bottom-up fatigue cracking*) (%);
5. Fissuration par fatigue (*Top-down*) (m/km);
6. Indice de rugosité international (IRI) (m/km).

Il faut rappeler que le module complexe est établi par un essai de traction-compression directe selon la norme AASHTO T 342 et que la loi de fatigue est établie par un essai en flexion 4 points (4PB) selon la norme AASHTO T 321-17 (signal de type sine). Pour arriver à ces résultats, PvME utilise ses fonctions de transfert à deux niveaux. Tout d'abord, des coefficients de calage viennent corriger les modèles d'endommagement. Par la suite, une fonction de transfert traduit le cumul de ces dommages en endommagement quantifiable sur chaussée. Les coefficients de calage et les fonctions de transfert ont été calibrés avec la base de données du LTPP. La loi de durée de vie en fatigue de PvME se traduit par (A. AASHTO, 2008):

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(E_{HMA})^{-k_{f3}\beta_{f3}}(\varepsilon_t)^{-k_{f2}\beta_{f2}} \quad (1.42)$$

Avec :

N_{f-HMA}	Durée de vie en nombre de passages d'essieux
ε_t	Déformation en traction en bas de couche de revêtement
E_{HMA}	Module dynamique de l'enrobé en couche de base
k_{f1}, k_{f2}, k_{f3}	Coefficients de calibration globaux
$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$	Coefficients de calibration locaux ou spécifiques au mélange
C	$= 10^M$

M	$= 4.84 \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69 \right)$
V_{be}	Volume de bitume effectif
V_a	Teneur en vides de l'enrobé
C_H	$= \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49H_{HMA})}}}$ Coefficient fonction de l'épaisseur
H_{HMA}	Épaisseur totale du revêtement (pouces)

La Figure 1.19 présente les correspondances entre les paramètres de la loi de fatigue utilisée dans PvME à ceux de la forme générale présentée à l'équation (1.36).

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(E_{HMA})^{-(k_{f3}\beta_{f3})(\varepsilon_t)}^{-(k_{f2}\beta_{f2})}$$

$$N_f^{Site} = a_1 \beta_{risk} \beta_{a_1} |E_{(\theta_{site}, f_{site})}^*|^{-a_3 \beta_{a_3}} \varepsilon_t^{-a_2 \beta_{a_2}}$$

Avec:

$$\beta_{risk} = 1$$

Figure 1.19 Correspondances entre les paramètres de la loi de fatigue utilisée dans PvME et ceux de l'équation (1.36)

Cette première fonction de transfert utilise six coefficients de calage : k_{f1} , k_{f2} , k_{f3} , β_{f1} , β_{f2} et β_{f3} . Avec la durée de vie en fatigue calée, le cumul de dommage est traduit en endommagement sur chaussée (fissuration par fatigue) par la fonction de transfert suivante (A. AASHTO, 2008):

$$FC_{Bottom} = \left(\frac{1}{60} \right) \left(\frac{C_3}{1 + e^{(C_1 C_1^* + C_2 C_2^* \log(DI_{Bottom} * 100))}} \right) \quad (1.43)$$

Avec :

FC_{Bottom}	Fissuration par fatigue (<i>Bottom-up fatigue cracking</i>) (%)
DI_{Bottom}	Cumul de dommage
C_1	Constante de régression de la fonction de transfert; $C_1 = 1$
C_2	Constante de régression de la fonction de transfert; $C_2 = 1$

C_3	Constante de régression de la fonction de transfert; $C_3 = 6\ 000$
C_1^*	$= -2C_2^*$
C_2^*	$= -2,40874 - 39,748(1 + H_{HMA})^{-2.856}$
H_{HMA}	Épaisseur totale du revêtement (pouces)

La représentation visuelle de fissuration par fatigue fait référence à une voie de 12 pieds de large par 500 pieds de long (6000 pieds carrés). Et comme la fissuration par fatigue n'apparaît que dans les traces de roues, le dommage unitaire ($D=1$) correspond visuellement à une fissuration de 50% sur la surface totale de la voie, mais à une fissuration totale (100%) dans les traces de roues. La Figure 1.20 illustre bien cet aspect.

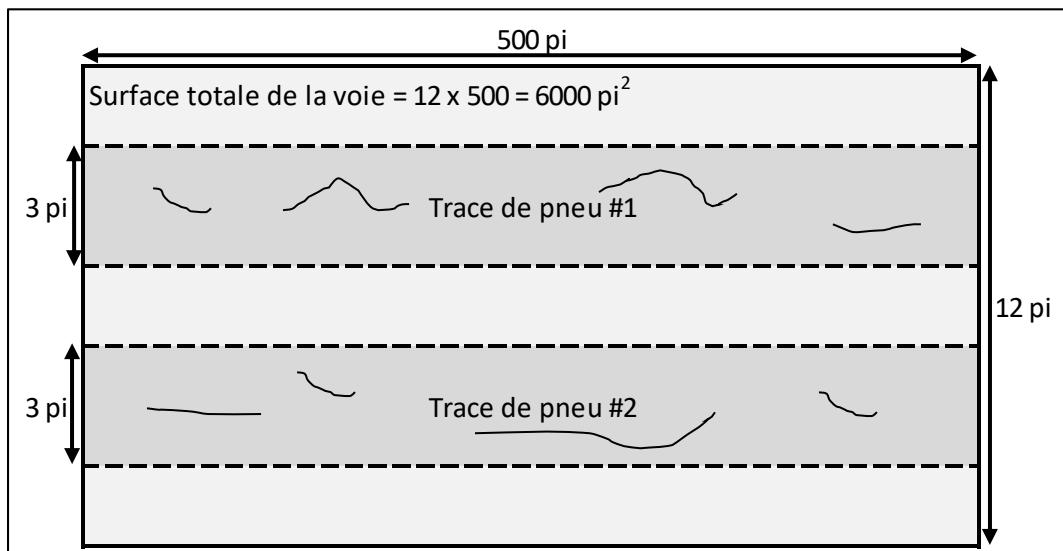


Figure 1.20 Schématisation du taux de fissuration par fatigue (FC_P) de PvME

Le dimensionnement s'effectue en comparant le taux de fissuration calculé à une valeur seuil de fissuration (A. AASHTO, 2008). PvME propose des valeurs seuils de fissuration en fin de vie en fonction du type de route (Tableau 1.6).

Tableau 1.6 Valeurs seuils suggérées par PvME pour la fissuration par fatigue

Type de route	Valeur seuil (% de fissuration)
Autoroute	10
Primaire	20
Secondaire	35

Ces valeurs seuils sont bien évidemment malléables et doivent être ajustées à l’expérience de l’ingénieur, les exigences du donneur d’ouvrage et les besoins locaux. En bref, ces valeurs seuils doivent représenter l’état de la chaussée attendu avant une réfection majeure ou une reconstruction (A. AASHTO, 2008). À cette valeur seuil s’ajoute le niveau de fiabilité. Ce dernier doit refléter l’importance d’un dépassement d’une valeur seuil avant la réfection/reconstruction. Comme pour les valeurs seuils, le niveau de fiabilité doit être ajusté à l’expérience et au bon jugement de l’ingénieur. Le Tableau 1.7 présente les propositions de PvME quant au niveau de fiabilité à choisir en fonction du type de route (A. AASHTO, 2008).

Tableau 1.7 Niveaux de fiabilité suggérés par PvME

Type de route	Niveau de confiance (%)	
	Urbain	Rural
Autoroute	95	95
Principale	90	85
Collectrice	80	75
Route	75	70

1.4.3.3 OPECC

L’outil de prédiction de l’évolution du comportement de la chaussée (OPECC) est un outil de dimensionnement mécaniste empirique développé par le laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) situé à l’École de technologie supérieure (ÉTS). «OPECC [offre] l’avantage [d’analyser le] comportement de la chaussée (contraintes et déformations) selon l’évolution de la température dans la chaussée (évolution du module complexe) afin de prédire le comportement de la chaussée en service vis-à-vis l’orniérage [et la fissuration par

fatigue]» (Meunier, 2012). Le calcul des champs de contraintes et déformations dans la chaussée est effectué par le programme KENPAVE® développé par M. H. Huang de l'Université du Kentucky. KENPAVE® est basé sur le modèle multicouche de Burmister (§1.3.4 et §1.3.5). Les matériaux doivent être caractérisés en laboratoire (Module complexe et fatigue). Le contrôle de la température est fait par intervalles de calcul (au mois ou à la semaine). Dans cet intervalle, la température est considérée constante, mais distincte pour chacune des couches. Une fonction permet de transformer la température extérieure en une température ressentie dans la chaussée en fonction de la profondeur. Au niveau des interfaces, ceux-ci sont collés ou décollés. Il est possible de fixer la vitesse des véhicules. Celle-ci se traduit en une fréquence de sollicitation qui influence le module complexe et, par le fait même, la loi de fatigue des enrobés bitumineux et l'état des contraintes et des déformations dans le revêtement. Au niveau du trafic, le principe d'ÉCAS est utilisé. Enfin, OPECC utilise le principe de risque de calcul présent dans Alizé (Meunier, 2012). Au niveau des modèles d'endommagement, OPECC utilise le principe de fonction de transfert de PvME pour transformer le cumul de dommage en dommage quantifiable sur chaussée. Pour la résistance à la fatigue, la fonction de transfert, qui transfère le dommage en taux de fissuration, est définie par l'équation (1.43).

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Mise en contexte

Seules les méthodes de dimensionnement mécaniste empirique, comme Alizé-LCPC, OPECC et *AASHTOWare Pavement ME Design*, tiennent directement compte des performances mécaniques des enrobés bitumineux. Ensuite, celles-ci traduisent les performances en laboratoire en prédictions du comportement à l'échelle de la chaussée. Ainsi, les performances supérieures d'enrobés innovants comme l'EME-14, comparativement à des enrobés standards, sont mises en lumière. Ces méthodes de dimensionnement servent de tremplin à l'industrie dans la recherche et le développement de nouveaux matériaux et systèmes constructifs toujours plus performants.

Dans le cadre d'un deuxième projet de recherche et de développement coopératif (RDC2), le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), l'entreprise Eurovia et le laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) travaillent à montrer la valeur ajoutée de l'enrobé à module élevé (EME-14) en s'appuyant, notamment, sur des méthodes de dimensionnement mécaniste empirique.

Au niveau du matériau, l'expérience française et québécoise concernant l'utilisation d'un tel enrobé sont plus que concluantes. Effectivement, les enrobés à module élevé ont toujours de meilleurs comportements rhéologiques que les matériaux standards utilisés en couche de base comme les GB-20 ou les enrobés semi-grenu 14 mm (ESG-14). Effectivement, l'EME-14 propose une meilleure résistance à l'orniérage, une rigidité supérieure (E^*) et une meilleure résistance à la fatigue que les GB-20 et les ESG-14. Au niveau de son comportement dans une structure de chaussée, la preuve de l'efficacité des EME n'est plus à faire. En effet, les performances supérieures de l'EME se traduisent directement dans le choix des épaisseurs d'enrobé établies suivant un dimensionnement ME. Cependant, au Québec, le dimensionnement ME subit les influences américaines (proximité géographique et pouvoir

d'influence des États-Unis sur le Canada) et françaises (présence de grandes entreprises françaises). Ainsi, les correspondances et liens entre les méthodes de dimensionnement américaine et française doivent être établis.

2.2 Objectifs

Ce mémoire se présente sous deux objectifs principaux ayant chacun deux volets. Le premier objectif vise la formulation et la caractérisation d'un EME-14 qui servira de référence tout au long du projet de RDC2 qui s'échelonne sur quatre ans. Cet aspect matériau se développe sous deux volets :

Volet 1 Formulation, validation et caractérisation de l'EME-14

Volet 2 Évaluation de l'influence du type de sollicitation et de la fréquence sur la résistance à la fatigue de l'EME-14

Le deuxième objectif vise l'atteinte d'une meilleure compréhension et maîtrise des logiciels de dimensionnement mécaniste empirique. Les volets 3 et 4 abordent cet aspect dimensionnement:

Volet 3 Validation des correspondances entre les logiciels Alizé-LCPC, OPECC et *AASHTOWare Pavement ME Design*

Volet 4 Comparaison des dimensionnements d'Alizé-LCPC et *d'AASHTOWare Pavement ME Design* incorporant de l'EME-14

2.3 Programme expérimental

L'atteinte des objectifs se fait par la réalisation des quatre volets. Ceux-ci sont abordés plus en détail dans les sections qui suivent. La Figure 2.1 présente l'organigramme des deux premiers volets qui abordent l'aspect matériau. La Figure 2.2 et la Figure 2.3 présentent respectivement les organigrammes des volets 3 et 4 qui abordent l'aspect dimensionnement.

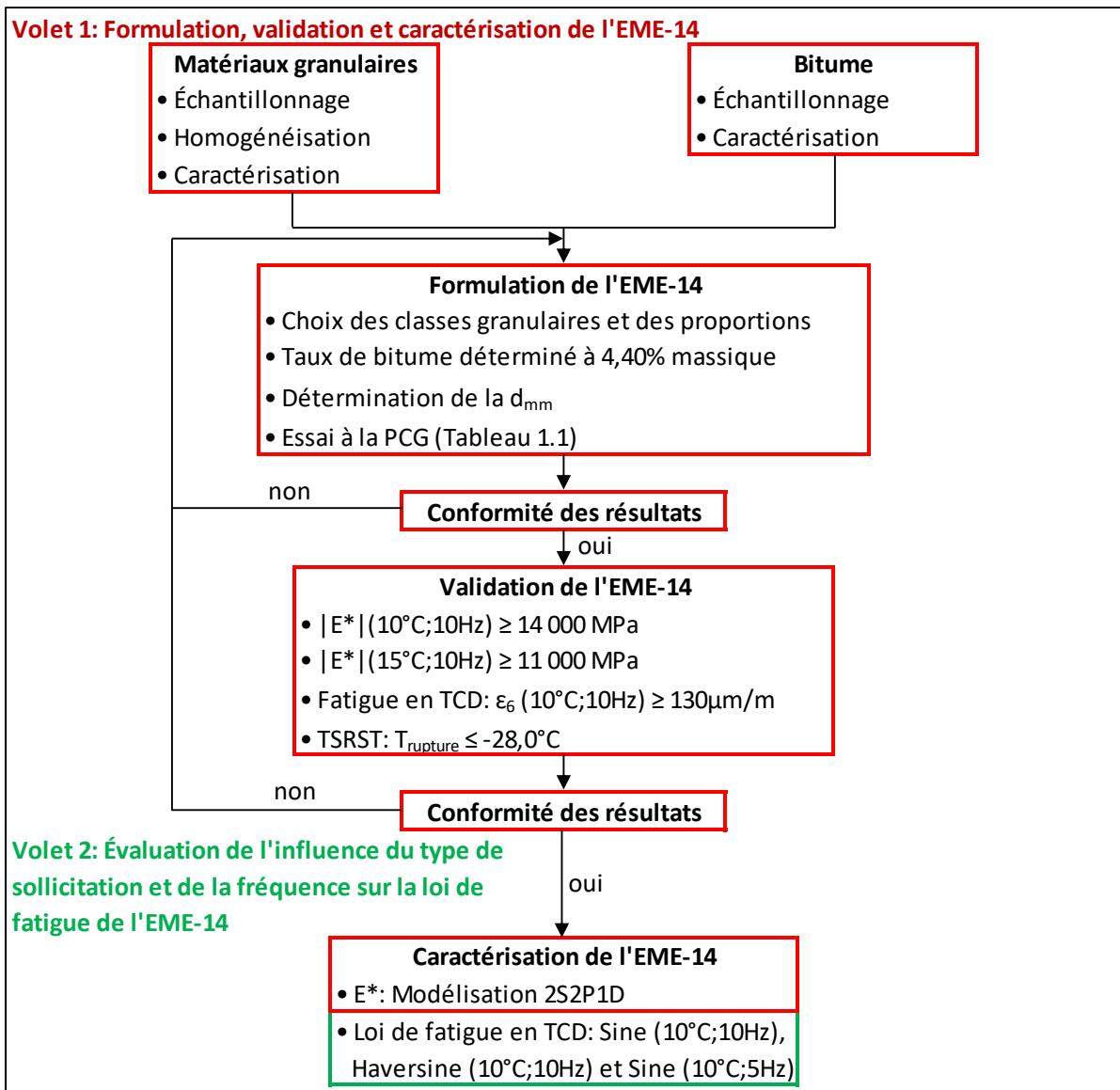


Figure 2.1 Organigramme des volets 1 et 2 du programme expérimental

Volet 3: Validation des correspondances entre les logiciels Alizé-LCPC, OPECC et AASHTOWare Pavement ME Design

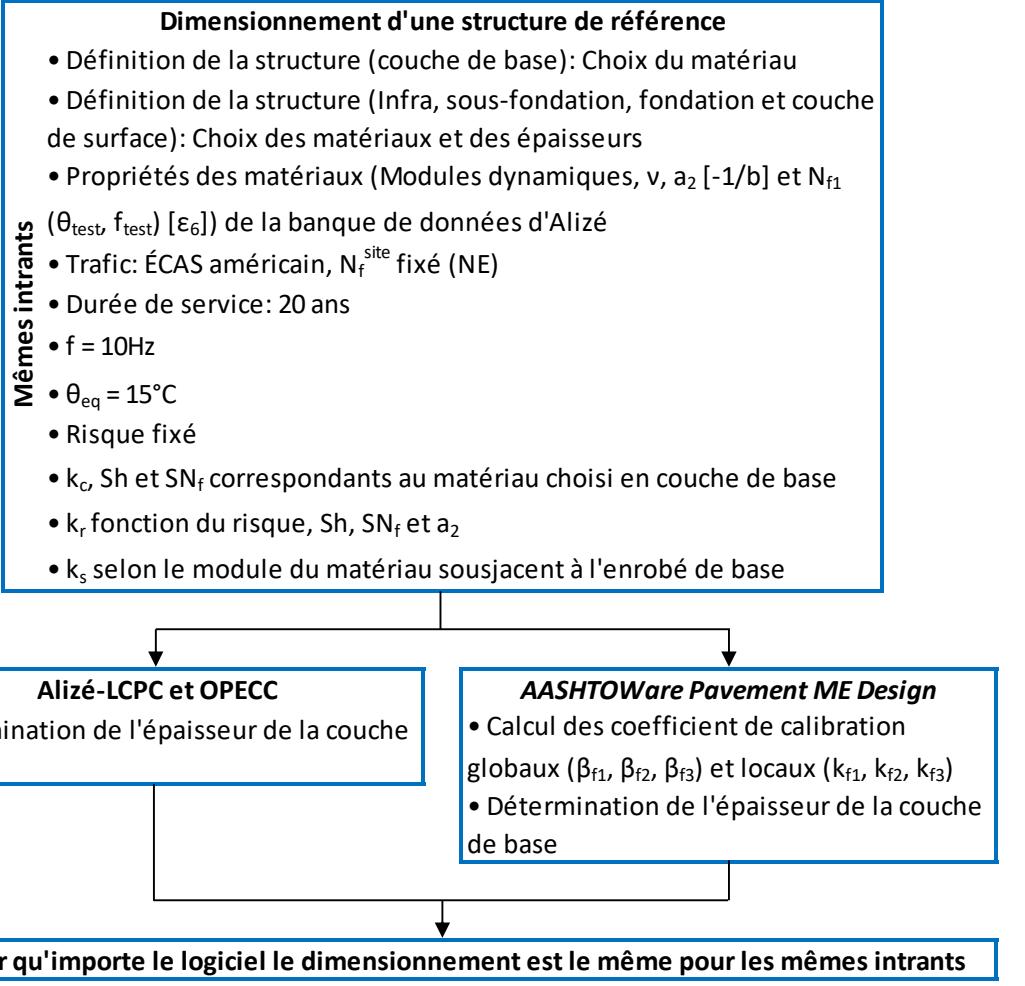


Figure 2.2 Organigramme du volet 3 du programme expérimental

Volet 4: Comparaison des dimensionnements d'Alizé-LCPC et d'AASHTOWare Pavement ME Design incorporant de l'EME-14

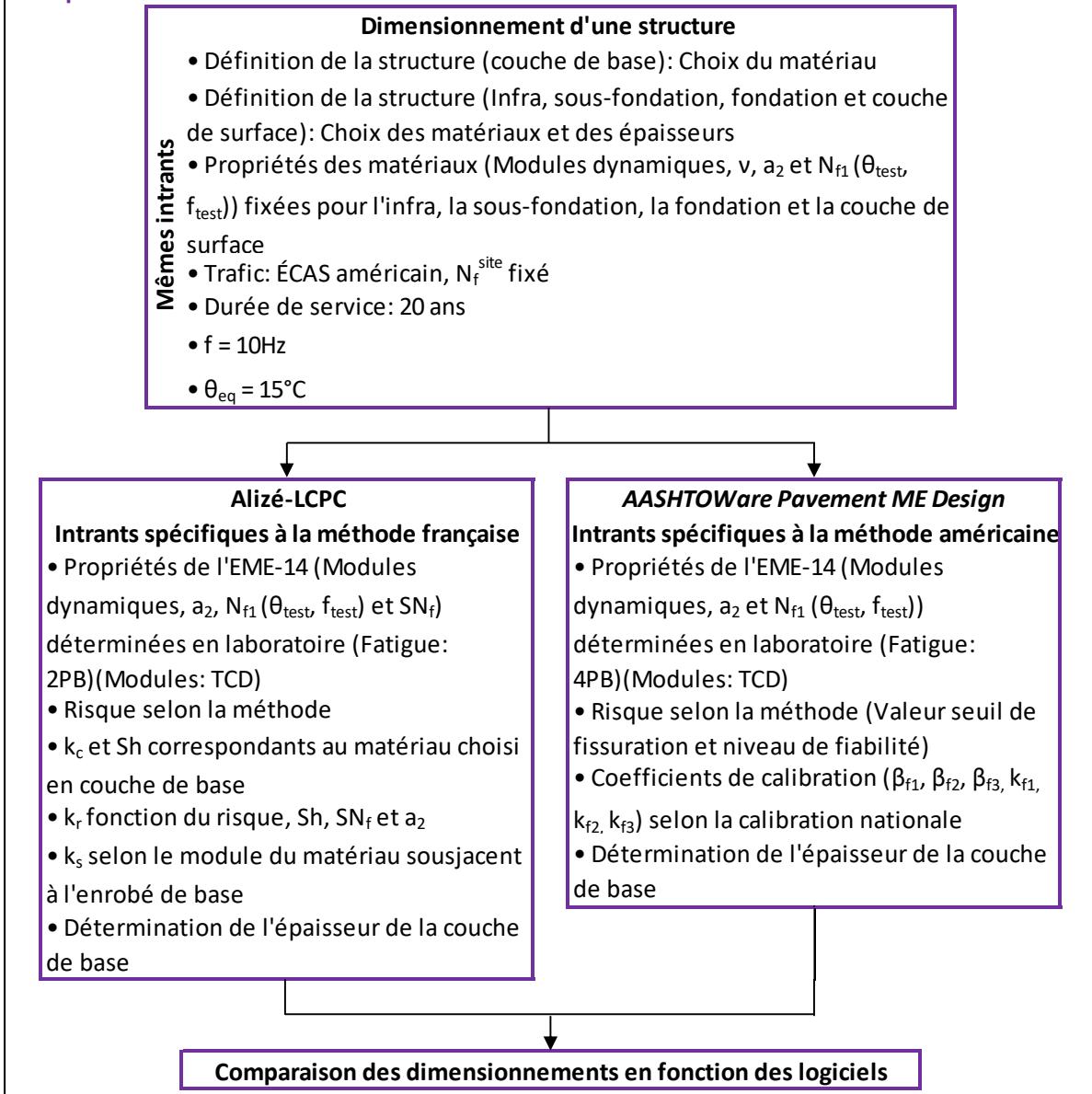


Figure 2.3 Organigramme du volet 4 du programme expérimental

2.3.1 Volet 1 – Formulation, validation et caractérisation de l'EME-14

Comme le titre et l'organigramme du volet 1 (Figure 2.1) l'indiquent, le premier volet se réalise en trois étapes. Premièrement, à la suite de l'échantillonnage et la caractérisation des matières premières, l'EME-14 est formulé. À cette étape, les essais de détermination de la densité

maximale (d_{mm}) et d'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG) sont faits. En fonction de la conformité des résultats, la formulation est ajustée ou acceptée. Deuxièmement, une validation des propriétés TM de l'EME-14 est faite afin de s'assurer de répondre aux exigences proposées par Bitume Québec (2014) pour les EME-14. Tout d'abord, une première plaque d'enrobé est produite au compacteur MLPC. Des éprouvettes cylindriques sont carottées de celle-ci. Au niveau du module complexe, deux vérifications sont faites. Il faut s'assurer que $|E^*|(10^\circ\text{C}; 10\text{Hz})$ soit supérieur ou égal à 14 000 MPa et que $|E^*|(15^\circ\text{C}; 10\text{Hz})$ soit supérieur ou égal à 11 000 MPa. Au niveau de la résistance à la fatigue en traction-compression directe, il faut s'assurer que ϵ_6 à 10°C et 10 Hz soit supérieur à 130 $\mu\text{m/m}$. Enfin, au niveau de la résistance au retrait thermique empêché (TSRST), il faut s'assurer que la température de rupture soit inférieure à $-28,0^\circ\text{C}$. Finalement, la caractérisation complète de l'EME-14 est faite en vue de cerner les propriétés TM requises pour un dimensionnement ME et de produire une fiche technique de produit (FTP). À cette étape, des plaques MLPC supplémentaires sont produites.

2.3.2 Volet 2 – Évaluation de l'influence du type de sollicitation et de la fréquence sur la résistance à la fatigue de l'EME-14

Le deuxième volet est spécifique à la résistance à la fatigue de l'EME-14. Les essais de fatigue sont généralement conduits en contrôle de déplacement (de déformation pour les essais homogènes).

Très souvent, il est admis que la durée de vie en fatigue (N_f^{labo}) est tributaire de l'extension maximale imposée au matériau en cours d'essai. En d'autres mots, seule l'amplitude de l'extension affecterait la durée de vie en fatigue d'une éprouvette. Dans cette perspective, certains auteurs vont considérer l'amplitude pic-à-pic pour une sollicitation imposée en extension de type haversine ($\epsilon_0^{\text{pk-pk}}$ du signal haversine de la Figure 2.4) dans la détermination des paramètres de la loi de fatigue. Or, la façon de définir les amplitudes de sollicitation sinusoïdale modifie substantiellement les paramètres de la loi de fatigue. Il convient d'apporter un certain éclairage à ce niveau. En ce sens, l'évaluation de l'influence du type de sollicitation sur la résistance à la fatigue de l'EME-14 est considérée. La comparaison est faite pour deux

types de signaux : sine et haversine (Figure 2.4). Bien évidemment, la température et la fréquence sont constantes (10°C ; 10Hz) afin d'isoler seulement l'effet du type de sollicitation. Les lois de fatigue respectives sont ainsi produites et comparées.

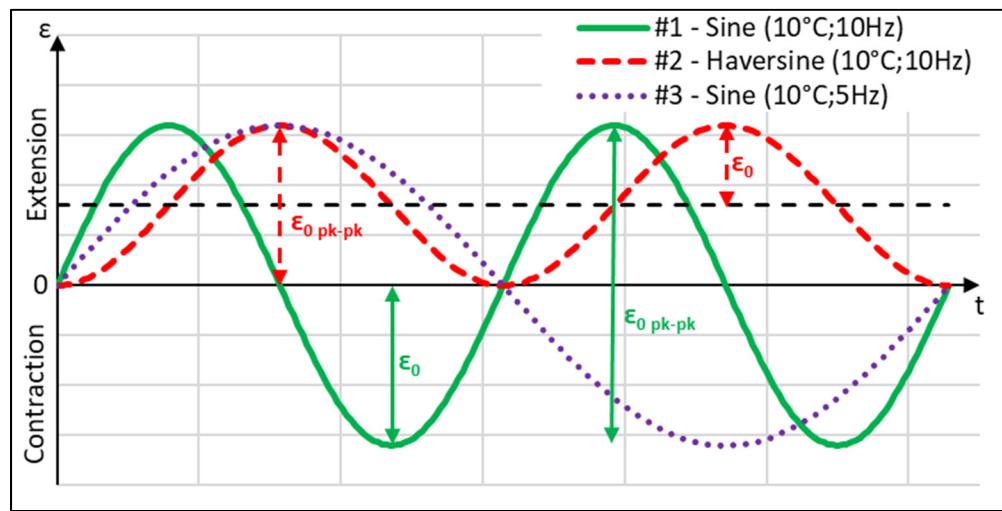


Figure 2.4 Types de chargements cycliques sinusoïdaux réalisés
– Essais de fatigue

Les méthodes d'essais de fatigue normalisées diffèrent notamment quant à la température et la fréquence auxquelles les essais sont réalisés. Puisque les outils de dimensionnement ME tels qu'Alizé-LCPC, OPECC et PvME ne réfèrent pas à la même norme, il est approprié de cerner, en partie, l'influence de ces conditions d'essai sur la réponse en fatigue décrite par les paramètres de la loi de fatigue ($N_{fl}(\theta_{test}, f_{test})$, a_2 et a_3). Il devient nécessaire, pour naviguer d'une méthode de dimensionnement à l'autre, d'avoir une idée des différences encourues entre les méthodes d'essai et, ultimement, de voir à les corréler. Ainsi, l'évaluation de l'influence de la fréquence sur la résistance à la fatigue de l'EME-14 est explorée. Pour ces essais, les signaux sont de type sine et la température est fixée à 10°C . Ainsi, il est possible d'analyser l'effet exclusif de la fréquence sur la résistance à la fatigue. Les fréquences étudiées sont 5 Hz et 10 Hz. Bref, une loi de fatigue est produite pour chacun des trois modes de sollicitation :

- sine (10°C ; 10Hz);
- haversine (10°C ; 10Hz);
- sine (10°C ; 5Hz).

2.3.3 VOLET 3 – VALIDATION DES CORRESPONDANCES ENTRE LES LOGICIELS ALIZÉ-LCPC, OPECC ET AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN

Pour l'entreprise Eurovia, il devient important de maîtriser le logiciel de la méthode de dimensionnement ME américaine *AASHTOWare Pavement ME Design*. Effectivement, bien que l'entreprise soit originellement française, sa présence sur le marché américain est grandissante et l'oblige à s'ajuster à la méthode de dimensionnement américaine. Évidemment, Eurovia maîtrise bien la méthode française de dimensionnement et le logiciel Alizé-LCPC. Ainsi, il devient intéressant d'établir des correspondances entre les deux méthodes pour permettre à Eurovia de s'appuyer sur une méthode maîtrisée. Il est également important de mentionner que seulement le phénomène d'endommagement de fissuration par fatigue (*Bottom-up fatigue cracking*) est analysé dans le cadre de ce mémoire.

Ce volet veut répondre à la prémissse suivante : pour les mêmes intrants, des logiciels ayant des lois et/ou modèles similaires de calcul de contraintes et de déformations (Burmister), d'endommagement par fatigue (Wöhler) et de cumul des dommages (Miner) doivent mener au même dimensionnement.

La Figure 2.2 présente les étapes suivies pour chacun des exemples. Au niveau des intrants, une structure est fixée du côté du choix des matériaux pour toutes les couches. Puis, pour toutes les couches, sauf la couche de base, les épaisseurs sont également fixées. Au niveau des propriétés des matériaux (Modules dynamiques, v , a_2 , a_3 et $N_{fl}(\theta_{test}, f_{test})$), la banque de données Alizé-LCPC est utilisée. Au niveau du trafic, l'ÉCAS américain est utilisé et le nombre d'ÉCAS cumulé $N_{f,site}$ (NE dans Alizé) est fixé. La durée de vie est fixée à 20 ans. Les simulations sont faites à températures constantes équivalentes pour un trafic homogène. Ainsi, la fréquence et la température équivalente sont fixées respectivement à 10 Hz et 15°C. Le risque est fixé selon la norme NF P98-086. Le coefficient de calage k_c , Sh et SN_f sont fixés en fonction du matériau choisi en couche de base. Le coefficient de calage k_r est fixé en fonction du risque choisi, Sh , SN_f et a_2 . Le coefficient de calage k_s est fixé en fonction du module du matériau sous-jacent à l'enrobé de base. Avec l'ensemble de ces intrants, l'épaisseur de la couche de base est déterminée pour Alizé-LCPC et OPECC. Du côté d'*AASHTOWare*

Pavement ME Design, les mêmes intrants sont utilisés. Pour y arriver, il faut faire plusieurs ajustements. Par exemple, il faut calculer les coefficients de calibration globaux (β_{f1} , β_{f2} , β_{f3}) et locaux (k_{f1} , k_{f2} , k_{f3}). Puis, il est possible de déterminer l'épaisseur de la couche de base pour *AASHTOWare Pavement Me Design*. Enfin, celle-ci est comparée à l'épaisseur de la couche de base déterminée avec Alizé-LCPC et OPECC.

2.3.4 Volet 4 – Comparaison des dimensionnements d’Alizé-LCPC et d’AASHTOWare Pavement ME Design incorporant l’EME-14

Ce volet vise à comparer les dimensionnements obtenus avec Alizé-LCPC et *AASHTOWare Pavement ME Design* pour une structure incorporant l’EME-14 et une GB3 en couche de base tout en respectant les méthodes de dimensionnement respectives à chacun des logiciels utilisés.

Comme pour le volet 3, plusieurs intrants sont les mêmes pour les différents logiciels. La structure est fixée du côté du choix des matériaux pour toutes les couches. Puis, pour toutes les couches, sauf la couche de base, les épaisseurs sont également fixées. Au niveau des propriétés des matériaux autres que la couche de base (Modules dynamiques, v , a_2 et $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$), la banque de données Alizé-LCPC est utilisée. Au niveau du trafic, l’ÉCAS américain est utilisé et le N_f^{site} (NE) est fixé. La durée de vie est fixée à 20 ans. La fréquence et la température équivalentes sont fixées respectivement à 10 Hz et 15°C. Les autres intrants nécessaires au dimensionnement d’une structure de chaussée sont spécifiques à la méthode française et américaine.

Pour Alizé-LCPC, la loi de fatigue de l’EME-14 (a_2 , $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$ et SN_f) est déterminée en laboratoire grâce à l’essai de fatigue en flexion 2 points (2PB) et les modules proviennent d’essais en traction-compression directe. Le risque est fixé selon la norme NF P98-086. Le coefficient de calage k_c et Sh sont fixés en fonction du matériau choisi en couche de base. Le coefficient de calage k_r est fixé en fonction du risque choisi, Sh , SN_f et a_2 . Le coefficient de calage k_s est fixé en fonction du module du matériau sous-jacent à l’enrobé de base. Avec l’ensemble de ces intrants, l’épaisseur de la couche de base est déterminée pour Alizé-LCPC.

Du côté d'*AASHTOWare Pavement ME Design*, la loi de fatigue de l'EME-14 (a_2 et $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$) est déterminée en laboratoire grâce à l'essai de fatigue 4 points et les modules proviennent d'essais en traction-compression directe. Toutefois, tous les coefficients de calibration (β_{f1} , β_{f2} , β_{f3} , k_{f1} , k_{f2} , k_{f3}) sont laissés à leur valeur par défaut, déterminée lors de la calibration nationale. Le risque, caractérisé par la valeur seuil de fissuration et le niveau de fiabilité, est fixé selon le manuel de pratique de MEPDG (A. AASHTO, 2008). Enfin, les dimensionnements obtenus avec chacun des logiciels sont comparés.

CHAPITRE 3

MATÉRIAUX, FORMULATION, CONFECTIION DES ÉPROUVENTES ET ESSAIS DE LABORATOIRE

Ce chapitre présente les matériaux utilisés, la formulation de l'EME, la confection des éprouvettes en laboratoire et les essais de laboratoire réalisés sur l'enrobé.

3.1 Matériaux utilisés

L'EME testé est confectionné avec un bitume de grade de performance élevé (PG 88-28) jumelé à des granulats dont la grosseur nominale maximale (GNM) est de 14 mm : EME-14. Le squelette granulaire dense et continu est obtenu grâce à un mélange homogène de différentes classes granulaires dans des proportions précises. Les granulats sont présentés en détail dans la section 3.1.1.

Selon l'ancienne classification des bitumes, le grade de performance exigé pour le bitume d'un EME-14 est : PG 88-28 (Bitume Québec, 2014). Puisque l'essai MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) selon l'AASHTO T 350 (AASHTO, 2014b) n'a pas été fait, il est impossible de classer avec exactitude le bitume selon cette classification en vigueur depuis 2019 au Québec. Toutefois, la norme AASHTO M 332 (AASHTO, 2014a) réfère à différents niveaux de résistance aux sollicitations, selon le nombre d'ÉCAS cumulé (N_f^{site}) et la vitesse du trafic, pour classer les bitumes. Étant donné que l'EME-14 est utilisé dans des conditions sévères de trafic, on peut facilement projeter le bitume exigé dans les classes de sollicitation très forte (*[V]ery*) PG 64V-28 et extrême (*[E]xtreme*) PG 64E-28. La classe de sollicitation très forte (V) réfère à un N_f^{site} supérieur à 30 millions d'ÉCAS ou une vitesse inférieure à 20 km/h. La classe de sollicitation extrême (E) réfère à un N_f^{site} supérieur à 30 millions d'ÉCAS et une vitesse inférieure à 20 km/h (AASHTO, 2014a). Dans le cadre de ce mémoire, le bitume fera référence à l'ancienne classification (PG H-L). Le bitume est présenté en détail dans la section 3.1.2.

3.1.1 Caractéristiques des granulats

Dans le cadre de ce mémoire, l'ensemble des granulats qui servent au projet de RDC2 a été échantillonné et caractérisé. Le filler provient de l'usine d'enrobage Jarry à Montréal. Les granulats proviennent de trois carrières de la grande région de Montréal (St-Bruno, St-Jacques et St-Philippe). Au total, un peu plus de quatre tonnes de granulats a été échantillonné. Le Tableau 3.1 présente les prévisions quant aux quantités minimales de granulats à échantillonner pour chaque classe granulaire et le nombre de chaudières nécessaires à cet échantillonnage.

Tableau 3.1 Récapitulatif du plan d'échantillonnage

Classe granulaire d/D (mm)	Provenance	Masse totale requise (kg)	Nb. de chaudières pour échantillonnage ⁽¹⁾	Masse à récupérer (kg)	Nb. de chaudières après homogénéisation ⁽²⁾	Masse par chaudière après homogénéisation (kg) ⁽³⁾
14/20	St-Philippe	418	21	420	16 (1 lot)	26
10/14	St-Philippe	682	35	700	32 (2 lots)	22
5/10	St-Philippe	583	30	600	32 (2 lots)	19
0/3,15	St-Philippe	1 352	68	1 360	64 (4 lots)	21
0/5 Hummer	St-Philippe	362	19	380	16 (1 lot)	24
0/5	St-Bruno	75	4	80	4 (1 lot)	20
2,5/5	St-Jacques	381	20	400	16 (1 lot)	25
Filler	Jarry, MTL	63	4	80	4 (1 lot)	20
		Total	201	4 020		

⁽¹⁾ La masse par chaudière est évaluée à 20 kg. Ex: $418/20 = 20,9 = 21$ chaudières

⁽²⁾ Le nombre de chaudière est approché au multiple de 16 le plus près. Les lots sont composés de 16 chaudières. Dans le cas de la criblure de St-Bruno et du filler, on conserve le même nombre de chaudières qu'à l'échantillonnage.

⁽³⁾ La masse par chaudière après homogénéisation correspond à la masse à récupérer divisée par le nombre de chaudières après homogénéisation.
Ex: Masse à récupérer = $21*20 = 420$ kg
Masse par chaudière = $420/16 = 26,25$ kg ≈ 26 kg

La quantité de chaudières réellement échantillonnées diffère légèrement du plan d'échantillonnage. L'homogénéisation des différentes classes granulaires a été une étape importante qui a permis d'avoir des granulats homogènes tout au long du projet. L'homogénéisation des 216 chaudières de granulat s'est faite sur plusieurs jours de travail. Cette étape consiste à diviser au séparateur mécanique chaque chaudière en seize parties égales, lesquelles sont placées distinctement dans seize nouvelles chaudières (Figure 3.1).

Ainsi, chaque nouvelle chaudière est constituée du seizième des chaudières échantillonnées. La Figure 3.2 présente une photo de l'ensemble des matériaux granulaires échantillonnés et homogénéisés. Le Tableau 3.2 présente comment l'homogénéisation s'est faite pour les différents granulats, le nombre de chaudières échantillonnées et le nombre de chaudières finales. La quantité échantillonnée de pierre concassée 14/20 mm a nécessité l'homogénéisation suivant deux lots distincts plutôt qu'en un seul comme prévu. Même chose pour l'homogénéisation de la criblure 2,5/5 mm qui s'est faite sur deux lots distincts plutôt que sur un seul comme prévu. La cause de ces différences est liée au fait que la masse échantillonnée dans chaque chaudière était supérieure aux 20 kg prévus initialement. Cela ne cause pas de problème, puisqu'au final plus de matériaux ont été échantillonnés. Toutefois, il est conseillé d'utiliser le premier lot pour ces deux matériaux puisque l'homogénéisation s'est faite sur un plus grand nombre de chaudières que le deuxième lot. Finalement, le filler n'a pas été homogénéisé.

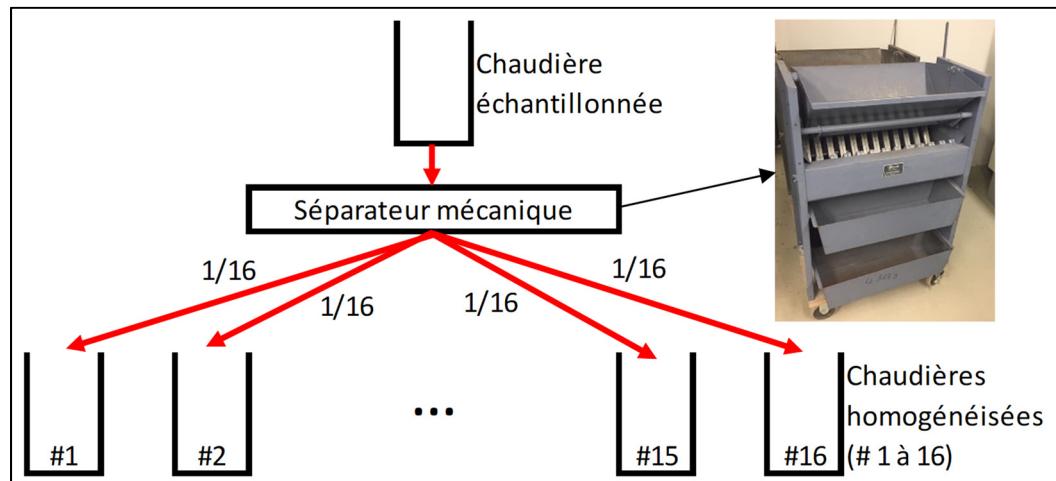


Figure 3.1 Illustration du procédé utilisé pour homogénéiser les différentes classes granulaires à partir d'un séparateur mécanique



Figure 3.2 Ensemble des matériaux granulaires échantillonnés et homogénéisés

Tableau 3.2 Récapitulatif de l'homogénéisation des différentes classes granulaires

Classe granulaire d/D (mm)	Provenance	Nb. de chaudières échantillonnées	Nb. de chaudières après homogénéisation	Nb. de lots
14/20	St-Philippe	23	20 ⁽¹⁾	2 ⁽¹⁾
10/14	St-Philippe	38	32	2
5/10	St-Philippe	32	32	2
0/3, 15	St-Philippe	73	64	4
0/5 Hummer	St-Philippe	20	16	1
0/5	St-Bruno	4	4	1
2,5/5	St-Jacques	22	18 ⁽²⁾	2 ⁽²⁾
Filler ⁽³⁾	Jarry, MTL	4	4	1
	Total	216	190	

(¹) Un premier lot de 16 chaudières provenant de l'homogénéisation de 19 chaudières et un deuxième lot de 4 chaudières provenant de l'homogénéisation de 4 chaudières.

(²) Un premier lot de 16 chaudières provenant de l'homogénéisation de 20 chaudières et un deuxième lot de 2 chaudières provenant de l'homogénéisation de 2 chaudières.

(³) L'homogénéisation n'a pas été faite sur le filler.

Au niveau de la caractérisation des granulats, en plus de caractériser les granulats composant l'EME-14, les granulats de classes complémentaires, utilisés pour confectionner un enrobé de référence pour fins de comparaisons (GB-20), ont également été caractérisés. Le Tableau 3.3

présente les caractéristiques des granulats fins (classes granulaires 0/3,15; 0/5 Hummer; 0/5; 2,5/5 et filler) et le Tableau 3.4 présente les caractéristiques gros granulats (classes granulaires 5/10; 10/14 et 14/20).

Tableau 3.3 Caractéristiques des granulats fins et du filler

	Essai	Norme	Classe granulaire d/D (mm)				
			0/3,15	0/5 Hummer	0/5	2,5/5	Filler
Caractéristiques intrinsèques	Provenance	NA	St-Philippe	St-Philippe	St-Bruno	St-Jacques	Jarry, MTL
	Micro-Deval (%)	LC 21-101	21	5	7	2	NA
	Friabilité (%)	LC 21-080	32	33	10	30	NA
	Catégorie du granulat	NQ2560-114	1	1	1	1	NA
	Densité brute sèche	LC 21-065 /LC 21-066	2,627	2,710	2,736	2,693	NR
	Densité apparente		2,762	2,789	2,818	2,759	2,803
	Absorption (%)		1,86	1,06	1,08	0,89	NR
Granulométrie	Tamis (mm)	LC 21-040	% passant				
	5		99	97	96	94	100
	4		94	85	87	71	100
	3,15		84	71	73	41	100
	2,5		75	58	61	18	100
	1,25		54	26	35	5	99
	0,630		40	11	22	3	99
	0,315		31	8	15	3	99
	0,160		25	6	10	3	97
	0,080		19,5	5,0	8,0	2,4	87,6

Tableau 3.4 Caractéristiques des gros granulats

	Essai	Norme	Classe granulaire d/D (mm)		
			14/20	10/14	5/10
	Provenance	NA	St-Philippe	St-Philippe	St-Philippe
Caractéristiques intrinsèques	Micro-Deval (%)	LC 21-070	13	17	8
	Grade		A	C	E
	Los Angeles (%)	LC 21-400	28	24	24
	Grade		B1	B2	C1
	MD+LA (%)	NA	41	41	32
	Catégorie du granulat	NQ2560-114	2	2	1
Caractéristiques de fabrication	Particules fracturées (%)	LC 21-100	100 %, carrière	100 %, carrière	100 %, carrière
	Particules plates (%)	LC 21-265	16,7	13,8	17,5
	Particules allongées (%)	LC 21-265	22,4	40,0	26,3
	Catégorie du granulat	NQ2560-114	a	a	a
	Densité brute sèche	LC 21-067	2,729	2,727	2,738
	Densité apparente		2,768	2,772	2,788
	Absorption (%)		0,52	0,60	0,66
Granulométrie	Tamis (mm)	LC 21-040	% passant		
	28		100	100	100
	20		93	100	100
	14		13	86	100
	10		2	13	82
	5		1	2	5
	2,5		1	2	1
	1,25		1	1	1
	0,630		1	1	1
	0,315		1	1	1
	0,160		1	1	1
	0,080		0,5	0,9	0,8

Les granulats qui composent l'EME-14 sont :

- pierre concassée 10/14 mm de St-Philippe,
- pierre concassée 5/10 mm de St-Philippe,

- criblure 0/3,15 mm de St-Philippe,
- criblure 2,5/5 mm de St-Jacques,
- filer de l'usine d'enrobage Jarry à Montréal.

Selon les exigences du MTQ, les gros granulats doivent être minimalement de catégorie 2c et les granulats fins de catégorie 1. Selon les exigences de Bitume Québec (2014), les gros granulats doivent être minimalement de catégorie 2a et les granulats fins de catégorie 2. Le Tableau 3.5 compare la catégorie des granulats aux exigences du MTQ et de Bitume Québec (2014).

Tableau 3.5 Vérification de la catégorie des granulats

Classe granulaire d/D (mm)	Provenance	Catégorie du granulat RDC2	Exigence MTQ		Exigence Bitume Québec	
			NQ2560-114	Catégorie	Respect	Catégorie
10/14	St-Philippe	2a	2c	Oui	2a	Oui
5/10	St-Philippe	1a	2c	Oui	2a	Oui
0/3,15	St-Philippe	1	1	Oui	2	Oui
2,5/5	St-Jacques	1	1	Oui	2	Oui

3.1.2 Caractéristiques du bitume

Suivant les recommandations de Bitume Québec (2014), l'utilisation d'un grade de bitume à haute performance (PG 88-28) offrant une rigidité élevée, une haute résistance à la fatigue et une bonne résistance aux conditions climatiques du Québec est recommandée pour la confection de l'EME-14. Le bitume Viaflex M® de Bitumar Inc a été utilisé dans le cadre du RDC2. Le Tableau 3.6 présente les principales caractéristiques du bitume utilisé et l'attestation de conformité est présentée à l'ANNEXE II. Au total, 139 litres de ce bitume étaient disponibles pour le projet RDC2.

Tableau 3.6 Caractéristiques du bitume Viaflex M®

Fournisseur		Bitumar Inc.					
Lieu de fabrication		3000 Broadway, Montréal, QC					
Classe du bitume		PG 88-28					
Caractéristique		Résultat					
Caractéristique	Norme	Bitumar	CTA	LCMB			
Masse volumique (g/cm ³) à 15°C		1,022	NR	NR			
Masse volumique (g/cm ³) à 25°C	AASHTO T228	1,016	NR	1,015			
Viscosité Brookfield (Pa*s) à 135°C		4,465	NR	5,533			
Viscosité Brookfield (Pa*s) à 165°C	AASHTO T316	0,813	0,900	0,950			
TBA moyenne (°C)		LC 25-003	98,0	NR	97,8		
Recouvrance d'élasticité (%) à 10°C	LC 25-005	65	NR	70			
Teneur en cendre (%)	LC 25-008	0,2	NR	0,1			
Variation de masse au RTFOT (%)	AASHTO T240	0,62	0,42	0,24			
Température élevée de caractérisation Te (°C)	AASHTO T315	103,2	101,5	106,4			
Température basse de caractérisation Tb (°C)	AASHTO T313	-31,6	NR	-28,1			
Module de rigidité So (60) (MPa)		92,4	NR	146,0			
Recommandations - Température d'utilisation		Température (°C)					
Entreposage	NA	161	175	161	175	161	175
Malaxage	LC 25-007	171	185	185	Visée	203	Calculée
Compactage	LC 25-007	NS	NS	170	Visée	189	Calculée

NA: Non applicable
 NR: Non réalisé
 NS: Non spécifié
 Visée: Recommandations du CTA
 Calculée: Valeurs calculées selon les viscosités mesurées par Bitumar à 135 et 165°C. Toutefois, ces températures sont trop élevées et engendreraient un vieillissement accéléré du bitume.

3.2 Formulation de l'enrobé à module élevé 14 mm (EME-14)

La formulation de l'EME-14 étudié a été calée à une formulation existante : l'EME-14 St-Philippe. Cette formulation de référence a été choisie parce que les pierres concassées 5/10 mm et 10/14 mm et la criblure 0/3,15 mm utilisées proviennent de la même carrière (St-Philippe). Cependant, pour la formulation de référence, une criblure 3,15/6,3 mm de St-Jacques a été utilisée et, pour la nouvelle formulation, c'est une criblure 2,5/5 mm de St-Jacques qui est utilisée. La granulométrie de la formulation de référence (EME-14 St-Philippe) est présentée au Tableau 3.7. La granulométrie de la formulation de l'EME-14 du projet RDC2 est présentée au Tableau 3.8. La Figure 3.3 présente la granulométrie de l'EME-14 du projet RDC2 en comparaison avec la courbe de masse volumique maximale (CMVM).

Tableau 3.7 Granulométrie de l'EME-14 St-Philippe de référence

Classe granulaire d/D (mm)	% passant au tamis (mm)										Proportion utilisée	
	28	20	14	10	5	2,5	1,25	0,630	0,315	0,160	0,080	
10/14	100	100	87	12	3	3	2	2	2	2	2,0	18,7%
5/10	100	100	100	89	8	2	2	2	2	2	1,3	13,5%
3,15/6,3	100	100	100	100	72	5	5	4	4	4	3,8	13,8%
0/3,15	100	100	100	100	100	83	63	48	36	29	23,1	54,0%
EME-14 de référence	100	100	98	82	66	46	35	27	21	17	13,5	
											Total	100,0%

Tableau 3.8 Granulométrie de l'EME-14 étudié

Classe granulaire d/D (mm)	% passant au tamis (mm)										Proportion utilisée	
	28	20	14	10	5	2,5	1,25	0,630	0,315	0,160	0,080	
10/14	100	100	86	13	2	2	1	1	1	1	0,9	16,8%
5/10	100	100	100	82	5	1	1	1	1	1	0,8	18,0%
2,5/5	100	100	100	100	94	18	5	3	3	3	2,4	2,6%
0/3,15	100	100	100	100	99	75	54	40	31	25	19,5	62,1%
Filler	100	100	100	100	100	99	99	99	99	97	87,6	0,5%
EME-14 RDC2	100	100	98	82	66	48	35	26	20	16	12,9	
EME-14 de référence	100	100	98	82	66	46	35	27	21	17	13,5	
											Total	100,0%
Écart _i	0,00	0,00	-0,36	0,11	-0,32	2,05	-0,49	-1,24	-0,83	-0,56	-0,59	
Écart _i ²	0,00	0,00	0,13	0,01	0,10	4,22	0,24	1,53	0,68	0,32	0,35	
Σ Écart _i ²						7,6						
Écart _{total}						2,8						

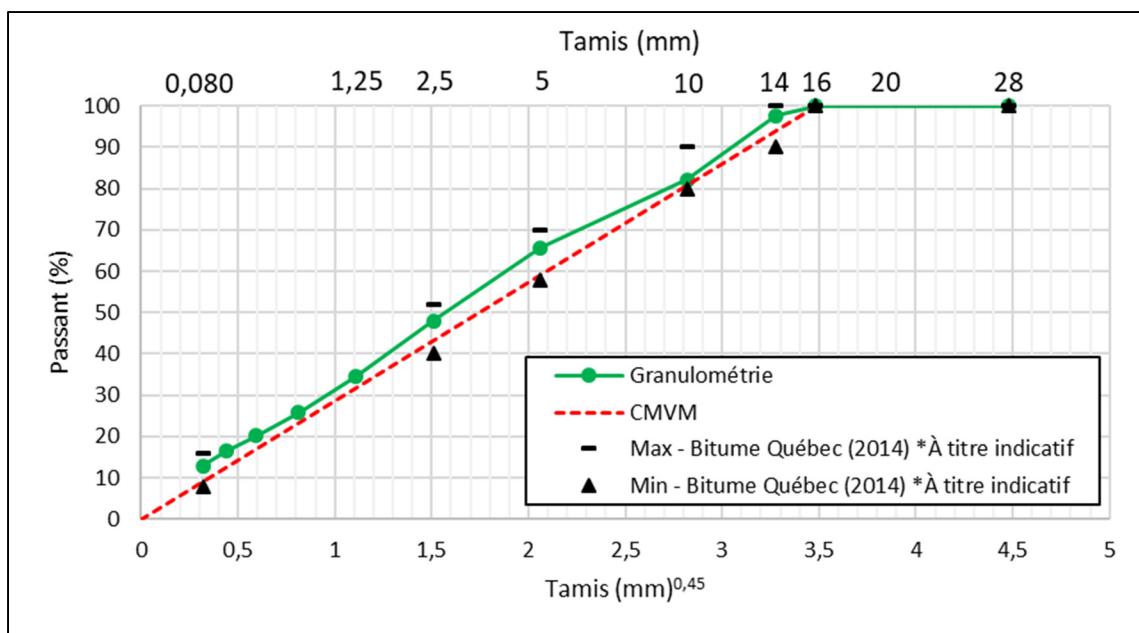


Figure 3.3 Granulométrie de l'EME-14 et CMVM

Eurovia a déterminé la teneur en bitume à 4,40 % massique. Bitume Québec (2014) recommande une teneur en bitume minimale de 3,75 %. La formule ainsi fixée doit être validée par plusieurs essais en laboratoire comme :

- la détermination de l'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG) qui passe par la détermination de la densité maximale,
- la détermination de la résistance à la déformation à l'essai d'ornierage,
- la détermination de la résistance au retrait thermique empêché,
- la détermination du module complexe,
- la détermination de la résistance à la fatigue.

3.2.1 Détermination de la densité maximale

La densité maximale (d_{mm}) a été déterminée selon la méthode d'essai LC 26-045: Détermination de la densité maximale. La densité maximale correspond à la densité de l'enrobé bitumineux pour une teneur en vides de 0 %. Dans le cadre de ce mémoire, c'est la méthode par pesée hydrostatique (pesée dans l'eau) qui a été utilisée. Cette densité maximale sert au calcul de la teneur en vides des éprouvettes, de l'absorption de bitume et de la masse requise pour les essais d'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire et de fabrication d'éprouvettes au compacteur MLPC. Les résultats sont traités à la section 4.1.1.

3.2.2 Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire (PCG)

L'aptitude au compactage de l'EME-14 a été déterminée par la méthode d'essai LC 26-003: Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire. L'essai : «détermine la maniabilité d'un enrobé à chaud par la confection d'éprouvettes de forme et de volume déterminés à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire» (MTQ, 2018a). Cette maniabilité est importante pour s'assurer que l'enrobé produit sera suffisamment maniable en chantier pour atteindre la compaction visée. Bitume Québec (2014) suggère pour l'EME-14 une compaction élevée, de l'ordre de 96 % et même 98 %. L'aptitude au compactage est déterminée par le suivi de la teneur en vides en fonction de certains nombres

de girations : N_{10} , N_{design} et N_{200} . Pour l'EME-14, Bitume Québec (2014) propose les teneurs en vides du Tableau 3.9. Les résultats sont traités à la section 4.1.2.

Tableau 3.9 Exigences quant aux vides de l'EME-14 à la PCG
Adapté de Bitume Québec (2014)

	Nbr. de girations	% de vides	Correspondance en chantier
N_{10}	10	$\geq 11,0$	Compaction à la sortie de la paveuse
N_{design}	100	4,0 à 7,0	Compaction suite au passage des engins de compaction (Compaction à l'ouverture au trafic)
N_{200}	200	$\geq 2,0$	Compaction à la fin de vie de la route

3.3 Confection des éprouvettes pour les essais thermomécaniques

Pour faire la caractérisation thermomécanique (Fatigue, E^* et TSRST) de l'EME-14, il faut produire les éprouvettes nécessaires. Dans le cadre de ce mémoire, celles-ci proviennent de deux sources : de briquettes PCG et de plaques d'enrobé compactées en laboratoire avec le compacteur MLPC. Dans les deux cas, la fabrication des éprouvettes commence par le malaxage en laboratoire de l'enrobé. Ensuite, ce dernier est compacté à la PCG ou au compacteur MLPC. Finalement, les éprouvettes sont forées et sciées aux dimensions voulues.

3.3.1 Malaxage des enrobés

Le malaxage consiste essentiellement à mélanger les granulats et le bitume pour produire de manière homogène l'EME-14. Cependant, cette étape est cruciale et d'une importance majeure puisqu'elle influence directement le comportement thermomécanique. En effet, il faut s'assurer de produire un enrobé homogène avec un enrobage homogène des granulats. Le malaxage de l'EME-14 se fait selon les méthodes d'essai LC 26-003 et LC 26-400 à quelques exceptions près. La séquence de malaxage consiste essentiellement à :

1. Peser à sec la quantité nécessaire de chacune des classes granulaires et la quantité de bitume (Voir Tableau 3.10 pour une approximation de la masse requise d'enrobé pour les différents types d'essais).

Tableau 3.10 Masse approximative requise d'enrobé selon l'essai

Essai	Masse approximative requise d'enrobé (kg)
Densité maximale (d_{mm})	2,1
Aptitude au compactage (PCG)	16,0
Résistance à l'orniérage	22,0
E^* (compaction à la PCG)	16,0
E^* , Fatigue et TSRST (compacteur MLPC)	73,0

2. Chauffer les granulats, le bitume, le malaxeur, les récipients verseurs et tous les autres accessoires en contact avec l'enrobé à la température de malaxage recommandée par le Centre Technique Amériques (CTA) d'Eurovia (185°C), car le malaxeur est thermo-régulé.
3. Peser les granulats chauds.
4. Ajuster la quantité de bitume à la masse réelle du combiné granulaire.
5. Former un ou des cratères dans les granulats pour peser la quantité de bitume.
6. Mettre les granulats dans le malaxeur thermo-régulé (Tableau 3.11 et Figure 3.4).

Tableau 3.11 Malaxeur thermo-régulé à utiliser en fonction de l'essai

Essai	Capacité du malaxeur utilisé (kg)
Densité maximale (d_{mm})	35
Aptitude au compactage (PCG)	35
Résistance à l'orniérage	35
E^* (compaction à la PCG)	35
E^* , Fatigue et TSRST (compacteur MLPC)	80

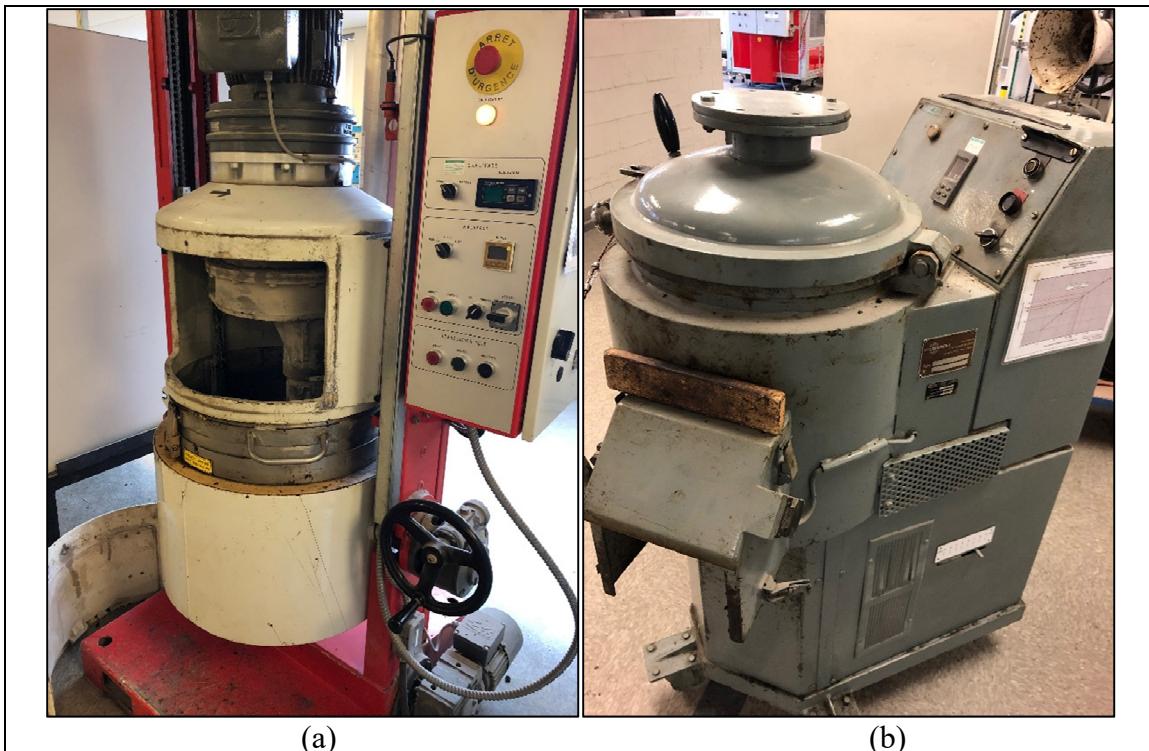


Figure 3.4 Malaxeurs thermo-régulés pour la confection de l'EME-14
 (a) Capacité de 80 kg (b) Capacité de 35 kg

7. Peser le bitume.
8. Insérer le bitume dans le malaxeur.
9. Malaxer jusqu'à l'obtention d'un enrobé homogène et bien enrobé (max. 2 minutes).
10. Récupérer tout l'enrobé produit.
11. Curer l'enrobé dans une étuve à la température de compactage recommandée par le CTA (170°C) (Tableau 3.12).

Bien que les résultats en laboratoire de viscosité Brookfield du bitume fixent la température de malaxage (viscosité de $0,17 \pm 0,02 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) à 203°C et de compactage (viscosité de $0,28 \pm 0,03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) à 189°C (MTQ, 2010), Eurovia recommande des températures réduites de malaxage et de compactage, respectivement 185°C et 170°C, pour éviter l'oxydation excessive du bitume (Tableau 3.6).

3.3.2 Cure des enrobés avant les essais

Suite au malaxage et avant la réalisation des essais, l'enrobé est assujetti à une cure en étuve à la température de compactage (170°C). Le Tableau 3.12 donne les temps de cure à cette température de 170°C suivant l'essai projeté.

Tableau 3.12 Temps de cure à 170°C en fonction de l'essai

Essai	Temps de cure (minutes)
Densité maximale (d_{mm})	120
Aptitude au compactage (PCG)	30 à 120
Résistance à l'orniérage (Plaques de 100 mm d'épaisseur)	60
E^* (compaction à la PCG)	Temps pour atteindre la température de compaction et minimum 30 minutes
E^* , Fatigue et TSRST (compacteur MLPC)	Temps pour atteindre la température de compaction

3.3.3 Fabrication d'éprouvettes à la presse à cisaillement giratoire

La fabrication des éprouvettes à la presse à cisaillement giratoire pour les essais de module complexe a été faite en grande partie selon le mode opératoire de la méthode d'essai LC 26-003. La masse introduite dans le moule est différente de celle requise pour évaluer l'aptitude au compactage. La masse requise est établie suivant la teneur en vides ciblée pour une hauteur d'éprouvette de 185 mm. La masse d'enrobé requise est déterminée par la relation suivante :

$$m = d_{mm} \times (1 - V_i) \times \frac{1g}{cm^3} \times \frac{\pi \times \emptyset^2 \times h_f}{4 \times 1000 \text{ mm}^3/cm^3} \quad (3.1)$$

Avec :

m Masse à introduire dans le cylindre de moulage (g)

d_{mm} Densité maximale

V_i Teneur en vides à la température de compactage

\emptyset Diamètre du cylindre de moulage (mm)

h_f Hauteur d'arrêt de la compaction (185 mm)

Il est à noter que la teneur en vides obtenue en cours de compaction, à la température de compaction, diffère légèrement de celle dans l'éprouvette à température ambiante. Par conséquent, la teneur en vides spécifiée pour le compactage des briquettes PCG est de 4,7 % pour obtenir des éprouvettes carottées de module complexe à 2,5 % de vides à température ambiante. 24 heures après le compactage des briquettes PCG, les éprouvettes de module complexe sont extraites par carottage et sciage. Le carottage est fait au centre de la briquette PCG. Ainsi, les variations de teneur en vides et les effets de bord sont limités. Quant à lui, le sciage des deux faces permet d'atteindre la hauteur d'éprouvette désirée et d'avoir des faces planes et parallèles. Finalement, les éprouvettes ainsi produites ont un diamètre de 75 mm et une hauteur de 150 mm. La Figure 3.5 présente le patron de carottage et de sciage.

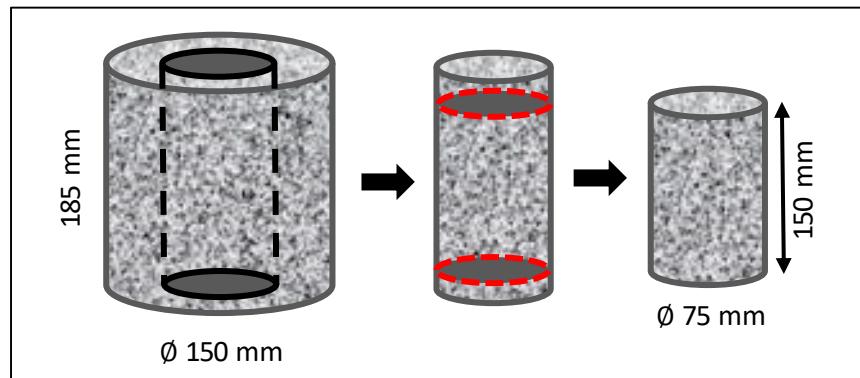


Figure 3.5 Patron de carottage et de sciage
à partir d'une briquette PCG (Ø 150 mm)

3.3.3.1 Identification et entreposage des éprouvettes

Chacune des éprouvettes fabriquées à la PCG pour des essais thermomécaniques est identifiée selon la nomenclature suivante : PCG-#. Par exemple, la première éprouvette est identifiée, PCG-1, et la quatrième éprouvette est identifiée, PCG-4. En attendant d'être mises à l'essai, les éprouvettes sont : «conditionnées en les couchant sur leur axe dans un bac tapissé d'une couche de sable les recouvrant jusqu'à leur centre [géométrique] à la température et à

l'humidité ambiantes» (MTQ, 2018e). Cet entreposage a pour objectif d'éliminer le risque de fluage des éprouvettes.

3.3.4 Fabrication d'éprouvettes au compacteur MLPC

Les plaques d'enrobé bitumineux utilisées pour extraire des éprouvettes pour essais thermomécaniques sont de 125 x 400 x 600 mm³. Ces plaques sont compactées selon la méthode d'essai LC 26-400 : Fabrication d'éprouvettes au compacteur MLPC. Une fois que l'enrobé malaxé atteint la température de compactage ciblée, la fabrication des plaques peut débuter : «Un échantillon d'enrobé est compacté dans un moule à base rectangulaire à l'aide d'une charge roulante équipée d'un pneumatique. La roue exécute des passes à vitesse constante parallèlement à l'axe du moule selon un plan de balayage spécifié» (MTQ, 2018c). La teneur en vides spécifiée pour les plaques est de 5 % à la température de compactage pour obtenir des éprouvettes à 2,5 % de vides à température ambiante.

Après le compactage, la plaque est laissée au repos dans le moule pour 24 heures. Par la suite, la plaque est démoulée et laissée de côté pour deux semaines. Après ces deux semaines, le carottage des éprouvettes peut débuter. De ces plaques, des éprouvettes pour la mesure du module complexe, de la résistance à la fatigue et de la résistance au retrait thermique empêché sont produites. En fonction des essais à faire, deux patrons de carottage et de sciage (A et B) peuvent être suivis. Dans le cas d'essais de module complexe et de fatigue, le patron de carottage et de sciage A est illustré à la Figure 3.6. Dans le cas où des essais de résistance au retrait thermique empêché doivent s'ajouter, le patron de carottage et de sciage B est illustré à la Figure 3.7. L'objectif de ces patrons de carottage est de minimiser les pertes en maximisant le nombre d'éprouvettes tout en limitant les effets de bord qui peuvent amener une variabilité de la teneur en vides au sein d'une éprouvette. Les éprouvettes pour les essais de module complexe et de la résistance à la fatigue ont un diamètre de 75 mm et une hauteur de 150 mm. Les éprouvettes pour mesurer la résistance au retrait thermique empêché ont un diamètre de 60 mm et une hauteur de 250 mm. Après carottage, les éprouvettes sont sciées à la bonne hauteur et pour avoir des faces planes et parallèles.

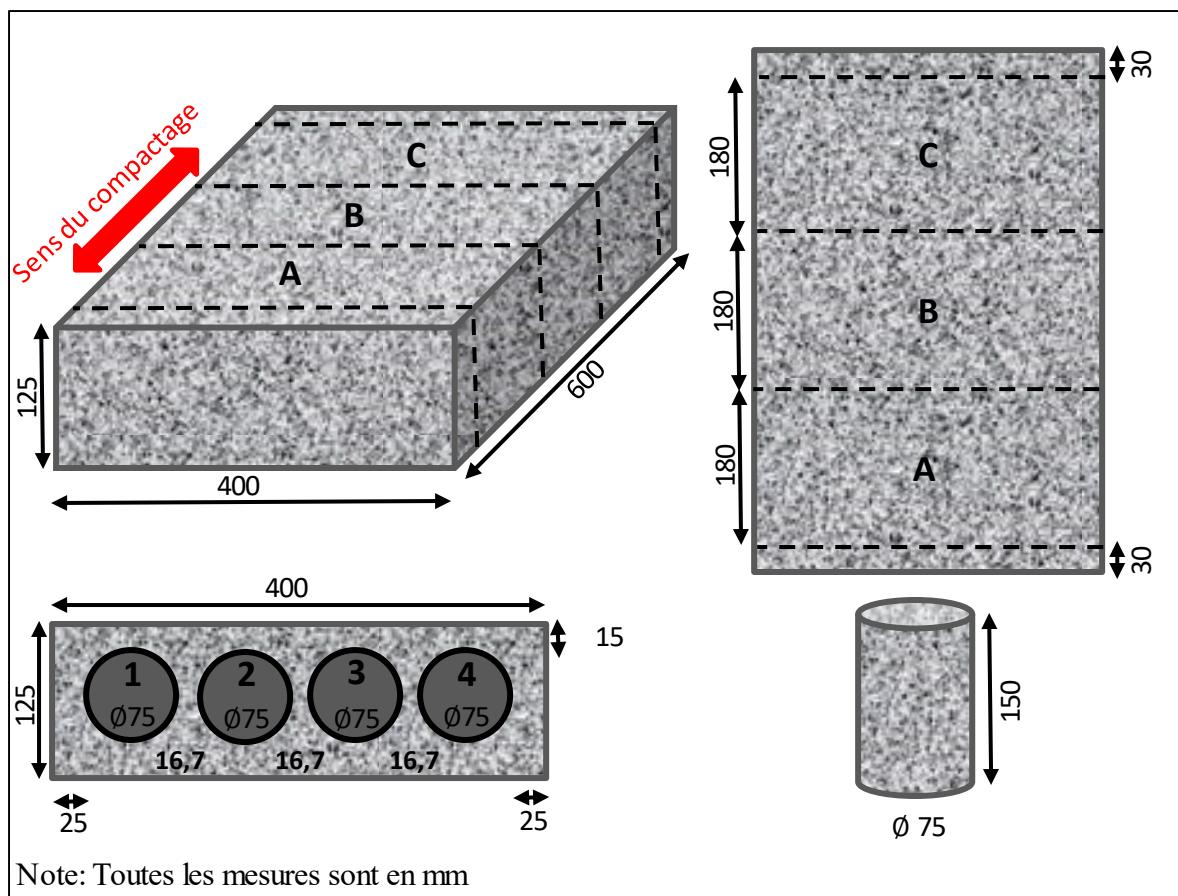


Figure 3.6 Patron de carottage et de sciage A pour des essais de fatigue et de E^*
à partir d'une plaque MLPC

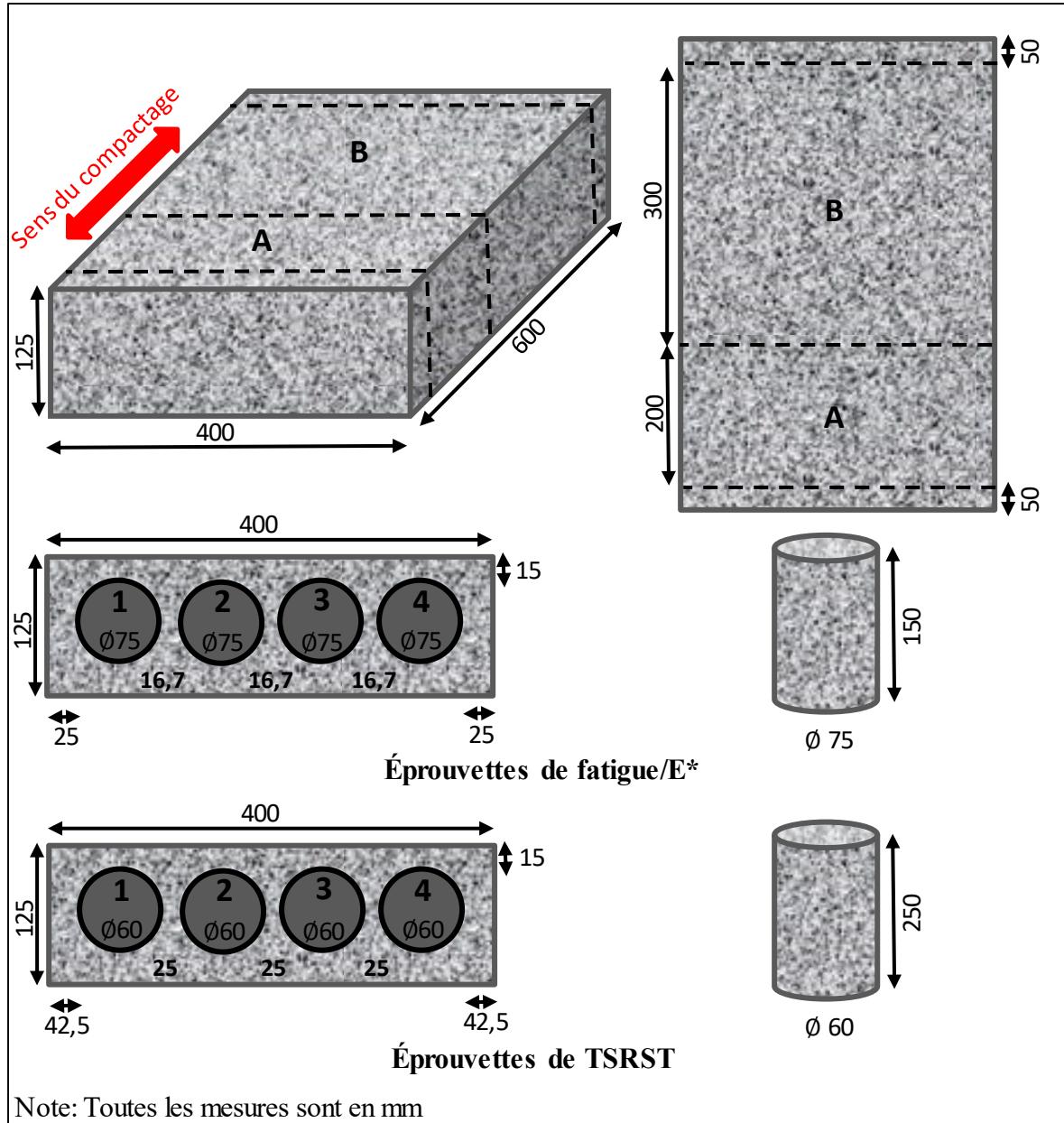


Figure 3.7 Patron de carottage et de sciage B pour des essais de fatigue, de E* et de TSRST à partir d'une plaque MLPC

3.3.4.1 Identification et entreposage des éprouvettes

Chacune des éprouvettes provenant d'une plaque MLPC est identifiée selon la nomenclature présentée à la Figure 3.8. Par exemple, l'éprouvette PL1-B2 est l'éprouvette numéro 2 de la

section B de la première plaque. En attendant d'être mises à l'essai, les éprouvettes sont entreposées dans un bac de sable tel que décrit en 3.3.3.1 pour éviter le fluage.

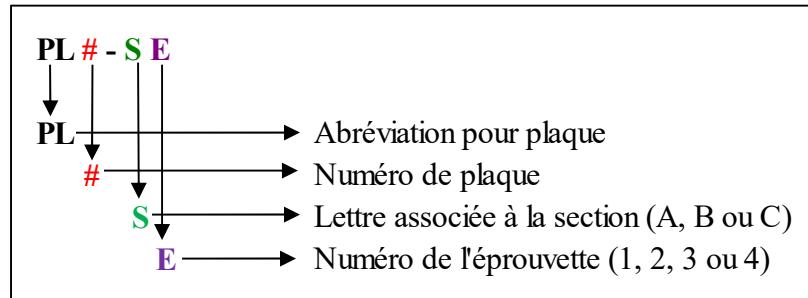


Figure 3.8 Nomenclature des éprouvettes provenant de plaques MLPC

3.3.5 Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés

La teneur en vides des éprouvettes est une caractéristique importante puisqu'elle influence directement le comportement thermomécanique. La détermination de la teneur en vides passe par la détermination de la densité brute (d_{mb}) des éprouvettes. Dans le cadre de ce mémoire, la densité brute des éprouvettes a été déterminée par deux méthodes. La première méthode est celle dite volumique. «La masse à l'état sec (exprimée en grammes) [est divisée] par le volume (exprimée en centimètres cubes). Le volume doit être calculé à partir des dimensions de l'[éprouvette], chaque dimension étant égale à la moyenne de trois mesures effectuées à 120° les unes des autres pour la hauteur, et à 60° pour le diamètre» (MTQ, 2015).

$$\text{Densité brute} = d_{mb} = \frac{A}{\frac{\pi \times \varnothing^2}{4} \times h} \quad (3.2)$$

Avec :

- | | |
|---------------|--|
| A | Masse dans l'air de l'éprouvette sèche (g) |
| \varnothing | Diamètre de l'éprouvette (cm) |
| H | Hauteur de l'éprouvette (cm) |

La deuxième méthode est celle dite hydrostatique. L'éprouvette sèche est pesée dans l'air. La masse de l'éprouvette dans l'eau à $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ est notée après trois à cinq minutes de trempage. L'éprouvette à l'état partiellement saturé superficiellement sec (PSSS) est pesée dans l'air. La densité brute se calcule ainsi (MTQ, 2017a):

$$\text{Densité brute} = d_{\text{mb}} = \frac{A}{B - C} \quad (3.3)$$

Avec :

- A Masse dans l'air de l'éprouvette sèche (g)
- B Masse dans l'air de l'éprouvette PSSS (g)
- C Masse de l'éprouvette partiellement saturée dans l'eau (g)

Le pourcentage de vides se calcule ainsi (MTQ, 2015):

$$\text{vides}(\%) = 100\% \cdot \left(1 - \frac{d_{\text{mb}}}{d_{\text{mm}}}\right) \quad (3.4)$$

3.4 Caractérisation thermomécanique

La caractérisation thermomécanique consiste à trouver le comportement mécanique en fonction de différentes sollicitations et conditions thermiques. Les essais présentés dans le cadre de ce mémoire sont la résistance à l'orniérage, la résistance au retrait thermique empêché (TSRST), la détermination du module complexe (E^*) et la résistance à la fatigue. Ces deux derniers essais sont nécessaires à l'implantation de l'EME-14 au sein des méthodes de dimensionnement mécaniste empirique.

3.4.1 Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage

Deux plaques d'enrobé bitumineux ont été compactées tel que décrit à la section 3.3.4 à quelques exceptions près :

- les dimensions des plaques sont 100 x 180 x 500 mm³,
- une cure de 60 minutes est faite à la température de compactage entre la fin du malaxage et le début du compactage des plaques.

Suite au compactage, lorsque la température de la plaque atteint 25°C, le profil superficiel (hauteur moyenne en mm) de la plaque est déterminé avec la jauge de profondeur aux 15 emplacements prédéterminés (Figure 3.9). Ensuite, la plaque mûrit à la température de la pièce pour 48 heures. Puis, la densité brute est déterminée par la méthode hydrostatique décrite dans la méthode d'essai LC 26-040 : Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés (§3.3.5). Ainsi, il est possible de valider la compaction de la plaque (95 % visée).

L'essai d'orniérage est fait selon la méthode d'essai LC 26-410 : Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage. Deux plaques sont testées simultanément. Il permet de déterminer : «le comportement à la déformation [permanente] (orniérage) d'un enrobé soumis à une charge roulante» (MTQ, 2018d). Le principe de l'essai est le suivant :

Une éprouvette subit le passage répété d'une charge roulante de 5000 N afin de déterminer sa résistance à l'orniérage de fluage. La charge roulante consiste en un pneumatique et l'essai s'effectue à température constante. Durant l'essai, la profondeur moyenne des ornières est enregistrée après un certain nombre de cycles. Le nombre de cycles est fonction de la dimension des éprouvettes testées. (MTQ, 2018d)

La température d'essai, contrôlée par une sonde de température introduite dans une des deux plaques, est fixée en fonction de la température haute du grade de performance du bitume avec

un maximum de 60°C. Pour l'EME-14, la température utilisée à l'essai d'orniérage est donc 60°C. La profondeur d'ornière a été mesurée avec la jauge de profondeur aux 15 emplacements prédéterminés (Figure 3.9) après 1 000 cycles à froid de mise en place (température pièce) et 1 000, 3 000, 10 000, 30 000 cycles à chaud (60°C). De cette manière, il est possible de tracer l'évolution de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles. Le résultat final de profondeur d'ornière correspond à la moyenne des profondeurs d'ornière des deux plaques. La profondeur d'ornière d'une plaque est exprimée en pourcentage de l'épaisseur de la plaque. La seule exigence quant à l'orniérage de l'EME-14 est celle proposée par Bitume Québec (2014), soit un orniérage inférieur à 5,0 % après 30 000 cycles de sollicitation. En France, l'exigence pour l'EME2 est : $\leq 7,5\%$ après 30 000 cycles et 60°C (Delorme, De La Roche, & Wendling, 2007). Les résultats sont traités à la section 4.2.1.

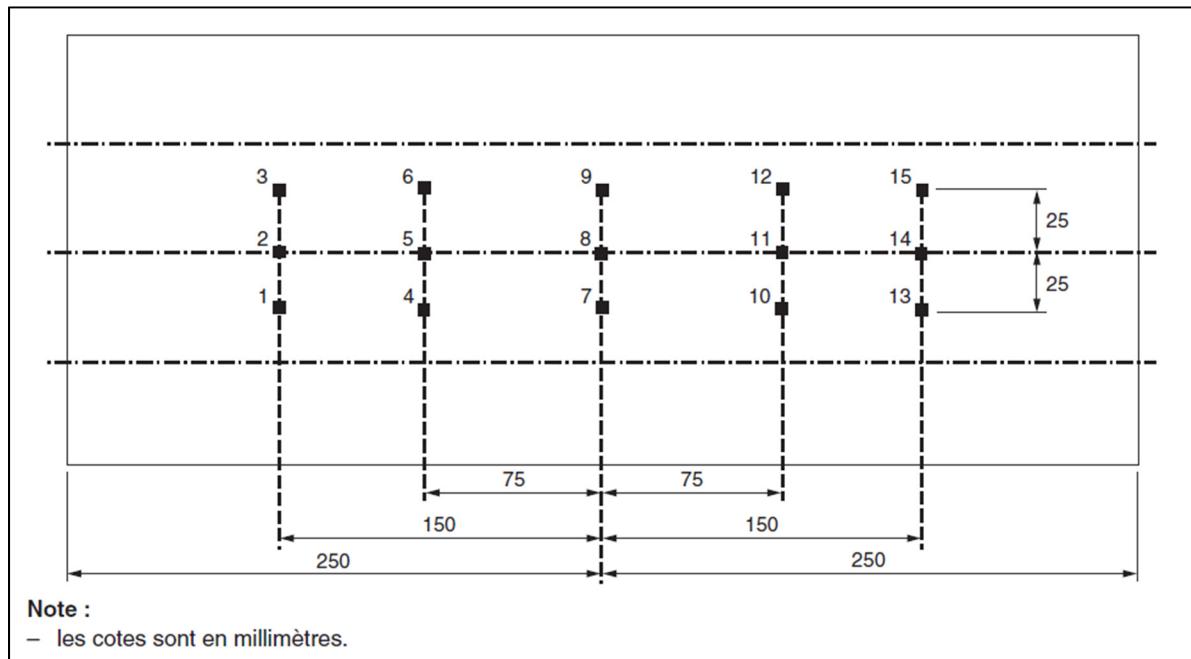


Figure 3.9 Localisation des points de mesurage – Essai d'orniérage
Tirée de MTQ (2018d)

3.4.2 Résistance au retrait thermique empêché (TSRST)

L'essai de résistance au retrait thermique empêché (TSRST) est grandement inspiré de la méthode d'essai AASHTO TP10 : *Standard Test Method for Thermal Stress Restrained*

Specimen Tensile Strength. L'objectif est d'évaluer la résistance à la fissuration à basse température de l'enrobé. Le principe de l'essai est le suivant : «maintenir la hauteur d'une éprouvette d'enrobé constante tout en diminuant la température à vitesse constante, généralement -10°C/h , à partir d'une température initiale de $+5^{\circ}\text{C}$ » (Olard, 2003). Avec la baisse de température, l'éprouvette cherche à se contracter. Cette contraction empêchée mène à la création de contraintes thermiques en traction au sein de l'éprouvette. Lorsque la contrainte de traction atteint la limite de résistance du matériau, il y a rupture. L'essai s'avère très intéressant à cause de : «la similitude entre les sollicitations appliquées et celles qui sont à l'origine de la fissuration apparaissant à basse température sur chaussée. Ce type de fissuration qui est transversale s'observe très fréquemment dans les régions à hivers rigoureux » (Di Benedetto et al., 2005).

D'une manière plus méthodique, l'éprouvette, placée dans une enceinte thermique, est fixée par ses extrémités au vérin hydraulique et à la presse hydraulique (MTS, *Material Testing Systems*). Les déformations axiales de l'éprouvette sont suivies par trois extensomètres placés à 120° l'un de l'autre autour de l'éprouvette. Avant de débuter l'essai, une période de stabilisation de trois heures à 5°C est faite. Ensuite, l'enceinte thermique fait subir un taux de refroidissement de -10°C par heure à l'éprouvette. «La consigne d'asservissement [de la presse (MTS) maintient] nulle la déformation de l'éprouvette durant le test» (Olard, 2003). Le Tableau 3.13 présente quelques paramètres clés de la méthode d'essai AASHTO TP10. En cours d'essai, la température à la surface de l'éprouvette est enregistrée par une sonde de température de type PT100. La force et les déformations sont également enregistrées. La contrainte thermique est déduite de la force.

Tableau 3.13 Exigences de l'AASHTO TP10 - TSRST

Paramètre	Exigence de la norme AASHTO TP10
Diamètre de l'éprouvette (mm)	60 ± 5
Longueur de l'éprouvette (mm)	250 ± 5
Taux de refroidissement ($^{\circ}\text{C/h}$)	10 ± 1
Température de départ ($^{\circ}\text{C}$)	5 ± 1

Les résultats de l'essai sont habituellement représentés par un graphique de l'évolution de la contrainte en fonction de la température (Figure 3.10). Les paramètres importants des résultats de l'essai sont la température et la contrainte de rupture. L'essai permet également de confirmer la température basse du bitume. Bitume Québec (2014) propose une exigence pour la résistance au retrait thermique empêché de l'EME-14: Température de rupture $\leq -28,0^{\circ}\text{C}$. Les résultats sont traités à la section 4.2.2.

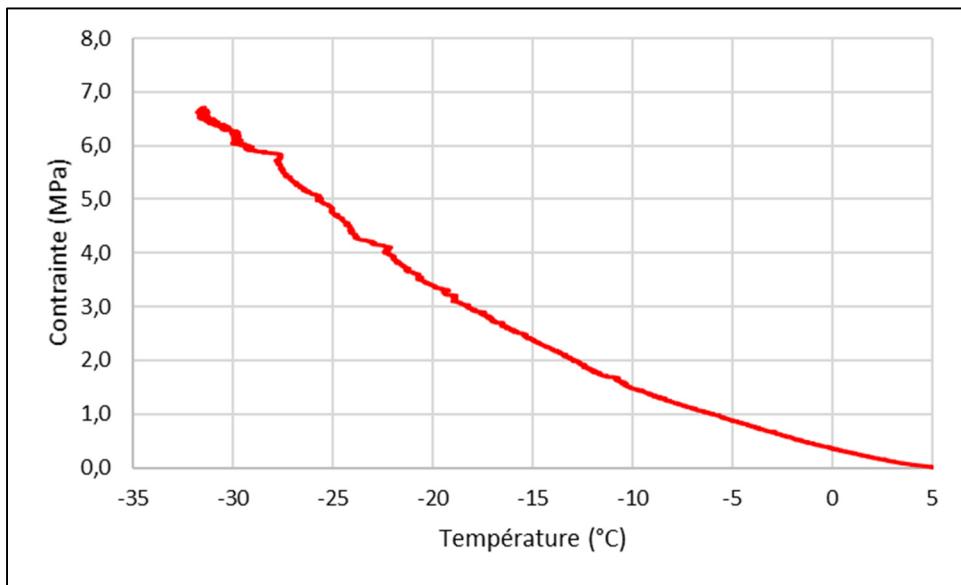


Figure 3.10 Évolution de la contrainte en fonction de la température pendant l'essai TSRST

3.4.3 Détermination du module complexe (E^*) de l'enrobé

La détermination du module complexe d'un enrobé consiste à caractériser la rigidité de l'enrobé en fonction de la température et de la fréquence. Le module complexe (E^*) est une caractéristique indispensable au dimensionnement ME. Dans le cadre de ce mémoire, le module complexe de l'EME-14 a été déterminé sur des éprouvettes provenant de plaques MLPC et de briquettes PCG. Tout d'abord, la réalisation de l'essai de module complexe est abordée. Puis, la modélisation de ce dernier selon le modèle rhéologique 2S2P1D est présentée.

3.4.3.1 Réalisation de l'essai de module complexe (E*)

L'essai de module complexe est réalisé selon la méthode d'essai LC 26-700 : Détermination du module complexe des enrobés. Le principe général de l'essai est le suivant : «Le [module complexe] est déterminé à l'aide d'un équipement de traction-compression directe (TCD) sur des éprouvettes cylindriques [.] La contrainte axiale est appliquée en traction et compression directe selon une forme sinusoïdale, et la déformation axiale est mesurée [dans la partie centrale de] l'éprouvette en trois points. Le [module complexe] est déterminé de -20°C à 40°C par balayage de fréquences [10; 3; 1; 0,3 et 0,1 Hz dans l'ordre]»(MTQ, 2017b). Dans le cadre de ce mémoire, les chargements cycliques sinusoïdaux sont faits en contrôle de déformation centré en zéro. Le Tableau 3.14 présente l'amplitude des déformations en fonction des températures d'essai. L'amplitude des déformations est suffisamment petite pour demeurer dans le domaine viscoélastique linéaire (VEL) des enrobés bitumineux et de ne pas endommager l'éprouvette. Également, le nombre de cycles de sollicitation pour chacune des fréquences est, lui aussi, limité afin de limiter tout endommagement de l'éprouvette (Tableau 3.15).

Tableau 3.14 Déformation en fonction de la température d'essai – Module complexe

Températures d'essai (°C)	Déformation imposée ε_0 ($\mu\text{m}/\text{m}$)
-20	30
-10	40
0; 10; 20; 30; 40	50

Tableau 3.15 Nombre de cycles en fonction de la fréquence d'essai – Module complexe

Fréquence d'essai (Hz)	Nombre de cycles
0,1; 0,3; 1	10
3	30
10	100

Au niveau du matériel nécessaire à la réalisation de l'essai de module complexe, une presse hydraulique (MTS) fait subir les déformations alternées à l'éprouvette pendant qu'une cellule

de charge mesure la force appliquée par la MTS sur l'éprouvette. Trois extensomètres sont installés à mi-hauteur sur l'éprouvette à un espacement de 120° l'un de l'autre pour permettre la mesure de la déformation. L'enceinte thermique et des capteurs de température placés sur l'éprouvette permettent de contrôler la température de l'éprouvette en cours d'essai. «L'éprouvette est conditionnée à la température d'essai [...] au moins deux heures avant la caractérisation» (MTQ, 2017b). Le Tableau 3.16 résume quelques paramètres de l'essai de module complexe.

Tableau 3.16 Paramètres de l'essai de module complexe – LC 26-700

Paramètre	Exigence
Diamètre de l'éprouvette (mm)	75 ± 5
Longueur de l'éprouvette (mm)	150 ± 5
Températures d'essai ($^\circ\text{C}$)	-20; -10; 0; 10; 20; 30; 40
Fréquences d'essai (Hz)	0,1; 0,3; 1; 3; 10

Bitume Québec (2014) propose des exigences pour le module complexe de l'EME-14. Bien que l'essai de module complexe français soit différent (éprouvettes trapézoïdales selon l'essai en flexion 2 points), l'exigence pour un enrobé à module élevé de classe 2 (EME2) est également présentée dans le Tableau 3.17.

Tableau 3.17 Exigences pour le module complexe de l'EME-14

Référence	Température ($^\circ\text{C}$)	Fréquence (Hz)	Module dynamique $ E^* $ (MPa)
Bitume Québec (2014)	10	10	$\geq 14\,000$
	15	10	$\geq 11\,000$
EME2	15	10	$\geq 14\,000$

3.4.3.2 Modélisation 2S2P1D du module complexe (E^*)

Comme indiqué à la section 1.2.6.3, la calibration du modèle consiste à limiter l'erreur entre les points expérimentaux et le modèle en déterminant la valeur des sept paramètres de base (E_0 , E_{00} , k , h , β , δ et τ_{0E}) et les paramètres C_1 et C_2 de la loi WLF. La détermination de ces paramètres se fait avec l'aide des graphiques dans le plan Cole-Cole, dans l'espace de Black,

de la courbe maîtresse, des courbes isothermes et de la fonction de transfert en fonction de la température. Avec l'aide d'un fichier et de solveurs Excel, les paramètres 2S2P1D sont fixés. La Figure 3.11 présente l'influence de différents paramètres du modèle 2S2P1D sur la forme de la courbe dans le plan Cole-Cole.

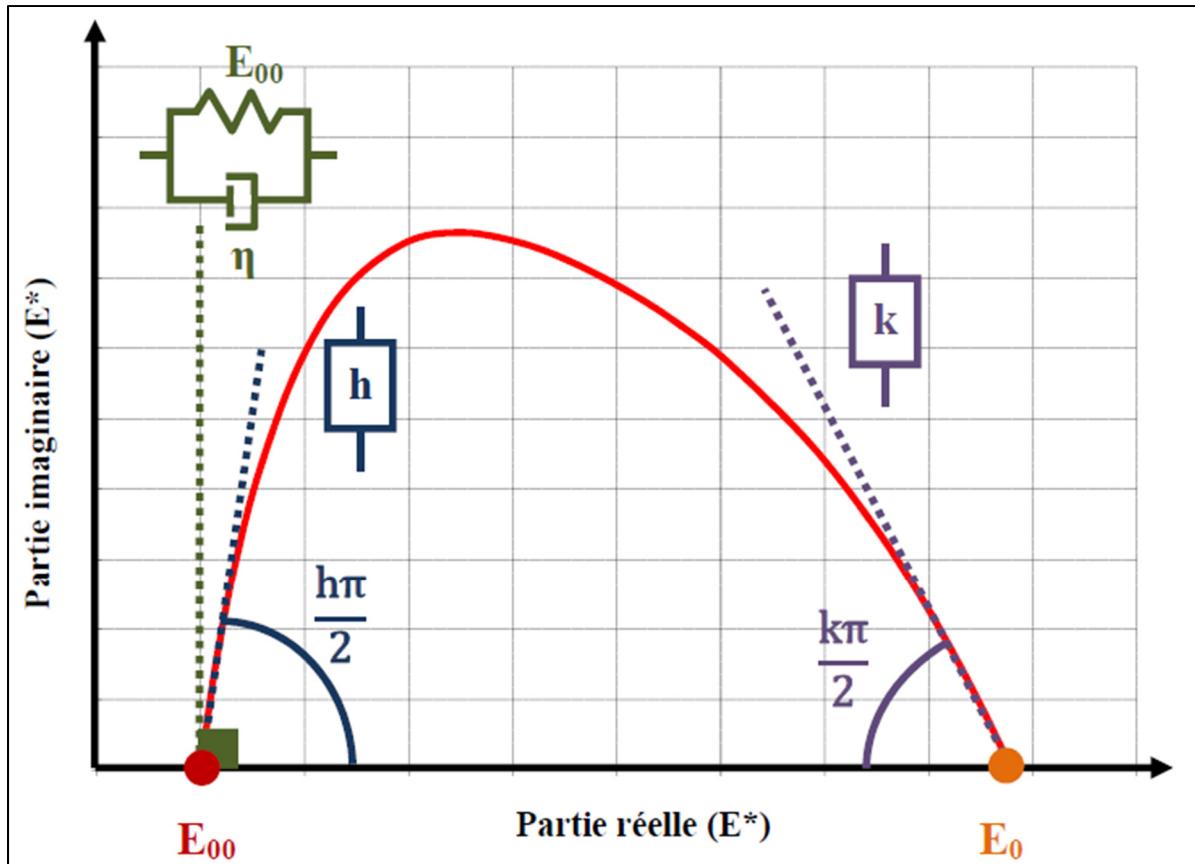


Figure 3.11 Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur la courbe du module complexe dans le plan Cole-Cole
Tirée de Meunier (2012)

Les différents éléments rhéologiques simples sont définis de la manière suivante :

Module statique E_{00}

C'est le module dynamique à température très élevée et/ou fréquence très faible. Il est déterminé dans le plan Cole-Cole. L'angle de phase est maximal et le comportement de l'enrobé tend vers une viscosité pure. Pour les bitumes, E_{00} est nul. Pour les enrobés, le squelette granulaire (contact granulats sur granulats) fournit une rigidité ($E_{00} > 0$ MPa)

Module vitreux E_0

C'est le module dynamique à température très basse et/ou fréquence très élevée. Il est déterminé dans le plan Cole-Cole. L'enrobé tend vers un comportement purement élastique, donc avec un angle de phase nul.

Constantes h et k

Dans le plan Cole-Cole, h et k affectent les pentes du modèle 2S2P1D. La constante h ajuste la pente du côté gauche (températures élevées) et la constante k ajuste la pente du côté droit (températures basses).

Constante δ

La constante δ ajuste le point maximal de la courbe dans le plan Cole-Cole.

Paramètre β

Le paramètre β caractérise le comportement visqueux du bitume à haute température.

Constante de temps τ_{0E}

La constante τ_{0E} s'ajuste à chaque isotherme ($\tau_E(T)$) et s'exprime en fonction de la fonction de translation $a_{TE}(T)$ (§1.2.6.3). $a_{TE}(T)$ s'exprime en fonction des constantes C_1 et C_2 et de la température suivant la loi WLF. Ainsi, la constante de temps τ_E devient, par le fait même, fonction de la température.

Les résultats de module complexe et de 2S2P1D sont traités à la section 4.2.3.

3.4.4 Détermination de la résistance à la fatigue des enrobés

La détermination de la résistance à la fatigue des enrobés consiste à caractériser les durées de vie de l'enrobé (N_f) en fonction d'une température, d'une fréquence et de plusieurs (habituellement trois) niveaux de sollicitation donnés. La résistance à la fatigue se traduit par la détermination d'une loi de fatigue : loi de Wöhler. Celle-ci est une autre caractéristique indispensable au dimensionnement ME. Dans le cadre de ce mémoire, la résistance à la fatigue de l'EME-14 a été déterminée sur des éprouvettes provenant de plaques selon trois types d'essais pour satisfaire les différents logiciels de dimensionnement de chaussée ME:

- traction-compression directe (TCD);
- flexion deux points (2PB) (Alizé – LCPC);
- flexion quatre points (4PB) (*AASHTOWare Pavement ME Design*).

Comme seul l'essai de traction-compression directe a été réalisé au LCMB, la présentation de la réalisation de l'essai, la validation et la détermination de la loi de fatigue ne concerne que cet essai.

3.4.4.1 Réalisation de l'essai de fatigue

Pour établir une loi de fatigue et les paramètres d'une droite de Wöhler d'un enrobé, plusieurs essais individuels de fatigue sont réalisés. Ces essais destructifs nécessitent l'utilisation de plusieurs éprouvettes. Pour chacune des lois de fatigue à déterminer, les essais individuels sont menés à fréquence et température constantes à différents niveaux de sollicitation. Habituellement, pour des essais en contrôle de déformation, trois niveaux de sollicitation sont nécessaires pour cerner une durée de vie d'un million de cycles.

Dans le cadre de ce mémoire, deux types de chargements cycliques sinusoïdaux en contrôle de déformation ont été considérés. Le premier est alterné et centré en zéro (sine) et le deuxième est alterné et décentré (haversine). La Figure 2.4 montre la différence entre la sollicitation de type sine et celle de type haversine.

La durée d'un essai est dictée par les différents critères de rupture (§3.4.4.3). La réalisation de l'essai de fatigue au LCMB est similaire à celle de l'essai de module complexe sur plusieurs points. Tout d'abord, les dimensions des éprouvettes sont les mêmes. Au niveau du matériel, une presse hydraulique (MTS) fait subir les déformations/déplacements à l'éprouvette. Une cellule de charge permet de mesurer la force appliquée par la presse sur l'éprouvette. Trois extensomètres sont installés sur l'éprouvette à un espacement de 120° l'un de l'autre pour permettre la mesure de la déformation. L'enceinte thermique et trois capteurs de température placés sur l'éprouvette permettent de contrôler la température de l'éprouvette en cours d'essai.

(10°C). L'éprouvette est conditionnée à la température d'essai pendant quatre heures avant sa caractérisation. Le Tableau 3.18 résume quelques paramètres des essais de fatigue menés.

Tableau 3.18 Paramètres des essais de fatigue

Essai de fatigue	Type de sollicitation	Fréquence (Hz)	Température (°C)	Diamètre de l'éprouvette (mm)	Longueur de l'éprouvette (mm)
#1	Sine	10	10	75 ± 5	150 ± 5
#2	Haversine	10			
#3	Sine	5			

Afin de valider et d'analyser les essais de fatigue, différents paramètres sont enregistrés. Ceux nécessaires à l'analyse de la fatigue sont les suivants :

- temps (s);
- force (N);
- mesures des extensomètres 1, 2 et 3 (μm);
- températures des trois sondes (°C).

La fréquence d'acquisition des données varie en fonction de la plage de cycles. En début d'essai, la fréquence d'acquisition doit être plus rapide. Plus le nombre de cycles augmente, plus la fréquence d'acquisition diminue. Une acquisition de données couvre 2,5 cycles et 100 points par cycles sont enregistrés. Le Tableau 3.19 présente la fréquence d'acquisition et le nombre de cycles enregistrés en fonction des différentes plages de cycles.

Tableau 3.19 Enregistrement des données pour un essai de fatigue

Plage de cycles (N)	Fréquence d'acquisition	Nombre de cycles enregistrés par plage
1 à 120	tous les cycles	120
120 à 1 000	une mesure tous les 20 cycles	110
1 000 à 10 000	une mesure tous les 150 cycles	150
10 000 à 100 000	une mesure tous les 1 000 cycles	225
100 000 à 300 000	une mesure tous les 2 500 cycles	200
Après 300 000	une mesure tous les 5 000 cycles	selon la fin de l'essai

Bitume Québec (2014) propose une exigence quant à la résistance à la fatigue de l'EME-14 selon l'essai de traction-compression directe à 10°C et 10 Hz: $\epsilon_6 > 130 \mu\text{m/m}$.

3.4.4.2 Analyse et validation de l'essai de fatigue

La validation et l'analyse d'un essai de fatigue passent par l'étude de l'évolution de différents paramètres. Cette évolution est observable par l'entremise de plusieurs graphiques (10). En vue de simplifier la section, l'étude de l'évolution sera expliquée par l'entremise d'un exemple : l'essai de fatigue de l'éprouvette PL5-A3 pour tous les graphiques à l'exception du troisième et cinquième et l'essai de fatigue de l'éprouvette PL5-C3 pour les graphiques 3 et 5. Pour l'éprouvette PL5-A3, la déformation cible de l'essai est de 130 $\mu\text{m/m}$ et l'éprouvette a 2,0 % de vides. L'essai a été arrêté après la rupture de l'éprouvette à 2 857 206 cycles. Pour l'éprouvette PL5-C3, la déformation cible de l'essai est de 145 $\mu\text{m/m}$ et l'éprouvette a 2,5 % de vides.

1. Évolution de la température en fonction du nombre de cycles

À cause des propriétés visqueuses des enrobés bitumineux, chaque cycle de sollicitation mène à une certaine dissipation d'énergie. Une partie de celle-ci est transformée en chaleur partant du centre de l'éprouvette jusqu'à ses parois (Di Benedetto, 1998). Au début de l'essai, pour l'essai de l'éprouvette PL5-A3, la température à la surface de l'éprouvette est de 10,2°C et se stabilise autour de 11,1°C après environ 500 000 cycles. L'échauffement de la paroi de l'éprouvette est donc de 0,9°C (Figure 3.12). Une telle augmentation de température n'est pas négligeable, car le module dynamique diminue avec la température alors que la durée de vie en fatigue augmente pour une même fréquence d'essai. De plus, il faut se rappeler que l'échauffement de l'éprouvette est un des principaux effets biaisant des essais de fatigue. Cette augmentation de température est observable pour l'ensemble des éprouvettes testées. Enfin, plus l'amplitude de déformation imposée est grande, plus l'augmentation de température est grande pour une même fréquence d'essai.

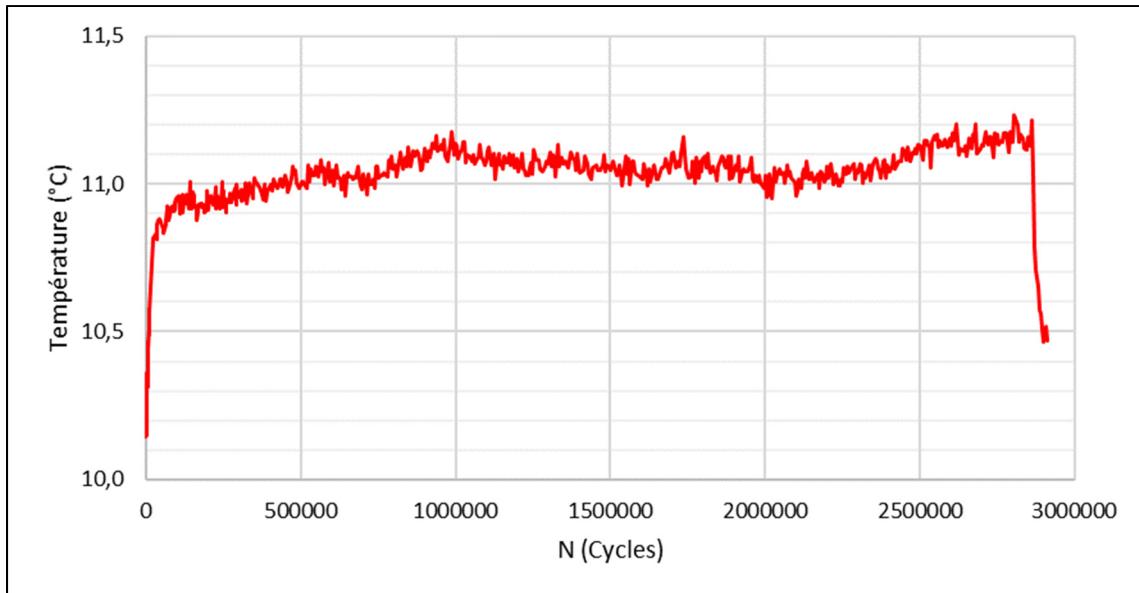


Figure 3.12 Évolution de la température en fonction du nombre de cycles – Fatigue
(Épr. PL5-A3; $V_i = 2,0 \%$; $\varepsilon_0 = 128 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

2. Évolution du module dynamique en fonction du nombre de cycles

L'évolution du module dynamique en fonction du nombre de cycles sert directement à la détermination de la résistance à la fatigue. La Figure 3.13 présente une évolution classique du module dynamique en cours d'essai de fatigue (phase I et II)(§1.2.7.1). On remarque que la perte de module dynamique en cours de phase I est très prononcée avec une diminution approchant les 25 %. Puis, la phase II, où le phénomène de fatigue est prépondérant, est quasi linéaire. Habituellement, les microfissures apparaissent progressivement au sein de l'éprouvette jusqu'à l'apparition d'une macrofissure. Celle-ci introduit la phase III où l'évolution du module dynamique n'est plus linéaire. Dans le cas particulier de l'éprouvette PL5-A3, la rupture brutale de l'éprouvette ne permet pas de visualiser cette troisième phase.

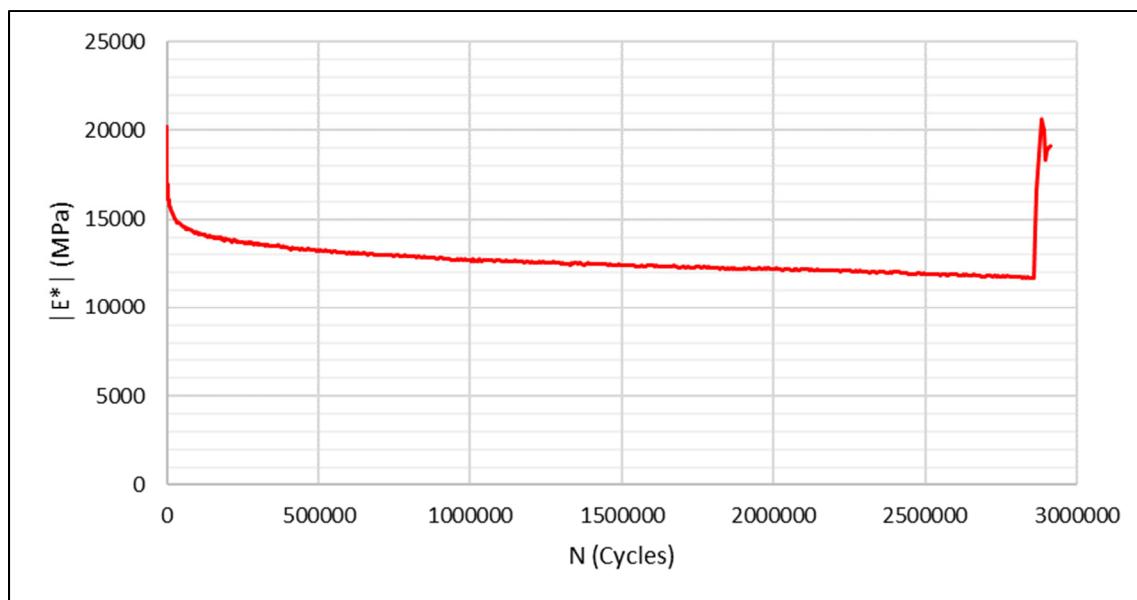


Figure 3.13 Évolution du module dynamique en fonction du nombre de cycles – Fatigue
(Épr. PL5-A3; $V_i = 2,0\%$; $\varepsilon_0 = 128 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

3. Évolution du module dynamique en fonction de l'angle de phase

L'évolution du module dynamique en fonction de l'angle de phase sert également à la détermination de la résistance à la fatigue d'une éprouvette (Figure 3.14). Le sommet où l'angle de phase est maximal correspond au critère de rupture. Ce couple (module dynamique et angle de phase) correspond à un nombre de cycles. Avec l'avancement de l'essai de fatigue, le module complexe de l'éprouvette testée évolue. D'une part, le module dynamique diminue et l'angle de phase augmente. Ainsi, la partie élastique du module complexe perd du terrain par rapport à la partie visqueuse (augmentation de l'angle de phase).

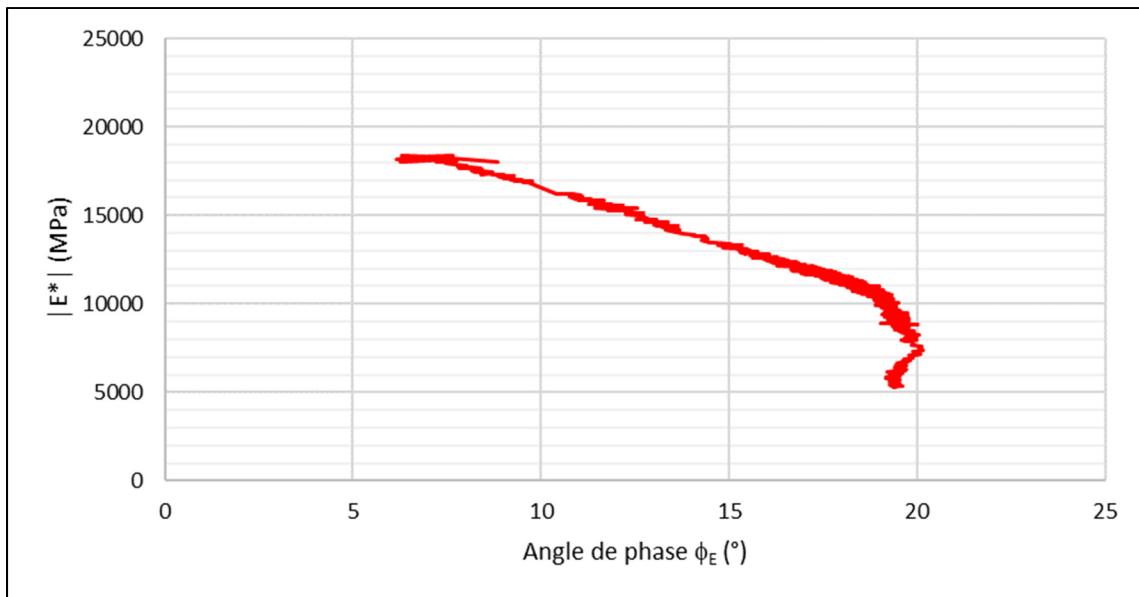


Figure 3.14 Évolution du module dynamique en fonction de l'angle de phase – Fatigue
(Épr. PL5-C3; $V_i = 2,5\%$; $\varepsilon_0 = 142 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

4. Évolution des écarts des extensomètres par rapport à la moyenne en fonction du nombre de cycles

L'évolution des écarts des extensomètres par rapport à la moyenne en fonction du nombre de cycles est présentée à la Figure 3.15 pour l'essai de l'éprouvette PL5-C3. L'écart d'un extensomètre correspond à l'écart de son signal par rapport à la moyenne des signaux des trois extensomètres. Ce graphique permet l'établissement d'un critère de rupture local. En effet, Baaj (2002) explique que, lorsque l'écart d'un extensomètre atteint 25 % par rapport à la moyenne, le champ de déformation n'est plus considéré comme étant homogène au sein de l'éprouvette et que celle-ci doit alors être considérée comme rupturée. C'est un critère d'homogénéité du champ de contrainte au sein de l'éprouvette. Suivant ce critère, l'essai de l'éprouvette PL5-A3 est considéré homogène jusqu'à 2 797 098 cycles, soit le nombre de cycles où l'extensomètre #3 atteint 25 % d'écart par rapport à la moyenne. Tout au long de l'essai, les écarts sont stables. Ceci témoigne d'une bonne stabilité de la déformation appliquée par la presse.

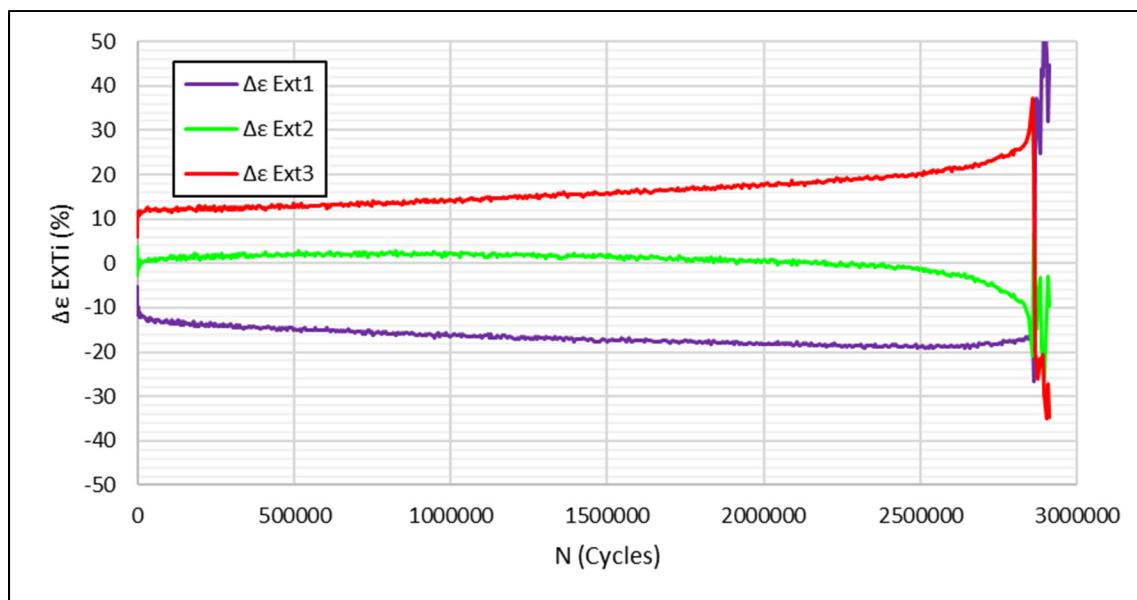


Figure 3.15 Évolution des écarts des extensomètres par rapport à la moyenne en fonction du nombre de cycles – Fatigue
(Épr. PL5-A3; $V_i = 2,0 \%$; $\varepsilon_0 = 128 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

5. Évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles

L'évolution de l'angle de phase est présentée à la Figure 3.16 pour l'essai de l'éprouvette PL5-C3. Suivant une tendance similaire, mais de symétrie miroir à celle de l'évolution du module dynamique, l'angle de phase subit une augmentation drastique au cours des premiers cycles pour les mêmes raisons que le module dynamique chute : augmentation de la température au sein de l'éprouvette et phénomène thixotropie du bitume. Rapidement, l'angle de phase passe de $6,2^\circ$ à $15,1^\circ$ en seulement 40 416 cycles. Puis, une augmentation quasi-linéaire de l'angle de phase est marquée par la fatigue du matériau passant de $15,1^\circ$ à $20,2^\circ$ en 4 394 367 cycles. Notons que l'atteinte de l'angle de phase maximal peut servir de critère de rupture.

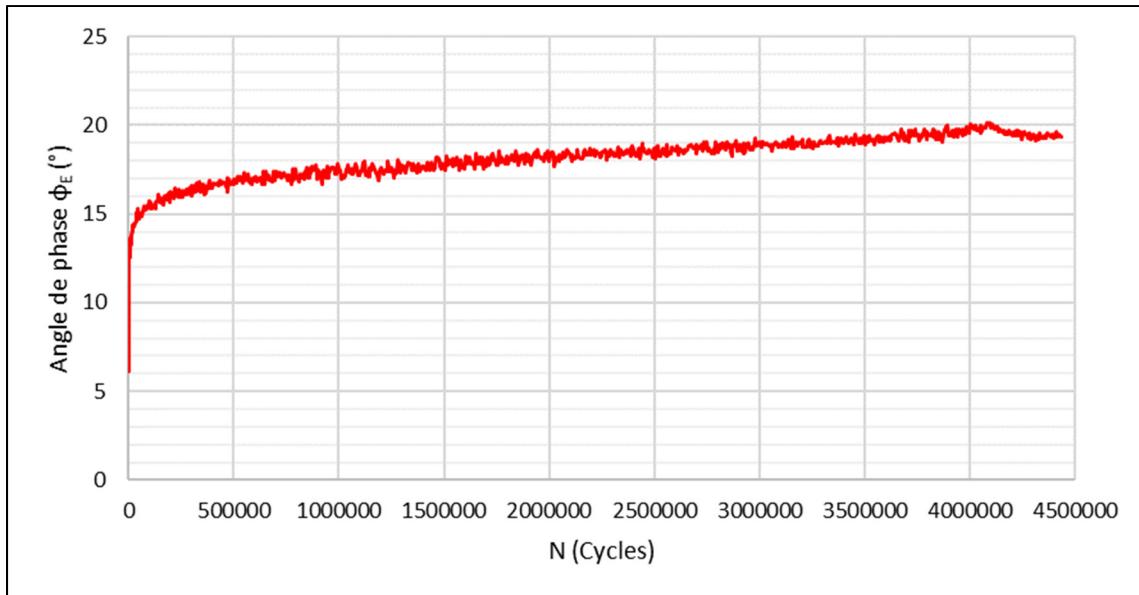


Figure 3.16 Évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles – Fatigue (Épr. PL5-C3; $V_i = 2,5\%$; $\varepsilon_0 = 142 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

6. Évolution des indices de qualité des extensomètres, du signal de la contrainte et du signal de la déformation en fonction du nombre de cycles

La Figure 3.17 (b) présente l'évolution des indices de qualité des extensomètres, du signal de la contrainte et du signal de la déformation en fonction du nombre de cycles pour l'essai de l'éprouvette PL5-A3. L'indice de qualité traduit l'écart entre le type de signal de sollicitation qui est demandé, la consigne, et celui qui est réellement obtenu, décrit par une fonction approchée (Lamothe, 2014). La Figure 3.17 (a) présente l'écart qui peut exister entre le signal de la déformation mesuré et calculé pour deux cycles de sollicitation. Lamothe (2014) explique que l'indice de qualité pour une sollicitation sinusoïdale «représente essentiellement la somme des écarts entre les valeurs d'acquisition suivant un cycle donné et les valeurs correspondantes, mais suivant la fonction approchée [et liée au type de sollicitation demandé], établie suivant la méthode des moindres carrés». L'indice de qualité se calcule suivant l'équation suivante (Baaj, 2002):

$$IQ(\%) = \sum_{i=1}^n \frac{G_{\text{mesuré}} - G_{\text{calculé}}}{n * A} \quad (3.5)$$

Avec :

$G_{\text{mesuré}}$	Grandeur du signal mesuré
$G_{\text{calculé}}$	Grandeur du signal calculé
n	Nombre de points analysés
A	Amplitude du signal

Baaj (2002) propose un critère de rupture en lien avec l'indice de qualité: l'éprouvette est considérée rupturée lorsqu'un des indices de qualité atteint 15 %. Dans le présent exemple présenté à la Figure 3.17 (b), l'ensemble des indices de qualité demeure largement sous le seuil du 15 % jusqu'à la rupture de l'éprouvette. À la rupture, les signaux sont complètement instables. D'une manière générale, les indices de qualité sont plus élevés en début d'essai, mais se stabilisent rapidement et demeurent assez faibles jusqu'à l'approche de la rupture où les indices de qualités grimpent de manière plutôt brusque.

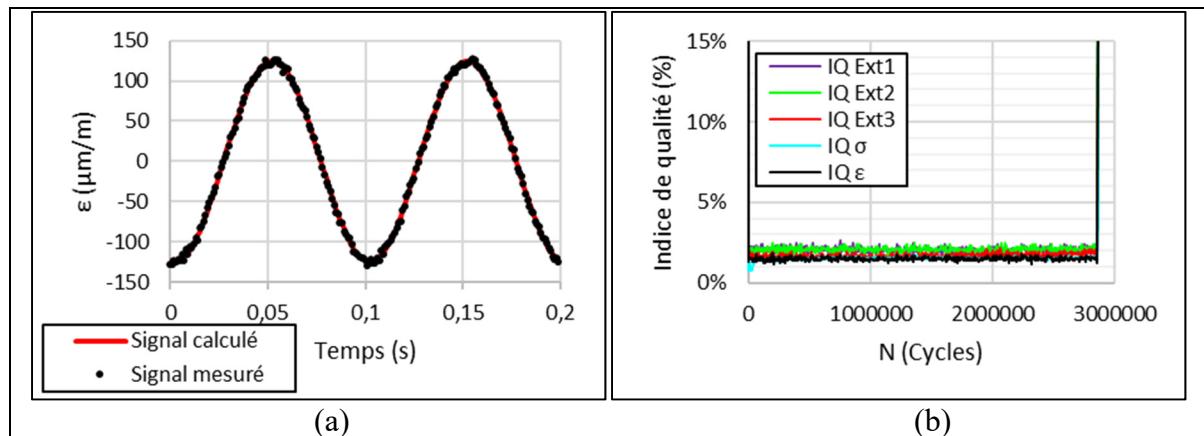


Figure 3.17 (a) Écart entre le signal de la déformation mesuré et calculé
 (b) Évolution de l'indice de qualité des extensomètres, du signal de la contrainte et du signal de la déformation en fonction du nombre de cycles – Fatigue
 (Épr. PL5-A3; $V_i = 2,0\%$; $\epsilon_0 = 128\ \mu\text{m}/\text{m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10\ \text{Hz}$)

7. Évolution de l'amplitude de la déformation et de la déformation moyenne en fonction du nombre de cycles

Pour un essai en contrôle de déformation, la presse hydraulique pilote l'essai suivant la moyenne des signaux des trois extensomètres (Baaj, 2002). Ainsi, le traçage de l'évolution de l'amplitude de déformation des trois extensomètres et de la déformation moyenne permet de confirmer le bon déroulement de l'essai (Figure 3.18). Pour l'éprouvette PL5-A3, l'amplitude

de déformation visée (ϵ_0) était de 130 $\mu\text{m}/\text{m}$. L'amplitude moyenne réellement obtenue est de 128 $\mu\text{m}/\text{m}$. Les quatre amplitudes (extensomètres 1, 2, 3 et moyenne) sont bien constantes jusqu'à l'approche de la rupture de l'éprouvette. Ainsi, il est possible de considérer la valeur de 128 $\mu\text{m}/\text{m}$ comme amplitude de déformation (ϵ_0) pour cet essai. Par ailleurs, vers la fin de l'essai, l'amplitude des extensomètres varie d'une manière brusque. Ceci est en lien avec l'apparition de la phase III ou la rupture de l'éprouvette. Les amplitudes de déformation des trois extensomètres cernent bien l'amplitude moyenne. En effet, en début d'essai, les amplitudes de déformation sont respectivement : $\epsilon_{A \text{ Ext1}} \approx 110 \mu\text{m}/\text{m}$; $\epsilon_{A \text{ Ext2}} \approx 130 \mu\text{m}/\text{m}$ et $\epsilon_{A \text{ Ext3}} \approx 144 \mu\text{m}/\text{m}$

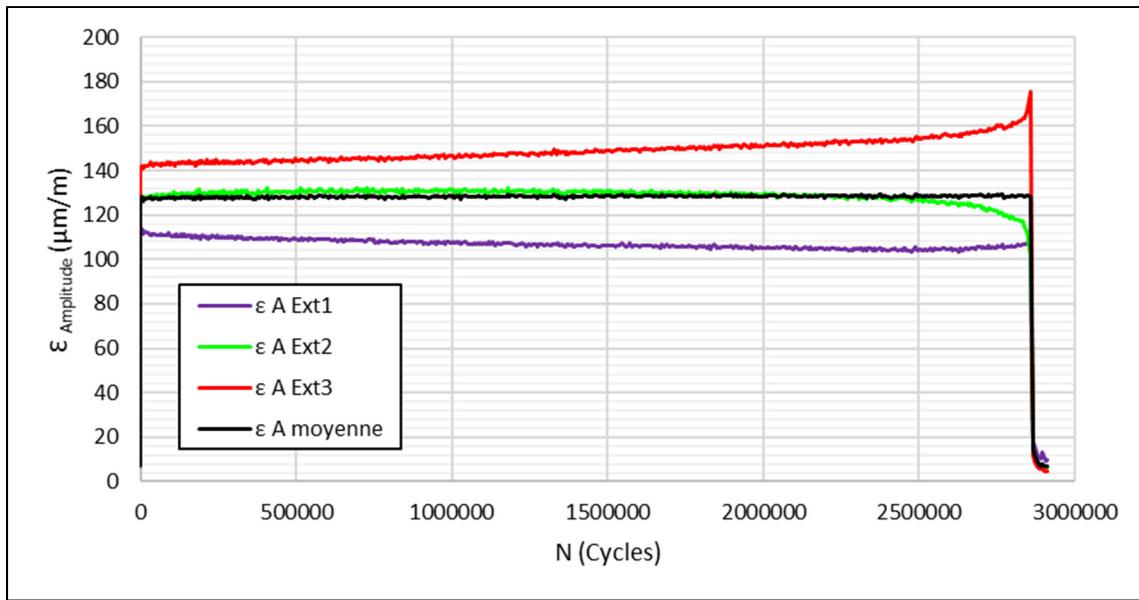


Figure 3.18 Évolution de l'amplitude de la déformation et de la déformation moyenne en fonction du nombre de cycles – Fatigue
(Épr. PL5-A3; $Vi = 2,0\%$; $\epsilon_0 = 128 \mu\text{m}/\text{m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

8. Évolution de l'amplitude de la contrainte en fonction du nombre de cycles

La Figure 3.19 présente l'évolution de l'amplitude de la contrainte en fonction du nombre de cycles. Les essais sont réalisés en contrôle de déformation, donc c'est la force qui est ajustée pour toujours atteindre la bonne déformation. En début d'essai, la contrainte augmente rapidement puisque la presse hydraulique tente d'atteindre et de stabiliser le signal de déformation (Lamothe, 2014). Ensuite, l'amplitude de la contrainte suit exactement la même

tendance que le module complexe en cours d'essai, passant par la phase I, II et la rupture de l'éprouvette.

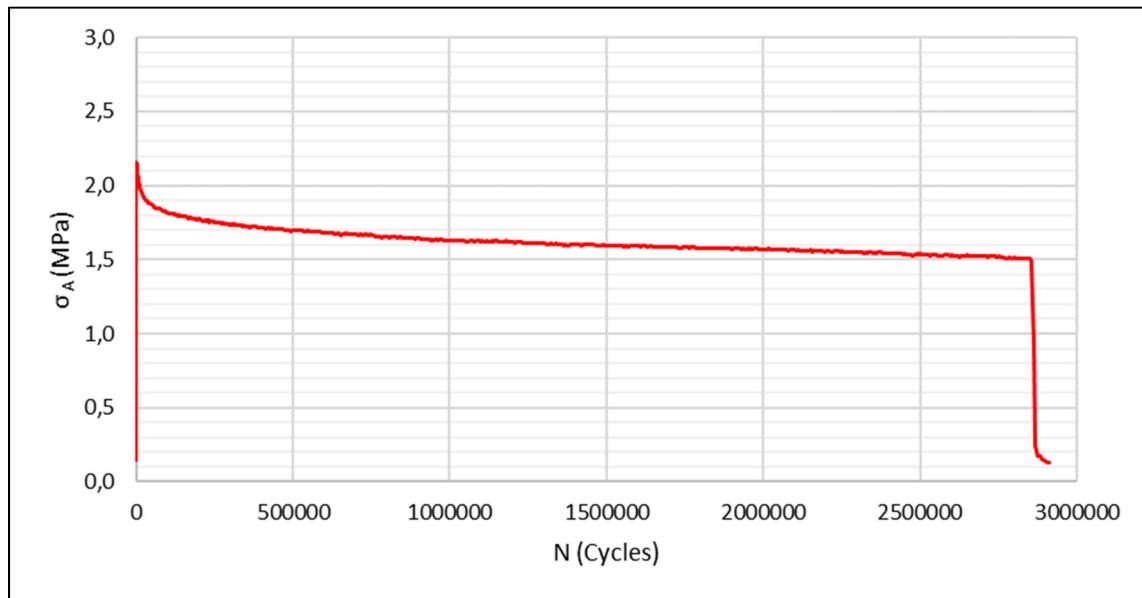


Figure 3.19 Évolution de l'amplitude de la contrainte et de la contrainte moyenne en fonction du nombre de cycles – Fatigue
(Épr. PL5-A3; $V_i = 2,0\%$; $\varepsilon_0 = 128 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

9. Évolution du centre de la déformation des extensomètres en fonction du nombre de cycles

La Figure 3.20 présente l'évolution du centre de la déformation des extensomètres en fonction du nombre de cycles pour l'essai de l'éprouvette PL5-A3. Il est possible de lier le centre de la déformation à une déformation permanente de l'éprouvette (Baaj 2002). Brièvement, une valeur positive du centre de la déformation correspond à un allongement de l'éprouvette (plus traction que de compression). À l'inverse, une valeur négative du centre de la déformation correspond à un écrasement de l'éprouvette (plus de compression que de traction). Pour l'éprouvette PL5-A3, celle-ci subit simultanément des déformations d'allongement et d'écrasements. Ceci veut dire que l'éprouvette subit des endommagements locaux et progressifs tout au long de l'essai. Par exemple, l'évolution du centre de l'extensomètre #1 veut dire que l'éprouvette s'écrase du côté de l'extensomètre #1 d'une manière quasi-linéaire jusqu'à la rupture. Les causes d'une variation des centres de la déformation sont multiples :

excentricité de l'éprouvette par rapport aux casques de collage, parallélisme déficient des surfaces planes de l'éprouvette, hétérogénéité au sein de l'éprouvette. Tout de même, le centre moyen des déformations demeure zéro.

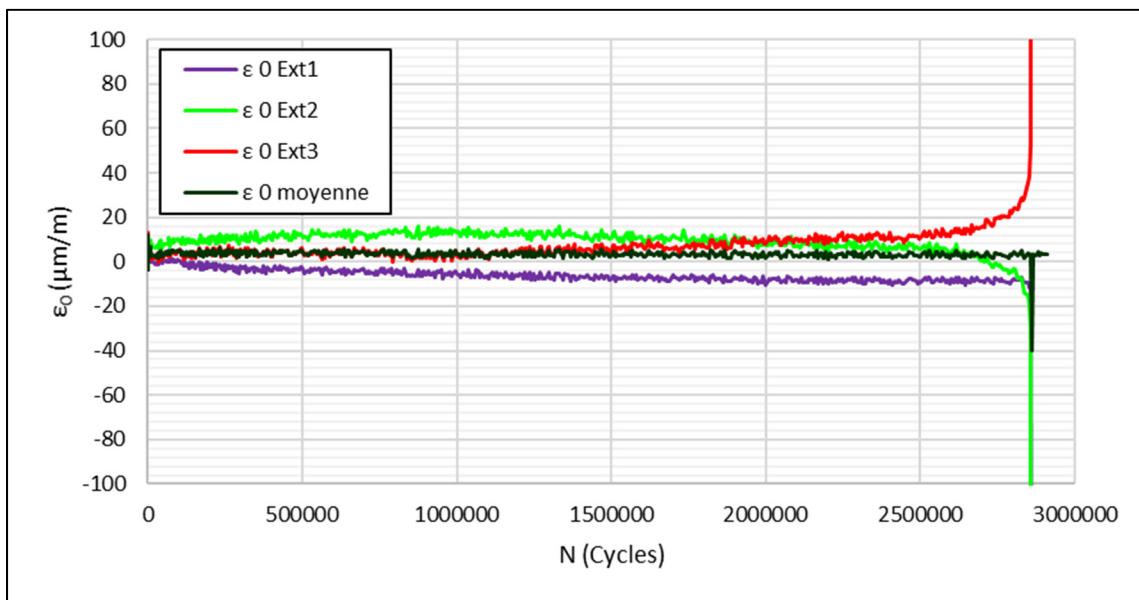


Figure 3.20 Évolution du centre de la déformation des extensomètres en fonction du nombre de cycles – Fatigue
(Épr. PL5-A3; $V_i = 2,0 \%$; $\varepsilon_0 = 128 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

10. Évolution du centre de la contrainte en fonction du nombre de cycles

La Figure 3.21 présente l'évolution du centre de la contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai de l'éprouvette PL5-A3. En début d'essai, le centre de la contrainte évolue rapidement afin d'atteindre et de stabiliser le signal de déformation. Puis, le centre de la contrainte est stable et très près de zéro tout au long de l'essai jusqu'à la rupture. C'est ce qui est recherché pour un essai en contrôle de déformation. La valeur centre se situe aux alentours de -0,025 MPa. Ainsi, pour atteindre les déformations voulues, une force légèrement plus élevée doit être appliquée en compression qu'en traction. Cette faible tendance négative traduit une rigidité légèrement plus élevée en compression qu'en traction du matériau (Lamothe, 2014).

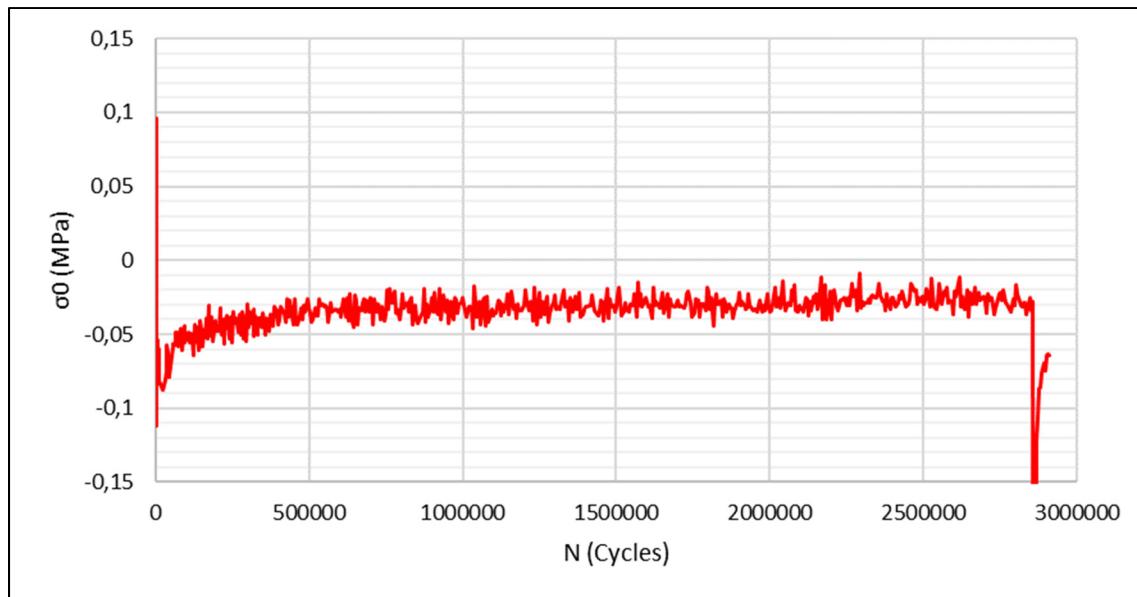


Figure 3.21 Évolution du centre de la contrainte en fonction du nombre de cycles – Fatigue
(Épr. PL5-A3; $Vi = 2,0\%$; $\varepsilon_0 = 128 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

3.4.4.3 Détermination de la loi de fatigue (Droite de Wöhler)

La détermination de la loi de fatigue et de ses paramètres pour un enrobé, à une fréquence et une température données, passe par l'analyse de chacun des essais individuels selon différents critères de rupture. L'objectif ultime de ces critères de rupture est de bien cerner la transition entre les phases II et III (§1.2.7.3). Par contre, certains logiciels de dimensionnement ME exigent l'utilisation de critères précis qui ne permettent pas toujours de bien cerner cette phase de transition. Par exemple, Alizé-LCPC exige une loi de fatigue construite selon le critère $N_{f50\%}$.

En vue de déterminer les paramètres de la droite de fatigue, l'ensemble des essais est réalisé à une température et une fréquence de référence (θ_{test} , f_{test}). Dans ces conditions, il faut déterminer les durées de vie (N_f) suivant différents niveaux de déformation. La norme NF P 98-818-24 propose de travailler à partir de répétitions d'essais (6) pour trois niveaux de déformation (ε_0). Dans le cadre de ce mémoire, les droites de fatigue ont été déterminées suivant plusieurs niveaux de déformation pour lesquels d'une à trois répétitions ont été effectuées. Chacun des essais est validé, puis analysé selon les critères de fatigue globaux

suivants : $N_{f50\%}$, $N_{f0E_{max}-N}$ et $N_{f0E_{max}-E^*}$. Les critères globaux $N_{f0E_{max}-N}$ et $N_{f0E_{max}-E^*}$ permettent le calcul du critère de rupture $N_{fII/III}$: simple moyenne de ces deux critères de rupture. Les critères globaux considèrent l'ensemble du comportement de l'éprouvette, soit celui à l'échelle macroscopique (Lamothe, 2014). Une fois les durées de vie déterminées, celles-ci sont tracées dans un espace bi-logarithmique mettant en relation la déformation imposée (ϵ_0) à la durée de vie (N_f) correspondante. Dans ce domaine, la détermination des paramètres de la droite de fatigue est alors possible ($N_{fI}(\theta_{test}, f_{test})$ et a_2) (§ 1.2.7.4).

Le critère global le plus courant, désigné critère classique, est $N_{f50\%}$. Il est déterminé à partir du graphique de l'évolution du module dynamique en fonction du nombre de cycles (Figure 3.22 (b)). Il correspond au nombre de cycles nécessaire pour atteindre la moitié du module dynamique initial $|E^{*0}|$ de l'essai. La valeur de $|E^{*0}|$ varie suivant les approches préconisées. Dans le cadre de ce mémoire, la valeur de $|E^{*0}|$ correspond au module dynamique à l'origine extrapolé linéairement avec les valeurs de module dynamique des cycles 100 à 300. Ce critère largement répandu n'est toutefois pas parfait. Effectivement, il ne tient pas compte des effets biaisant de l'essai de fatigue comme l'échauffement, la thixotropie et les effets locaux (Di Benedetto, Nguyen, & Sauzéat, 2011), lesquels peuvent devenir critique dans le cas des enrobés confectionnés avec des bitumes modifiés aux polymères. La Figure 3.22 (a) montre comment retrouver la valeur de $|E^{*0}|$ et la Figure 3.22 (b) montre le $N_{f50\%}$ pour l'essai de l'éprouvette PL5-B1.

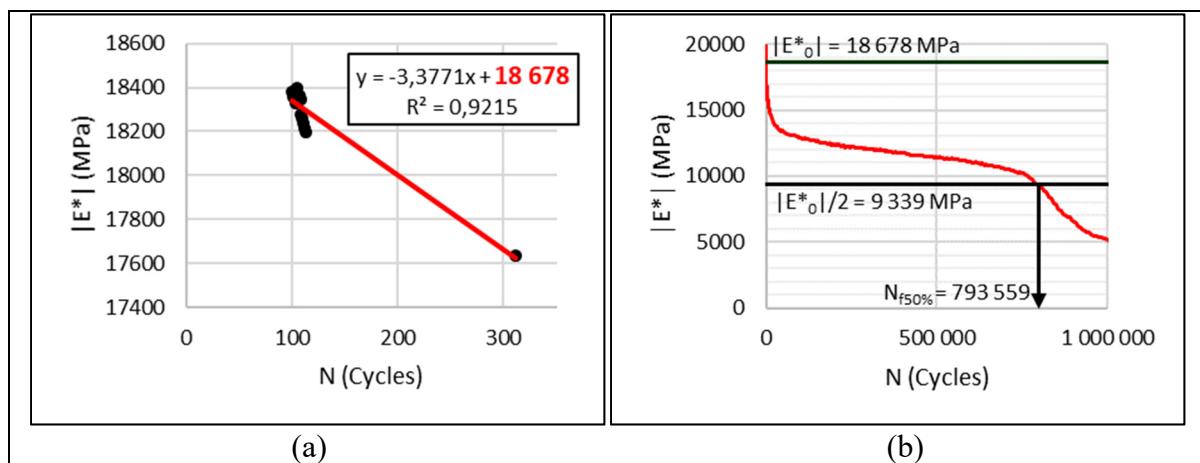


Figure 3.22 Critère de rupture $N_{f50\%}$ (a) Détermination du $|E^*|_0$ (b) Détermination du $N_{f50\%}$
(Épr. PL5-B1; $V_i = 2,6\%$; $\varepsilon_0 = 154 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

Le critère global $N_{f\phi E_{\text{max}}-N}$ est déterminé à partir du graphique de l'évolution de l'angle de phase (ϕ_E) en fonction du nombre de cycles. La durée de vie correspond au nombre de cycles associé à la valeur maximale de l'angle de phase (Figure 3.23).

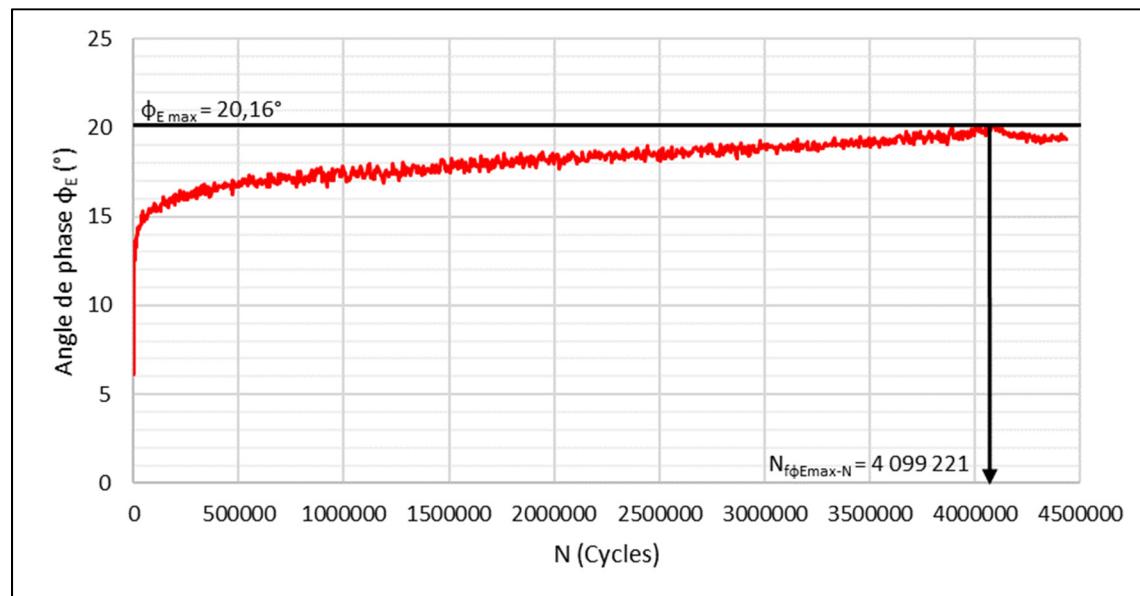


Figure 3.23 Critère de rupture $N_{f\phi E_{\text{max}}-N}$
(Épr. PL5-C3; $V_i = 2,5\%$; $\varepsilon_0 = 142 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

Le critère global $N_{f\phi E_{max}-E^*}$ est déterminé sur le graphique de l'évolution du module dynamique en fonction de l'angle de phase (ϕ_E). Le sommet de cette évolution correspond à la rupture de l'éprouvette. La durée de vie correspond au cycle associé à ce couple ($|E^*|$; ϕ_E) (Figure 3.24).

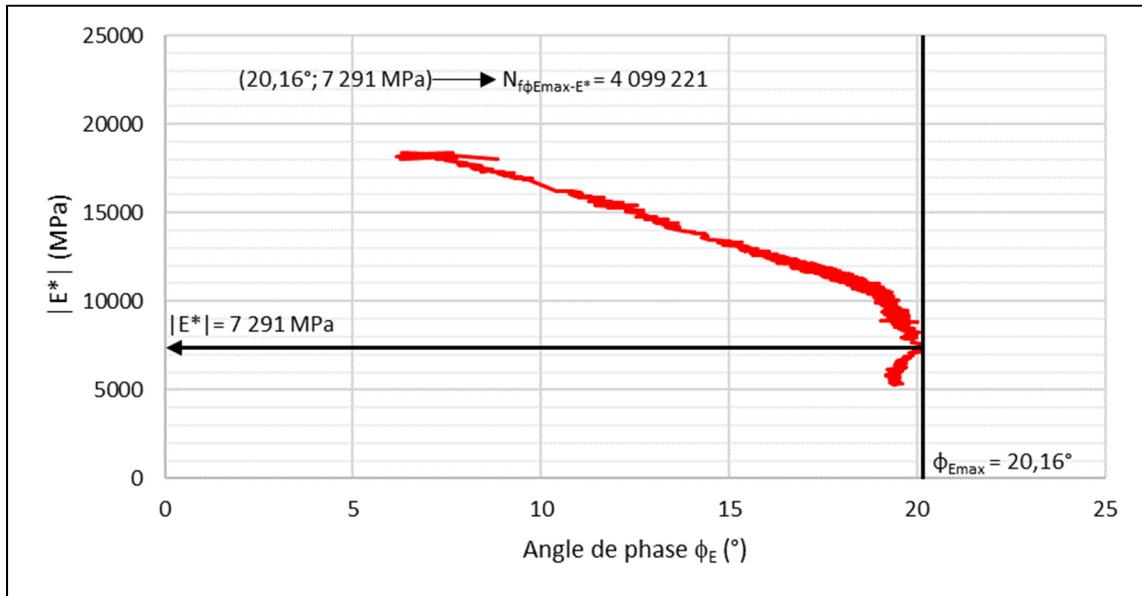


Figure 3.24 Critère de rupture $N_{f\phi E_{max}-E^*}$
(Épr. PL5-C3; $V_i = 2,5\%$; $\varepsilon_0 = 142 \mu\text{m/m}$; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $f = 10 \text{ Hz}$)

CHAPITRE 4

FORMULATION, CARACTÉRISATION THERMOMÉCANIQUE ET ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE SOLLICITATION SUR LA LOI DE FATIGUE DE L'EME-14

Ce chapitre, divisé en trois sections, présente et analyse les différents résultats des essais de laboratoire menés sur l'EME-14 étudié et confectionné en laboratoire. Tout d'abord, les essais liés à la formulation comme la densité maximale (d_{mm}) et l'aptitude au compactage (PCG) sont abordés. Ensuite, ce sont les essais thermomécaniques comme la résistance à l'orniérage, la résistance au retrait thermique empêché (TSRST), le module complexe (E^*) et la résistance à la fatigue qui sont présentés et analysés. Enfin, une analyse de l'influence du type de sollicitation (sine ou haversine) et de la fréquence de sollicitation sur la résistance à la fatigue est proposée.

4.1 Essais liés à la formulation

La validation de l'aptitude au compactage de l'EME-14, à partir d'essais à la PCG, est nécessaire pour s'assurer de la bonne maniabilité de l'enrobé. Dans un premier temps, il convient de discuter de la densité maximale (d_{mm}) de l'enrobé testé.

4.1.1 Densité maximale d_{mm} – Résultats et analyse

Le Tableau 4.1 présente les résultats de d_{mm} pour les deux échantillons testés obtenus d'un mélange de 2,1 kg d'EME-14 confectionné en laboratoire. La moyenne et l'écart entre les résultats des deux échantillons sont discutés. La méthode d'essai LC 26-045 «détermination de la densité maximale» exige un intervalle d'acceptation de deux résultats (D2S) inférieur à 0,011 (MTQ, 2018b). Ainsi, l'écart de 0,010, présenté au Tableau 4.1, respecte cette exigence. La densité maximale du mélange est de 2,569. Cette valeur est utilisée dans tous les calculs nécessitant la valeur de d_{mm} .

Tableau 4.1 Résultats des essais de d_{mm}

Échantillon #	d_{mm}	d_{mm} moyenne	D2S ($x \leq 0,011$)
1	2,564		
2	2,574	2,569	0,010

4.1.2 Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG) – Résultats et analyse

Le Tableau 4.2 présente les résultats de l'aptitude au compactage à la PCG pour les trois échantillons de l'EME-14 confectionné en laboratoire. Le nombre de girations, la teneur en vides correspondante, l'exigence quant à la teneur en vides et un commentaire sur la présence ou non de ressage et de ségrégation sont présentés dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Résultats de l'aptitude au compactage à la PCG

Nombre de girations	Teneur en vides (%)			Inspection visuelle	
	10	100	200	Ressage	Ségrégation
Éch. #1	12,0	4,4	3,7	non	non
Éch. #2	12,2	4,3	3,7	non	non
Éch. #3	13,2	4,9	4,1	non	non
Moyenne	12,5	4,5	3,8		
Exigence	$\geq 11,0$	4,0 à 7,0	$\geq 2,0$		
Conformité	oui	oui	oui		
Écart max (D2S)	1,2	0,6	0,4		
Exigence (D2S)		0,7			
Conformité	non	oui	oui		

La Figure 4.1 présente l'évolution de la teneur en vides en fonction du nombre de girations. Tel que mentionné à la section 3.2.2, l'EME-14 n'est pas normalisé et les exigences quant aux teneurs en vides sont des valeurs proposées par Bitume Québec (2014).

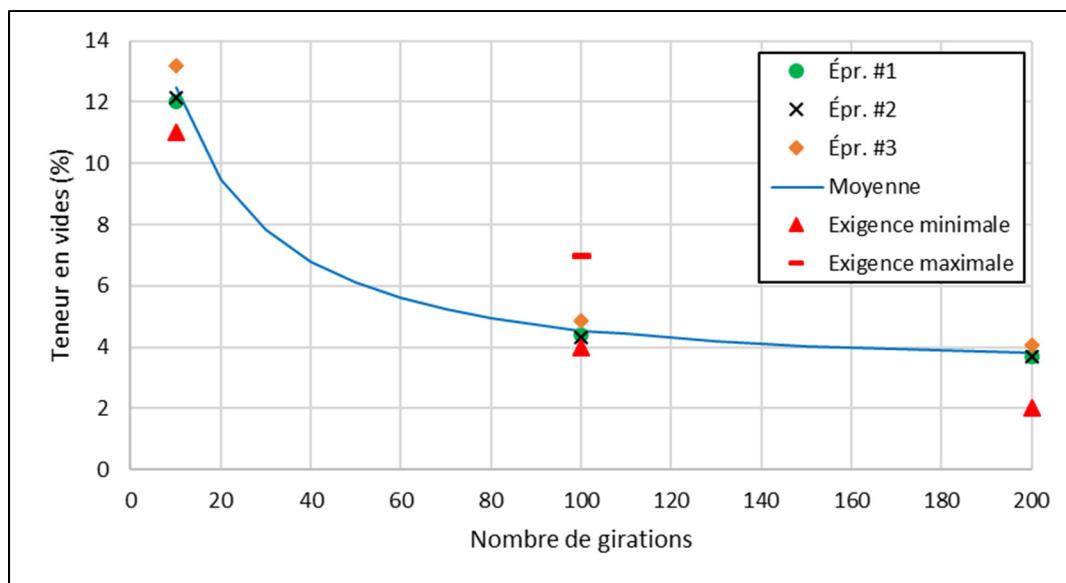


Figure 4.1 Évolution de la teneur en vides à la PCG

L'aptitude au compactage à la PCG respecte les exigences proposées par Bitume Québec (2014) pour un EME-14. Effectivement, la teneur en vides à 10 girations (12,5 %) est supérieure à 11,0 %, la teneur en vides à 100 girations (4,5 %) se situe bien entre 4,0 et 7,0 % et la teneur en vides à 200 girations (3,8 %) est supérieure à 2,0 %. Entre 100 et 200 girations, la teneur en vides ne chute que de 0,7 %. Le squelette granulaire dense et continu facilite la compaction de l'EME-14. De cette manière, l'enrobé est conforme quant aux exigences liées à sa mise en place. La méthode d'essai LC 26-003 exige un intervalle d'acceptation entre deux résultats (D2S) inférieur à 0,7. En ce sens, l'intervalle maximal à 10 girations (1,2) ne respecte pas cette exigence. Au niveau des intervalles maximaux à 100 et 200 girations (0,6 et 0,4 respectivement), l'exigence est rencontrée. Finalement, l'inspection visuelle des éprouvettes ne révèle aucune trace de ressauage ni de ségrégation.

4.2 Essais thermomécaniques

4.2.1 Résistance à l'orniérage – Résultats et analyse

L'essai de résistance à l'orniérage n'a pas été fait pour l'EME-14 étudié dans le cadre de ce mémoire. Toutefois, puisque la formulation a été calée à celle de la formule de référence de

l'EME-14 St-Philippe, les résultats de l'essai d'orniérage de ce dernier sont référencés. La Figure 4.2 présente l'évolution du pourcentage de profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles. Le pourcentage de profondeur d'ornière à 30 000 cycles est de 4,9 %. Ainsi, l'EME-14 respecte l'exigence sévère de Bitume Québec (2014) pour l'EME-14 et l'exigence pour l'EME2 français pour le pourcentage de profondeur d'ornière à 30 000 cycles qui sont respectivement $\leq 5,0\%$ et $\leq 7,5\%$. Un pourcentage de profondeur d'ornière de 4,9 % à 30 000 cycles représente une excellente performance à l'orniérage. À titre de comparaison, l'exigence pour une GB-20 est de 10 % .

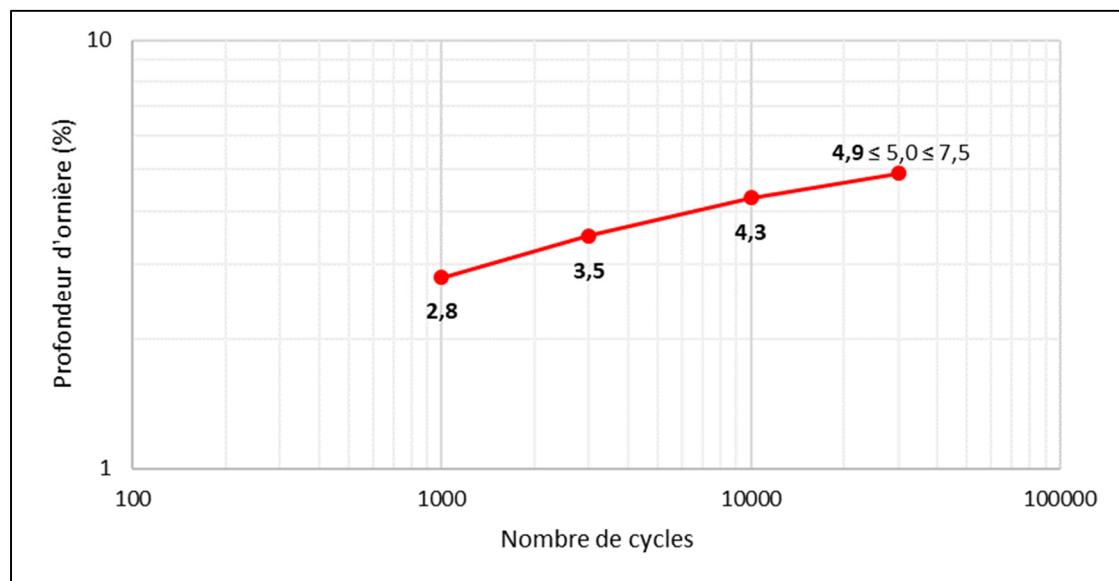


Figure 4.2 Résultats de la résistance à l'orniérage

4.2.2 Résistance au retrait thermique empêché (TSRST)

4.2.2.1 Résultats

La Figure 4.3 présente l'évolution de la contrainte en fonction de la température pour les trois éprouvettes mises à l'essai. Le Tableau 4.3 présente des informations complémentaires quant aux éprouvettes testées et une synthèse des principaux résultats des essais.

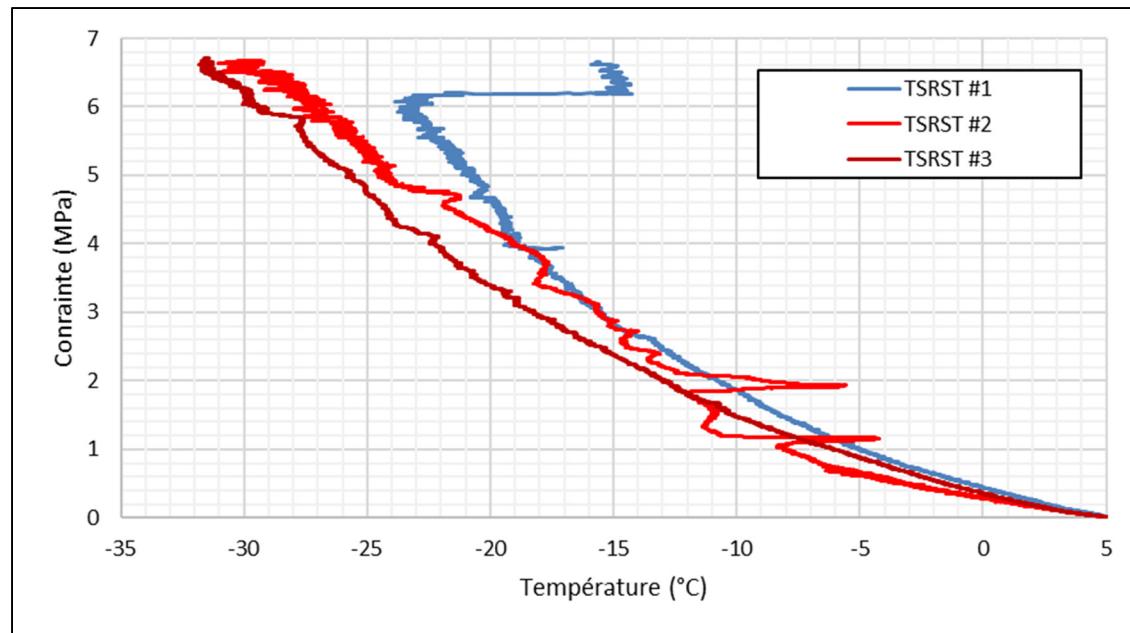


Figure 4.3 Résultats du TSRST

Tableau 4.3 Caractéristiques des éprouvettes et résultats du TSRST

	Éprouvette	TSRST #1	TSRST #2	TSRST #3	Exigence AASHTO TP10	Conformité
Caractéristiques des éprouvettes	Diamètre (mm)	62,85	62,87	62,89	60 \pm 5	oui
	Hauteur (mm)	247,57	248,43	246,91	250 \pm 5	oui
	Masse (g)	1 918,4	1 923,4	1 913,9	NA	NA
	d_{mb}	2,498	2,494	2,495	NA	NA
	d_{mm}		2,569		NA	NA
	Vides (%)	2,8	2,9	2,9	NA	NA
Résultats TSRST	Température en début d'essai (°C)	4,9	5,0	5,2	5 \pm 1	oui
	Taux d'abaissement de la température (°C/h)	9,7	10,1	10,3	10 \pm 1	oui
	Température à la rupture (°C)	-15,9	-31,8	-31,0	NA	NA
	Température à la rupture moyenne (°C)		-31,4		NA	NA
	Contrainte à la rupture (MPa)	6,7	6,7	6,7	NA	NA
	Contrainte à la rupture moyenne (MPa)		6,7		NA	NA

4.2.2.2 Analyse des résultats

Au niveau des caractéristiques des éprouvettes, les mesures de diamètre et de hauteur pour chacune des éprouvettes respectent les exigences de la norme TP10. La teneur en vides demeure constante d'une éprouvette à l'autre. En effet, l'écart maximal de teneur en vides entre deux éprouvettes (TSRST #1 et TSRST #2) est seulement de 0,2 %. Bref, les éprouvettes présentent des caractéristiques volumétriques similaires.

Au niveau des résultats des essais de TSRST, les températures en début d'essai et le taux d'abaissement de la température respectent les exigences de la norme TP10. Comme il est possible de le voir sur la Figure 4.3, un problème est survenu lors de l'essai pour l'éprouvette TSRST #1. Effectivement, aux alentours de (-23,9°C; 6,1 MPa), la température augmente rapidement pour atteindre -14,5°C. Ensuite, le refroidissement recommence et l'éprouvette rompt à (-15,9°C; 6,7 MPa). Pour ces raisons, l'éprouvette TSRST #1 est exclue du calcul de la moyenne de température et de contrainte à la rupture. Bien que la courbe de l'évolution de la contrainte en fonction de la température de l'éprouvette TSRST #2 présente deux pics d'augmentation de température soudaine, l'allure générale de la courbe s'approche suffisamment de celle de l'éprouvette TSRST #3, qui présente une courbe très propre. De plus, la température et la contrainte de rupture de l'éprouvette TSRST #2 (-31,8°C; 6,7 MPa) s'approchent également de celles de l'éprouvette TSRST #3 (-31,0°C; 6,7 MPa). Pour ces raisons, le calcul de la moyenne de température et de contrainte à la rupture ne considèrent que les éprouvettes TSRST #2 et TSRST #3. La température à la rupture moyenne est de -31,4°C. Cette température respecte l'exigence proposée par Bitume Québec (2014). Une autre comparaison peut être faite avec la température basse (T_b) du bitume établie par l'essai de BBR (*Bending Beam Rheometer*). Bitumar Inc. spécifie une température basse de -31,6°C (Tableau 3.6). Cette température est très près de la température à la rupture de l'essai TSRST. De son côté, le LCMB spécifie une température basse de -28,1°C (Tableau 3.6). La température à la rupture de l'essai TSRST est inférieure : -31,4°C < -28,1°C. Que ce soit les résultats de température basse du bitume (Tableau 3.6) ou le résultat de la température à la rupture de l'enrobé, l'EME-14 présente une performance suffisante jusqu'à -28°C.

4.2.3 Module complexe (E*)

4.2.3.1 Résultats

Pour la détermination du module complexe de l'EME-14, deux méthodes de fabrication d'éprouvettes ont été testées : des éprouvettes provenant d'une plaque MLPC et de briquettes PCG (§3.3.3 et §3.3.4). Pour chacune de ces méthodes, trois éprouvettes ont été testées. De ces trois éprouvettes, une seule subit l'essai complet de module complexe (§3.4.3.1). Les deux autres subissent un essai abrégé de module complexe pour fins de validation. Le Tableau 4.4 présente les caractéristiques des éprouvettes et le type d'essai subit.

Tableau 4.4 Caractéristiques des éprouvettes et type d'essai – Module complexe

Caractéristiques des éprouvettes	Éprouvette	PL1-A1	PL1-A2	PL1-A3	PCG-2	PCG-3	PCG-4
	Diamètre (mm)	75,38	75,34	75,35	75,38	75,44	75,46
	Hauteur (mm)	152,79	149,91	152,47	149,81	151,56	152,18
	Masse (g)	1 670,8	1 660,6	1 698,5	1 670,5	1 694,1	1 703,0
	d _{mb}	2,504	2,503	2,515	2,516	2,501	2,502
	d _{mm}	2,569					
	Vides (%)	2,5	2,6	2,1	2,1	2,6	2,6
Type d'essai	Complet ⁽¹⁾	Abrégé ⁽²⁾	Abrégé	Complet	Abrégé	Abrégé	
⁽¹⁾ Essai de E* complet (T[°C]: -20; -10; 0; 10; 20; 30 et 40; f[Hz]: 0,1; 0,3; 1; 3 et 10)							
⁽²⁾ Essai de E* abrégé (T[°C]: 10 et 15; f[Hz]: 0,1; 0,3; 1; 3 et 10)							

La Figure 4.4 présente les courbes maîtresses, les points expérimentaux et les modèles 2S2P1D à une température de référence de 10°C en fonction de la provenance des éprouvettes : plaques MLPC ou briquettes PCG. La Figure 4.5 et la Figure 4.6 présentent les modèles 2S2P1D et les points expérimentaux dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black respectivement en fonction de la provenance des éprouvettes.

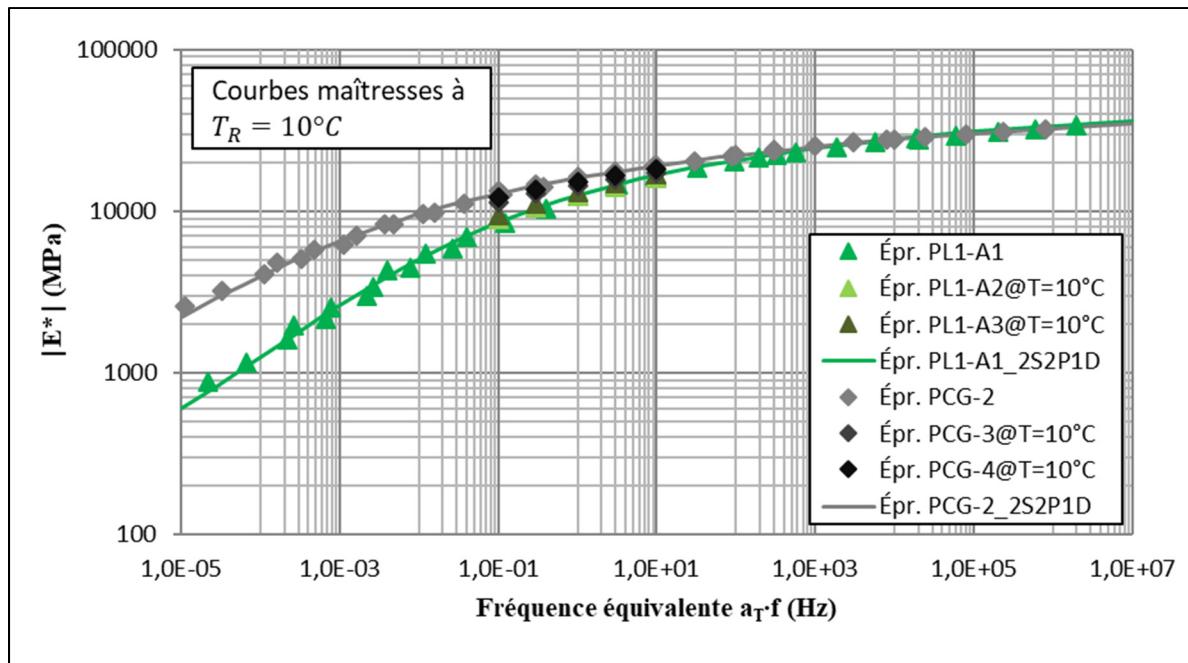


Figure 4.4 Courbes maîtresses, points expérimentaux et modèles 2S2P1D (plaques MLPC vs briquettes PCG)

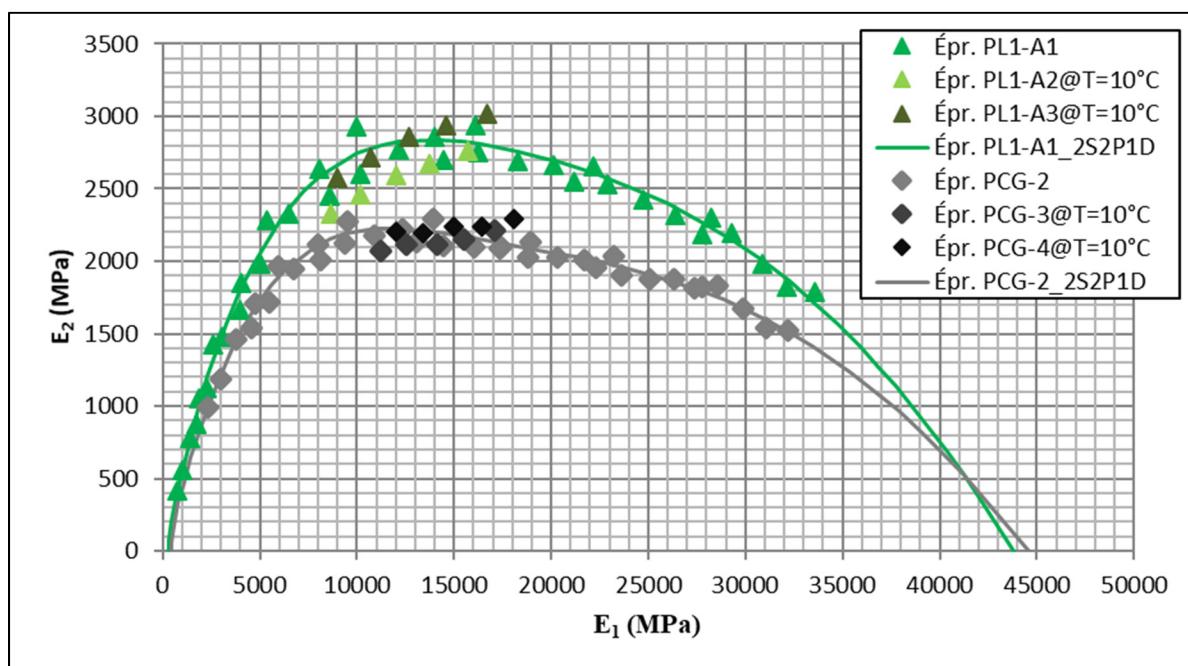


Figure 4.5 Points expérimentaux et modèles 2S2P1D dans le plan Cole-Cole (plaques MLPC vs briquettes PCG)

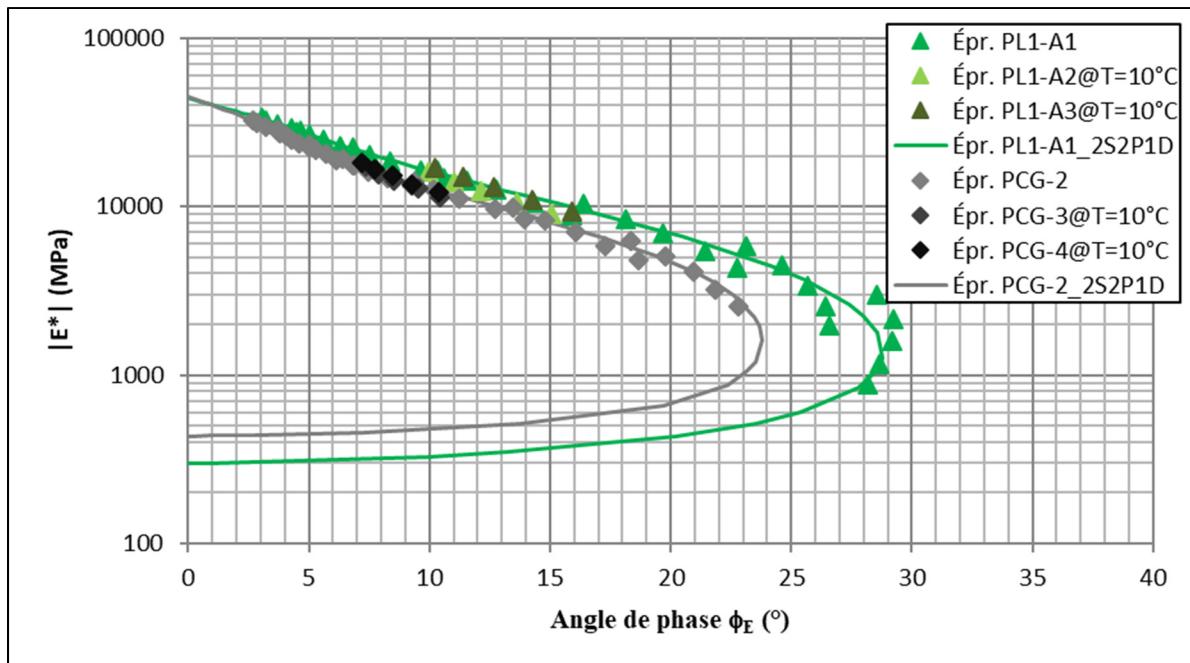


Figure 4.6 Points expérimentaux et modèles 2S2P1D dans l'espace de Black (plaques MLPC vs briquettes PCG)

4.2.3.2 Modélisation 2S2P1D

Les points expérimentaux à 10°C des essais abrégés (PL1-A2, PL1-A3, PCG-3 et PCG-4) se superposent bien aux points expérimentaux des essais complets respectifs (PL1-A1 et PCG-2). Ainsi, les modélisations 2S2P1D sont faites selon les éprouvettes PL1-A1 et PCG-2. Les points expérimentaux des Figure 4.5 et Figure 4.6 ne forment pas une courbe unique dans leur domaine respectif. Il est connu que les enrobés avec des bitumes modifiés aux polymères ne présentent pas une courbe unique dans le domaine de Black (Di Benedetto et al., 2005). Ainsi, l'enrobé bitumineux ne respecte pas le principe d'équivalence temps-température et n'est pas thermorhéologiquement simple (§1.2.6.2). Malgré tout, le Tableau 4.5 présente les paramètres du modèle 2S2P1D et de l'équation WLF pour une température de référence de 10°C pour les deux types de provenances d'éprouvettes. Même si : «les paramètres k , h , δ et β du modèle rhéologique 2S2P1D sont nécessairement similaires [...] lorsque les matériaux sont constitués d'un même bitume» (Lamothe, 2014), il a été préféré d'ajuster tous les paramètres 2S2P1D afin de limiter l'erreur entre les points expérimentaux et le modèle. Les modèles 2S2P1D sont modélisés dans chacune des figures (Figure 4.4 à Figure 4.7).

Tableau 4.5 Paramètres des modèles 2S2P1D et des équations WLF

Provenance	T _R (°C)	Constantes								
		2S2P1D						WLF		
		E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	δ	k	h	β	τ ₀ (s)	C ₁	C ₂
Plaques MLPC	10	300	43 800	2,39	0,137	0,44	1 200	0,5	23,56	163,3
Briquettes PCG	10	435	44 600	2,60	0,107	0,39	3 000	10,0	40,97	280,7

4.2.3.3 Analyse des résultats

L'analyse des résultats est séparée en deux partie : l'analyse du module complexe d'éprouvettes provenant de plaques MLPC et la comparaison des modules complexes en fonction de la provenance des éprouvettes (plaques MLCP vs briquettes PCG).

Tout d'abord, il a été choisi d'utiliser le module complexe des éprouvettes provenant de plaques MLPC dans les logiciels de dimensionnement ME. Effectivement, la compaction des plaques MLPC s'approche beaucoup plus de ce qui est fait en chantier et les éprouvettes utilisées pour les essais de fatigue proviennent également de plaques MLPC. Au niveau des exigences proposées par Bitume Québec (2014)(§3.4.3.1), l'EME-14 respecte les deux exigences : $|E^*|(10°C; 10Hz) = 16\ 399\ MPa \geq 14\ 000\ MPa$ et $|E^*|(15°C; 10Hz) = 13\ 516\ MPa \geq 11\ 000\ MPa$. L'exigence française pour l'EME2 n'est pas atteinte : $|E^*|(15°C; 10Hz) = 13\ 516\ MPa \leq 14\ 000\ MPa$ (Setra-LCPC, 1994). À température très élevée et/ou fréquence très faible, le squelette granulaire de l'EME-14 fournit une rigidité de 300 MPa (Tableau 4.5). À température très basse et/ou fréquence très élevée, l'EME-14 atteint une rigidité très élevée de 43 800 MPa (Tableau 4.5). Sur la Figure 4.7, il est possible de voir la diminution de l'angle de phase pour la température de 40°C. Ceci signifie que le bitume est rendu trop mou pour avoir un impact sur la rigidité de l'enrobé bitumineux (Di Benedetto et al., 2005). C'est uniquement le squelette granulaire qui assure la rigidité de l'enrobé.

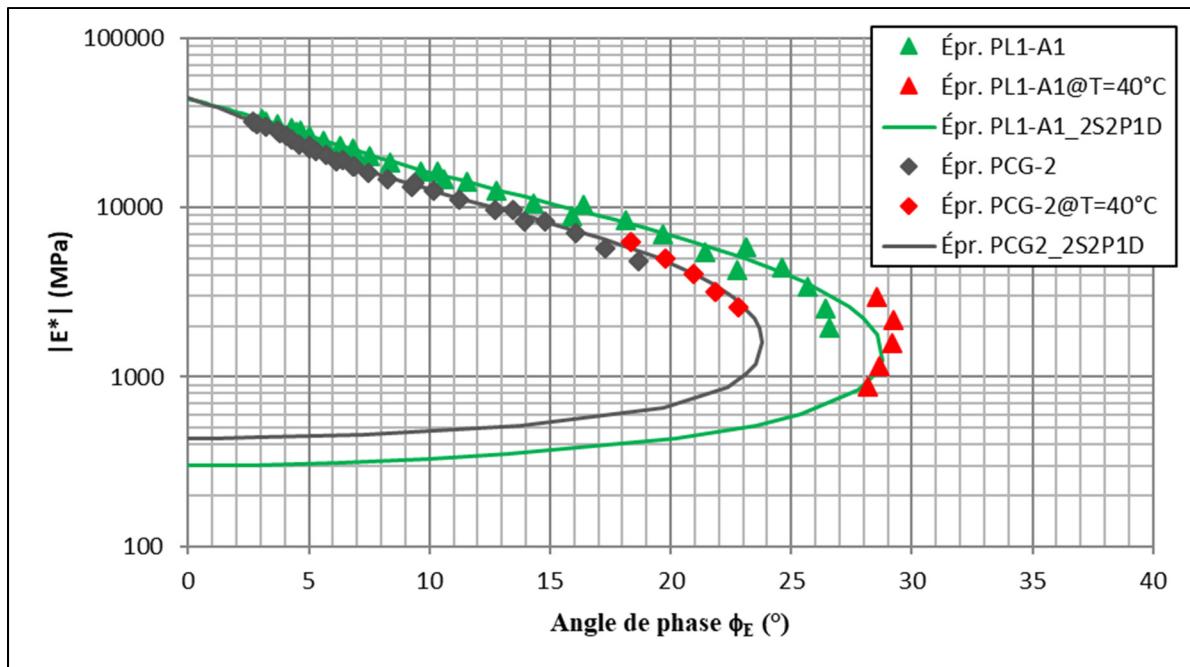


Figure 4.7 Points expérimentaux et modèles 2S2P1D dans l'espace de Black (plaques MLPC vs briquettes PCG) avec emphase sur $T = 40^\circ\text{C}$

Du côté de l'analyse des différences en fonction de la provenance des éprouvettes, il faut noter que l'écart de teneur en vides entre les éprouvettes PL1-A1 et PCG-2 est de 0,4 % (Tableau 4.4). Cet écart demeure relativement faible, mais doit être considéré. L'écart-type de la teneur en vides entre ces deux éprouvettes (0,3 %) respecte l'exigence de la norme NF EN 12697-24 (0,7 %) pour les éprouvettes trapézoïdales (EN, 2005). La Figure 4.4 présente les courbes maîtresses, les points expérimentaux et les modèles 2S2P1D à une température de référence de 10°C en fonction de la provenance des éprouvettes. Le Tableau 4.6 présente la norme du module complexe et l'angle de phase selon la provenance de l'éprouvette pour différentes températures (T) à une fréquence de 10 Hz. Il présente également les écarts et les écarts relatifs entre ces deux provenances.

Tableau 4.6 Influence de la provenance des éprouvettes sur le module complexe

f (Hz)	T (°C)	Épr. PL1-A1		Épr. PCG-2		Écart ⁽¹⁾		Écart relatif (%) ⁽²⁾	
		E* (MPa)	Φ _E (°)	E* (MPa)	Φ _E (°)	E* (MPa)	Φ _E (°)	E*	Φ _E
10	-20	33 651	3,0	32 244	2,7	-1 407	-0,3	-4,2	-11,2
	-10	28 357	4,7	27 841	3,8	-516	-0,9	-1,8	-19,3
	0	22 304	6,8	23 290	5,0	985	-1,8	4,4	-26,8
	10	16 399	10,3	19 047	6,4	2 648	-3,9	16,1	-37,7
	20	10 401	16,4	14 096	9,4	3 695	-7,0	35,5	-42,9
	30	5 819	23,1	9 769	13,5	3 950	-9,7	67,9	-41,8
	40	2 980	28,6	6 244	18,4	3 264	-10,2	109,5	-35,8

⁽¹⁾ Écart = Valeur_{PCG-2} - Valeur_{PL1-A1}

⁽²⁾ Écart relatif = Écart / Valeur_{PL1-A1}

De la Figure 4.4 et du Tableau 4.6, il est possible de voir que les éprouvettes provenant de plaques MLPC ont une rigidité légèrement plus élevée que celle provenant de briquettes PCG à basse température et/ou haute fréquence. Cette tendance s'inversera à fréquence infinie puisque $E_0 \text{ PL1-A1} < E_0 \text{ PCG-2}$ (Tableau 4.5). Il est également possible de voir que les éprouvettes provenant de briquettes PCG ont une rigidité plus élevée que celle provenant de plaques pour les températures supérieures à 0°C et/ou les basses fréquences. Cet écart augmente à mesure que la fréquence diminue ou que la température augmente. Bref, une éprouvette PCG présente une rigidité similaire à celle d'une éprouvette provenant d'une plaque à basse température et/ou haute fréquence. Toutefois, à haute température et/ou basse fréquence, sa rigidité est supérieure. Une piste d'explication de ce phénomène peut être l'influence du matériel de compaction (PCG vs Compacteur de plaque MLPC) sur l'arrangement du squelette granulaire (contact granulats sur granulats) au sein de l'enrobé.

Une deuxième explication pourrait être une variabilité au niveau du bitume. Par exemple, l'utilisation d'un bitume de nature différente, un bitume vieilli, bref un bitume au comportement rhéologique différent. Effectivement, selon la littérature, les paramètres k , h , δ et β du modèle 2S2P1D auraient dû être les mêmes d'une provenance à l'autre puisque le bitume utilisé est le même. Une seconde observation sur la Figure 4.7 appuie la théorie d'un bitume différent. Effectivement, à 40°C, seul l'enrobé provenant de la plaque MLPC présente

une chute prononcée de l'angle de phase. Si le même bitume avait été utilisé, fort probablement qu'il y aurait eu une chute simultanée (à $T = 40^{\circ}\text{C}$) de l'angle de phase pour l'éprouvette provenant d'une briquette PCG.

Au niveau de l'angle de phase, les éprouvettes provenant de briquettes PCG ont toujours un angle de phase inférieur à celui d'éprouvette provenant de plaques (Tableau 4.6). Cet écart tend à augmenter avec la température. Brièvement, les éprouvettes provenant de plaques MLPC sont plus visqueuses, donc moins élastiques que les éprouvettes provenant de briquettes PCG. Encore une fois, le matériel de compaction, affectant l'arrangement du squelette granulaire au sein de l'enrobé, pourrait expliquer cet écart. Une variabilité du bitume pourrait également expliquer cet écart.

La Figure 4.5 présente les points expérimentaux et les modèles 2S2P1D dans le plan Cole-Cole pour les deux types de provenance. Sur cette figure, il est possible de voir que le modèle 2S2P1D d'une éprouvette provenant d'une plaque MLPC est majoritairement au-dessus de celui d'une éprouvette provenant d'une briquette PCG. Ceci signifie que les éprouvettes provenant de plaques MLPC sont plus visqueuses, donc moins élastiques que les éprouvettes provenant de briquettes PCG pour une même valeur de norme de module complexe.

La Figure 4.6 présente les points expérimentaux et les modèles 2S2P1D dans l'espace de Black pour les deux types de provenance. De cette figure, il est possible de voir, qu'à une même valeur de module dynamique, l'angle de phase d'une éprouvette provenant d'une plaque MLPC présente un angle de phase plus élevé qu'une éprouvette provenant d'une briquette PCG. Ceci indique, encore une fois, que les éprouvettes provenant de plaques MLPC sont plus visqueuses, donc moins élastiques que les éprouvettes provenant de briquettes PCG.

4.2.4 Résistance à la fatigue

4.2.4.1 Résultats pour une sollicitation de type sine à 10°C et 10 Hz

Pour les essais de fatigue réalisés sous une sollicitation de type sine à 10°C et 10 Hz, les caractéristiques des éprouvettes, les amplitudes de déformation (ε_0) (§3.4.4.1) et les durées de vie en fatigue selon les critères $N_{f50\%}$, $N_{ffE\max-N}$, $N_{ffE\max-E^*}$ et $N_{f\text{II/III}}$ (§3.4.4.3) sont présentées dans le Tableau 4.7. La réalisation et l'analyse des essais individuels de fatigue sont faites selon les sections 3.4.4.1 et 3.4.4.2. Le Tableau 4.8 présente les paramètres des lois de fatigue pour deux critères de rupture ($N_{f50\%}$ et $N_{f\text{II/III}}$). Enfin, la Figure 4.8 présente les droites de fatigue.

Tableau 4.7 Caractéristiques des éprouvettes et durées de vie en fatigue
($N_{f50\%}$; $N_{f\text{II/III}}$) – Sine (10°C; 10Hz)

Éprouvette	d_{mb}	d_{mm}	Vides (%)	ε_0 ($\mu\text{m/m}$)	$N_{f50\%}$ (cycles)	$N_{ffE\max-N}$ (cycles)	$N_{ffE\max-E^*}$ (cycles)	$N_{f\text{II/III}}$ (cycles) ⁽¹⁾
PL6-A1	2,509	2,569	2,3	97,8	24 657 586	24 657 586	24 657 586	24 657 586
PL5-A3	2,518		2,0	127,2	7 061 000	2 857 211	2 857 211	2 857 211
PL5-C1	2,508		2,4	126,8	3 078 125	1 039 068	1 039 068	1 039 068
PL5-C3	2,505		2,5	140,3	3 923 926	3 758 644	2 005 642	2 882 143
PL5-C4	2,513		2,2	142,0	315 189	177 189	392 892	285 041
PL5-A4	2,518		2,0	158,9	513 060	498 035	402 869	450 452
PL5-B1	2,502		2,6	160,4	793 559	893 730	452 980	673 355
PL5-B2	2,501		2,6	158,8	1 915 540	1 940 584	1 940 584	1 940 584
PL5-B3	2,507		2,4	154,1	322 786	325 295	325 295	325 295
PLS1-C2 ⁽²⁾	2,520		1,9	177,3	307 500	149 701	149 701	149 701

⁽¹⁾ $N_{f\text{II/III}} = (N_{ffE\max-N} + N_{ffE\max-E^*}) / 2$

⁽²⁾ Plaque supplémentaire # (PLS#)

Tableau 4.8 Paramètres des lois de fatigue
(N_{f50%}; N_{fII/III}) – Sine (10°C; 10Hz)

Paramètre	Critère de rupture	
	N _{f50%}	N _{fII/III}
Nombre d'échantillons	10	10
ε ₆ (θ _{test} , f _{test}) (μm/m)	150	144
N _{f1} (θ _{test} , f _{test})	1,741E-23	6,364E-23
a ₂ (-1/b)	7,5	7,3
a ₃ , effet de θ ⁽¹⁾	2,5	2,5
R ²	0,71	0,69
Écart-type, S _{log(Nf)}	0,66	0,65
Écart-type résiduel, S _{Nf} ⁽²⁾	0,37	0,38

⁽¹⁾ Valeur par défaut proposée par Alizé-LCPC
⁽²⁾ S_{Nf} = S_{log(Nf)}[(1-R²)(n-1)/(n-2)]^{0,5}

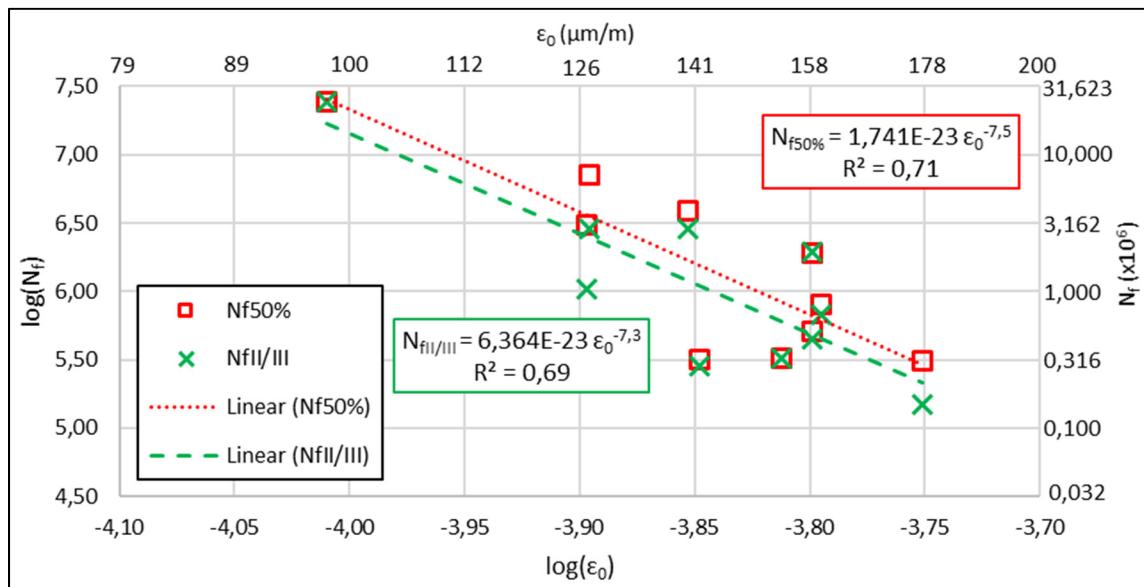


Figure 4.8 Droites de fatigue (N_{f50%}; N_{fII/III}) – Sine (10°C; 10Hz)

4.2.4.2 Résultats pour une sollicitation de type haversine à 10°C et 10 Hz

Pour les essais de fatigue réalisés sous une sollicitation de type haversine à 10°C et 10 Hz, les caractéristiques des éprouvettes, les amplitudes de déformation (ε₀ et ε₀^{pk-pk}) (§3.4.4.1) et les durées de vie en fatigue selon les critères N_{f50%}, N_{f₀E_{max-N}}, N_{f₀E_{max-E*}} et N_{fII/III} (§3.4.4.3) sont présentées dans le Tableau 4.9. En premier lieu, il a été choisi d'utiliser les valeurs d'amplitude de déformation pic-à-pic (ε₀^{pk-pk}) pour définir les lois de fatigue. Ce choix a été fait suivant

l'hypothèse que c'est l'amplitude en extension qui dicte la durée de vie en fatigue (§2.3.2). Le Tableau 4.10 présente les paramètres des lois de fatigue pour deux critères de rupture ($N_{f50\%}$ et $N_{fII/III}$) en fonction des amplitudes de déformation pic-à-pic (ϵ_0^{pk-pk}). Enfin, la Figure 4.9 présente les droites de fatigue pour les amplitudes de déformation pic-à-pic.

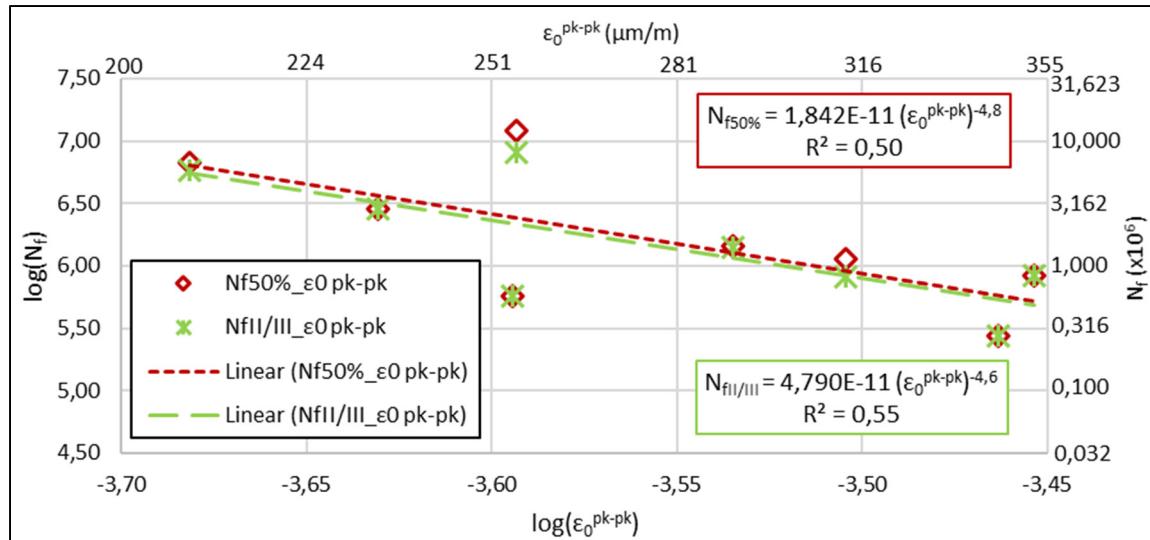
Tableau 4.9 Caractéristiques des éprouvettes et durées de vie en fatigue
($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Haversine (10°C; 10Hz)

Éprouvette	d_{mb}	d_{mm}	Vides (%)	ϵ_0 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	ϵ_0^{pk-pk} ($\mu\text{m}/\text{m}$) ⁽¹⁾	$N_{f50\%}$ (cycles)	$N_{ffEmax-N}$ (cycles)	$N_{ffEmax-E^*}$ (cycles)	$N_{fII/III}$ (cycles)
PLS1-A1	2,504	2,569	2,5	104,1	208,2	6 683 548	5 768 660	5 768 660	5 768 660
PL6-A2	2,505		2,5	117,0	234,0	2 845 184	2 857 206	2 857 206	2 857 206
PLS1-B4	2,519		1,9	127,2	254,4	578 217	578 217	578 217	578 217
PL6-B3	2,504		2,5	127,5	255,0	12 161 228	8 163 918	8 163 918	8 163 918
PLS1-A2	2,505		2,5	145,9	291,8	1 454 650	1 407 908	1 407 908	1 407 908
PLS1-A3	2,509		2,3	156,5	313,0	1 139 170	810 121	810 121	810 121
PL6-A3	2,505		2,5	176,0	352,0	826 665	827 333	827 333	827 333
PL6-B4	2,520		1,9	172,1	344,2	275 541	275 541	275 541	275 541

⁽¹⁾ $\epsilon_0^{pk-pk} = 2 \epsilon_0$

Tableau 4.10 Paramètres des lois de fatigue
pour ϵ_0^{pk-pk}
($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Haversine (10°C; 10Hz)

Paramètre	Critère de rupture	
	$N_{f50\%}$	$N_{fII/III}$
Nombre d'échantillons	8	8
$\epsilon_0 (\theta_{test}, f_{test})$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	307	301
$N_{f1} (\theta_{test}, f_{test})$	1,842E-11	4,790E-11
$a_2 (-1/b)$	4,8	4,6
a_3 , effet de θ	2,5	2,5
R^2	0,50	0,55
Écart-type, $S_{\log(Nf)}$	0,55	0,51
Écart-type résiduel, SN_f	0,42	0,37

Figure 4.9 Droites de fatigue pour ε_0^{pk-pk} ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Haversine (10°C; 10Hz)

4.2.4.3 Résultats pour une sollicitation de type sine à 10°C et 5 Hz

Pour les essais de fatigue réalisés sous une sollicitation de type sine à 10°C et 5 Hz, les caractéristiques des éprouvettes, les amplitudes de déformation (ε_0) (§3.4.4.1) et les durées de vie en fatigue selon les critères $N_{f50\%}$, $N_{f\phi Emax-N}$, $N_{f\phi Emax-E^*}$ et $N_{fII/III}$ (§3.4.4.3) sont présentées dans le Tableau 4.11. La réalisation et l'analyse des essais individuels de fatigue sont faites selon les sections 3.4.4.1 et 3.4.4.2. Le Tableau 4.12 présente les paramètres des lois de fatigue pour deux critères de rupture ($N_{f50\%}$ et $N_{fII/III}$). Enfin, la Figure 4.10 présente les droites de fatigue.

Tableau 4.11 Caractéristiques des éprouvettes et durées de vie en fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine (10°C; 5Hz)

Éprouvette	d_{mb}	d_{mm}	Vides (%)	ε_0 (μm/m)	$N_{f50\%}$ (cycles)	$N_{f\phi Emax-N}$ (cycles)	$N_{f\phi Emax-E^*}$ (cycles)	$N_{fII/III}$ (cycles)
PLS1-C1	2,520	2,569	1,9	148,8	4 983 333	3 383 541	3 383 541	3 383 541
PL6-B1	2,508		2,4	148,4	16 895 556	7 791 586	7 791 586	7 791 586
PL6-B2	2,506		2,5	148,5	1 435 056	701 471	701 471	701 471
PLS1-A4	2,519		1,9	160,2	2 267 635	2 197 584	1 437 004	1 817 294
PLS1-B3	2,514		2,1	170,9	791 516	511 313	511 313	511 313
PLS1-B1	2,518		2,0	180,4	306 882	92 751	92 751	92 751
PLS1-B2	2,522		1,8	180,2	273 434	133 276	133 276	133 276

Tableau 4.12 Paramètres des lois de fatigue
(N_{f50%}; N_{fII/III}) – Sine (10°C; 5Hz)

Paramètre	Critère de rupture	
	N _{f50%}	N _{fII/III}
Nombre d'échantillons	7	7
$\varepsilon_0 (\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) (\mu\text{m}/\text{m})$	167	160
N _{f1} ($\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}$)	1,707E-49	7,039E-55
a ₂ (-1/b)	14,5	15,8
a ₃ , effet de θ	2,5	2,5
R ²	0,76	0,76
Écart-type, S _{log(Nf)}	0,66	0,71
Écart-type résiduel, S _{Nf}	0,35	0,38

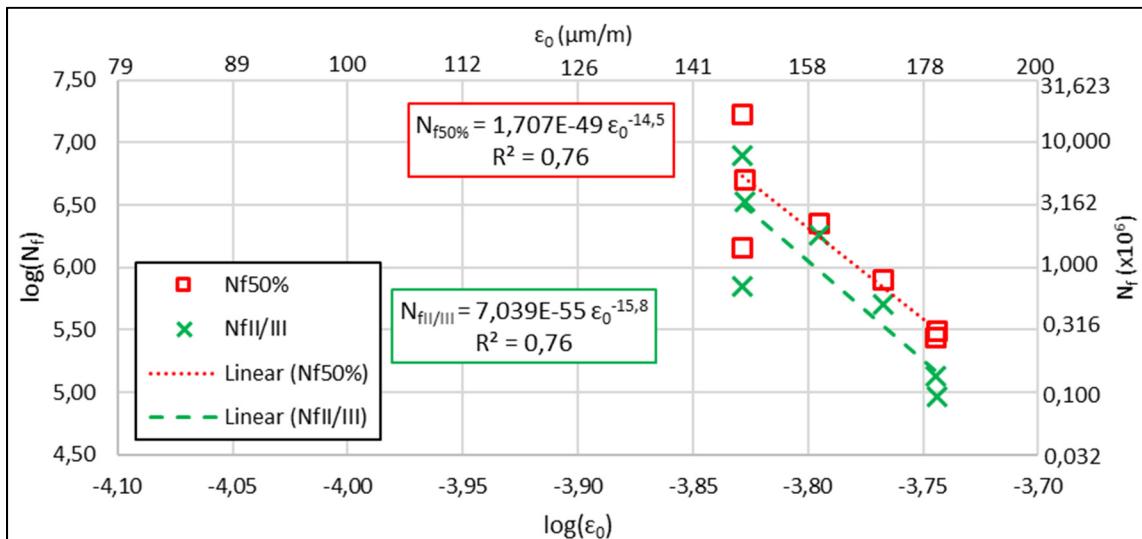


Figure 4.10 Droites de fatigue (N_{f50%}; N_{fII/III}) – Sine (10°C; 5Hz)

4.2.4.4 Analyse des résultats de résistance à la fatigue

Au niveau de la densité des éprouvettes, l'écart toléré d'un pour cent (1 %) par rapport à la densité moyenne (norme NF EN 12697-24) est respecté pour chacun des types de sollicitation étudiés. De plus, l'écart-type de la teneur en vides des éprouvettes respecte l'exigence de la norme NF EN 12697-24, soit un écart de moins de 0,7 % entre les éprouvettes trapézoïdales testées en fatigue (EN, 2005). Bien évidemment, les éprouvettes testées ne sont pas trapézoïdales, mais l'exigence est quand même à considérer.

Au niveau des droites de fatigue, le critère $N_{f50\%}$ présente toujours un $\varepsilon_6(\theta_{test}, f_{test})$ plus élevé que ceux du critère $N_{fII/III}$. Pour les sollicitations sine et haversine à 10°C et 10 Hz, le paramètre a_2 est plus élevé pour le critère $N_{f50\%}$. Pour la sollicitation sine à 10°C et 5 Hz, c'est le paramètre a_2 du critère $N_{fII/III}$ qui est plus élevé. Malheureusement, les valeurs de R^2 pour l'ensemble des types de sollicitation sont faibles. Effectivement, des R^2 aussi faibles que 0,50 et 0,55 sont mesurés pour la sollicitation haversine à 10°C et 10 Hz. Ceci affecte la valeur du SN_f qui entre dans le calcul de la durée de vie en fatigue suivant la méthode de dimensionnement Alizé-LCPC. Selon les essais réalisés, le SN_f a des valeurs de 0,38 et 0,37 (Tableau 4.13) comparativement à la valeur de SN_f recommandé par Alizé-LCPC pour un EME2 (0,25). L'écart n'est pas négligeable quoique de même ordre de grandeur. Un SN_f plus élevé signifie une épaisseur de couche d'enrobé plus importante pour un trafic fixé. Une piste d'explication pour les R^2 faibles et les SN_f élevés est l'écart insuffisant entre les différents niveaux d'amplitude de sollicitation (ε_0). Effectivement, ces différents niveaux de sollicitations auraient dû être établis selon le principe suivant qui propose un écart minimal de 30 % entre deux niveaux :

$$\frac{\varepsilon_{0i}}{\varepsilon_{0i+1}} \leq 0,7 \quad (4.1)$$

Avec :

ε_{0i} Niveau d'amplitude de déformation i (amplitude la plus faible)

ε_{0i+1} Niveau d'amplitude de déformation supérieur

4.2.4.5 Influence du type de sollicitation sur la résistance à la fatigue

Dans un premier temps, la Figure 4.11 présente les droites de fatigue selon les critères $N_{f50\%}$ et $N_{fII/III}$ pour les sollicitations de type sine (10°C; 10Hz) et haversine (10°C; 10Hz). Du côté de la sollicitation de type sine, l'amplitude de déformation est ε_0 (§3.4.4.1). Du côté de la sollicitation de type haversine, l'amplitude de déformation est ε_0^{pk-pk} (§3.4.4.1). Pour le même matériau, deux familles de résultats pour les essais de fatigue sont clairement visibles (Figure 4.11). Cet écart est essentiellement lié à la façon de définir l'amplitude de sollicitation imposée

à chacune des éprouvettes. La recherche sur la résistance en fatigue des matériaux bitumineux a permis de mettre en perspective qu'une sollicitation de type haversine en extension induit des efforts uniquement de tension dans les premiers cycles de sollicitation, mais que rapidement, après un certain nombre de cycles, la sollicitation converge vers une sollicitation de tension-compression de type centré. Ce faisant, l'amplitude de sollicitation qui conduit à la fatigue de l'éprouvette s'en trouve atténuée, passant de $\varepsilon_0^{\text{pk-pk}}$ à $\frac{\varepsilon_0^{\text{pk-pk}}}{2}$. Les résultats menés selon une sollicitation de type haversine sont translatés horizontalement par rapport à ceux des essais menés selon une sollicitation de type sine.

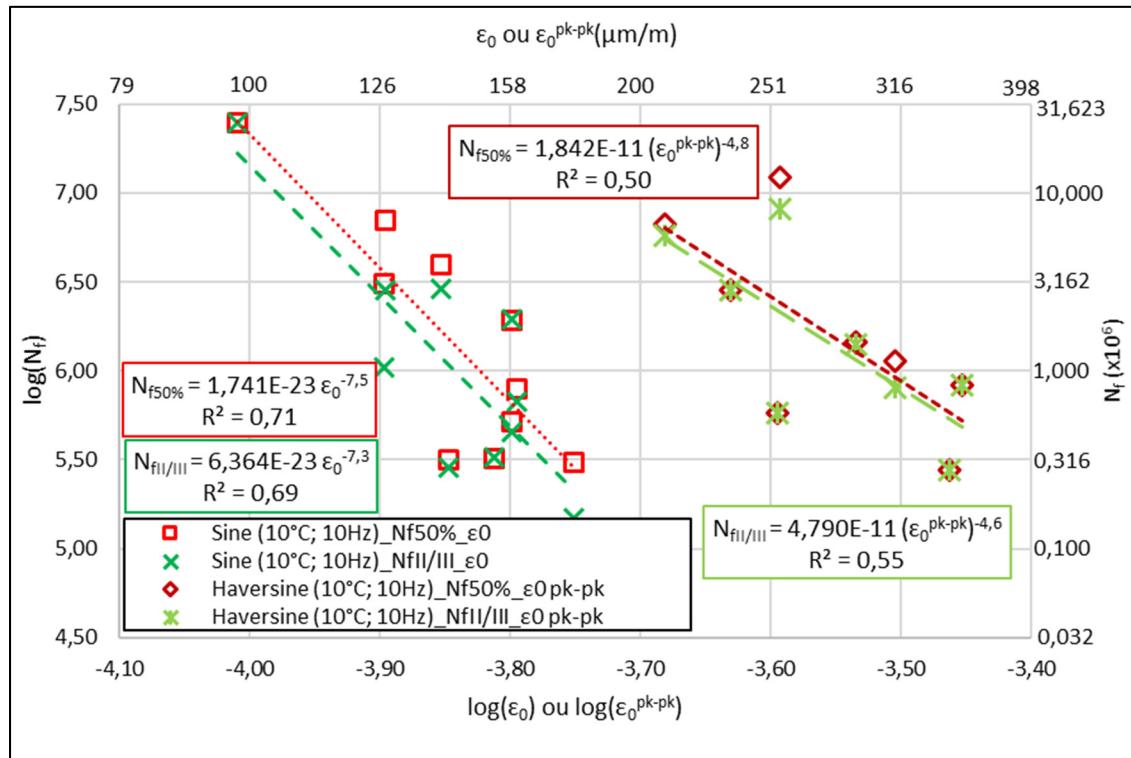


Figure 4.11 Droites de fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) –
Sine (10°C; 10Hz; ε_0) vs Haversine (10°C; 10Hz; $\varepsilon_0^{\text{pk-pk}}$)

Dans le cas où les paramètres de la droite de fatigue du matériau sont définis en considérant une amplitude de sollicitation pic-à-pic ($\varepsilon_0^{\text{pk-pk}}$), la pente demeure essentiellement la même, mais la valeur de $N_{fI}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})$ se trouve surestimée. En référent à la correction proposée par Perraton et coll. (2019), la valeur $N_{fI}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})$ obtenue en considérant une amplitude de

sollicitation pic-à-pic ($N_{f1}(\varepsilon_0^{pk-pk}, \theta_{test}, f_{test})$) peut être corrigée pour se comparer à celle obtenue en considérant une amplitude de sollicitation ε_0 ($N_{f1}(\varepsilon_0, \theta_{test}, f_{test})$). La Figure 4.12 illustre les différents aspects en cause. En définitive, afin de comparer l'influence du type de sollicitation sur la résistance à la fatigue, il est primordial de bien définir l'amplitude de sollicitation (ε_0 ou ε_0^{pk-pk}) pour utiliser la même d'un type de sollicitation à l'autre. En effet, la loi de fatigue change en fonction de l'amplitude de sollicitation choisie. Heureusement, le lien entre ces deux amplitudes est bien simple :

$$\varepsilon_0^{pk-pk} = 2 \varepsilon_0 \quad (4.2)$$

Le lien, au point de vue de la durée de vie (N_f) en fonction du type d'amplitude est alors :

$$N_{f1}(\varepsilon_0^{pk-pk}, \theta_{test}, f_{test}) = 2^{a_2} N_{f1}(\varepsilon_0, \theta_{test}, f_{test}) \quad (4.3)$$

La Figure 4.12 illustre bien les liens et les translations, autant verticales qu'horizontales, en fonction du type d'amplitude considéré (ε_0 et ε_0^{pk-pk}).

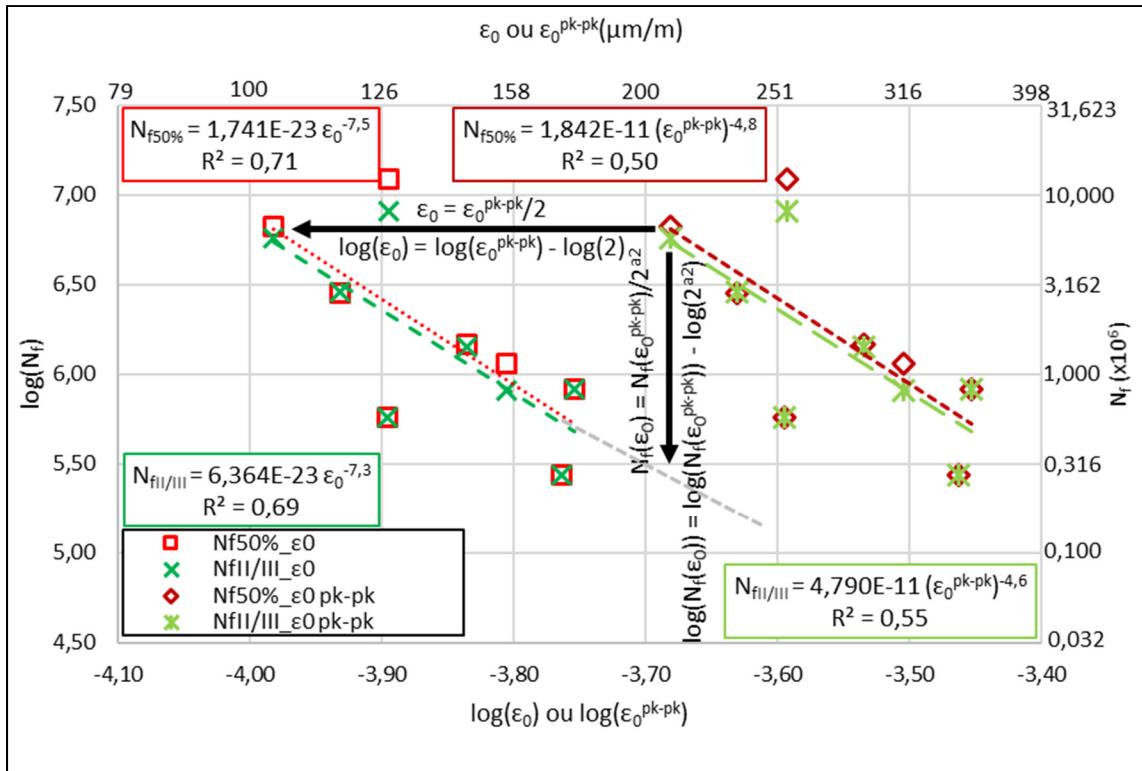


Figure 4.12 Droites de fatigue pour ϵ_0 et $\epsilon_0^{\text{pk-pk}}$ ($N_{f50\%}$; $N_{\text{fII/III}}$) – Haversine (10°C ; 10Hz)

La Figure 4.13 présente les points expérimentaux des essais menés selon une sollicitation de type sine et haversine considérant la valeur d' ϵ_0 du signal tel que défini à la section 3.4.4.1. Les points expérimentaux des essais réalisés sous le mode de sollicitation haversine ont une étiquette «H» à leur gauche et ceux des essais réalisés sous le mode de sollicitation sine ont une étiquette «S» à leur droite.

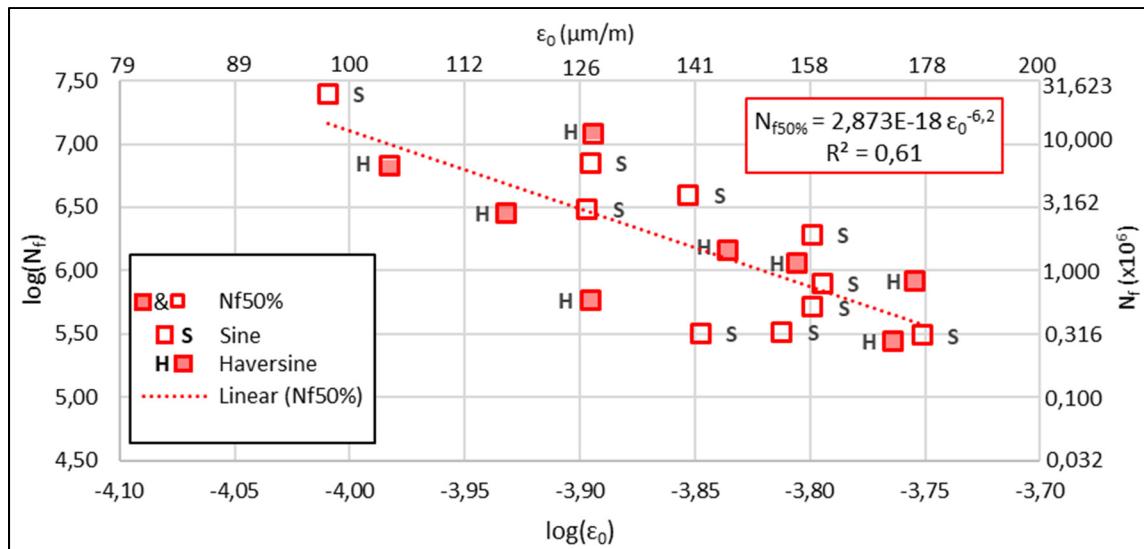


Figure 4.13 Droite de fatigue ($N_{f50\%}$) suivant les conditions d'essai sine et haversine ($10^\circ\text{C}; 10\text{Hz}$) en considérant la valeur ε_0 comme amplitude de sollicitation

Les résultats de la Figure 4.13 montrent que l'ensemble des points se superposent et se marient bien les uns aux autres indépendamment du type de sollicitation (sine ou haversine). Le décentrage de la sollicitation (haversine) ne semble pas affecter les durées de vie en fatigue. De ce constat, les paramètres des lois de fatigue ont été déterminés pour l'ensemble des 18 éprouvettes et se retrouvent dans le Tableau 4.13.

Tableau 4.13 Paramètres des lois de fatigue ($N_{f50\%}$; $N_{fII/III}$) – Sine & Haversine ($10^\circ\text{C}; 10\text{Hz}$)

Paramètre	Critère de rupture	
	$N_{f50\%}$	$N_{fII/III}$
Nombre d'échantillons	18	18
$\varepsilon_0 (\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) (\mu\text{m/m})$	151	145
$N_f (\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})$	$2,873\text{E-18}$	$5,606\text{E-18}$
$a_2 (-1/b)$	6,2	6,1
$a_3, \text{effet de } \theta$	2,5	2,5
R^2	0,61	0,62
Écart-type, $S_{\log(Nf)}$	0,59	0,58
Écart-type résiduel, SN_f	0,38	0,37

À noter que c'est le comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux qui fait en sorte que la durée de vie est comparable peu importe le type de sollicitation (sine ou haversine).

Effectivement, la déformation totale en extension de type haversine demeure constante tout au long de l'essai. Suivant le principe de Boltzmann, cette déformation est décomposable en deux composantes primaires (Figure 4.14a).

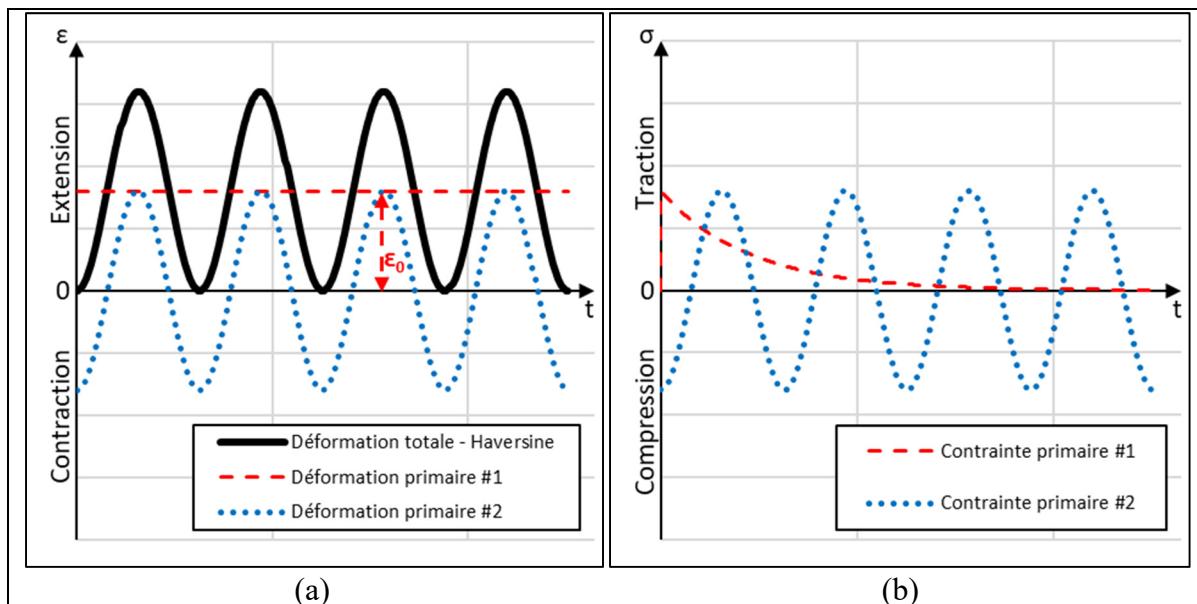


Figure 4.14 Décomposition des signaux pour une sollicitation de type haversine
 (a) Déformation (b) Contrainte

Ainsi, en cours de sollicitation, la déformation primaire #1, qui demeure constante dans le temps (Figure 4.14a), fait subir une relaxation à la contrainte primaire #1 (Figure 4.14b). De son côté, la déformation primaire #2 (Figure 4.14a), de forme sinusoïdale alternée et centrée sur zéro, donne lieu à une contrainte primaire #2 (Figure 4.14b) qui est également sinusoïdale, alternée et centrée sur zéro. En définitive, la déformation primaire #1 recentre le signal de contrainte en zéro au fil des cycles. Il est intéressant de rappeler, ici, le phénomène de relaxation : «diminution des contraintes en fonction du temps d'un matériau soumis à une déformation maintenue constante dans le temps» (Sohm, 2011). La Figure 4.15 illustre l'allure du signal de contrainte totale (juxtaposition des contraintes primaires #1 et #2) pour une sollicitation de type haversine. La sollicitation dans l'éprouvette passe d'une traction simple à une contrainte centrée et alternée de traction-compression après stabilisation. L'atteinte de cette stabilisation semble, à priori, se faire suffisamment rapidement, de sorte à ne peu ou pas affecter les durées de vie en fatigue.

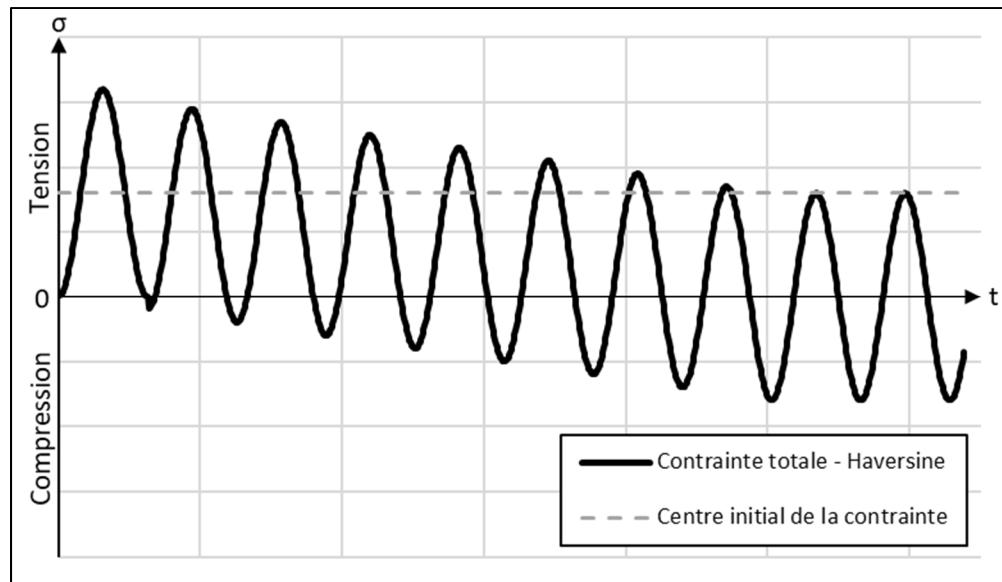


Figure 4.15 Relaxation du signal de contrainte lors d'une sollicitation de type haversine

En somme, l'essai de type haversine, que l'on pourrait croire induire un effort de traction seulement, devient très rapidement un essai de traction-compression directe de type sine. Ainsi, le type de sollicitation, qu'il soit sine ou haversine, mène à des durées de vie comparable pour une même amplitude de sollicitation (ϵ_0 ou $\epsilon_0^{\text{pk-pk}}/2$) si la température et la fréquence sont les mêmes.

4.2.4.6 Influence de la fréquence sur la résistance à la fatigue

Au niveau de l'influence de la fréquence sur la résistance à la fatigue de l'EME-14 étudié, les impacts sont non négligeables. Il faut noter que les échantillons choisis pour représenter la sollicitation de type sine à 10°C et 10 Hz contiennent également ceux de la sollicitation haversine à 10°C et 10 Hz (18 éprouvettes au total). La Figure 4.16, le Tableau 4.12 et le Tableau 4.13 démontrent clairement qu'une réduction de la fréquence, passant de 10 à 5 Hz, fait augmenter l' ϵ_6 ($\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}$) de 151 à 167 $\mu\text{m}/\text{m}$ et le paramètre a_2 de 6,2 à 14,5.

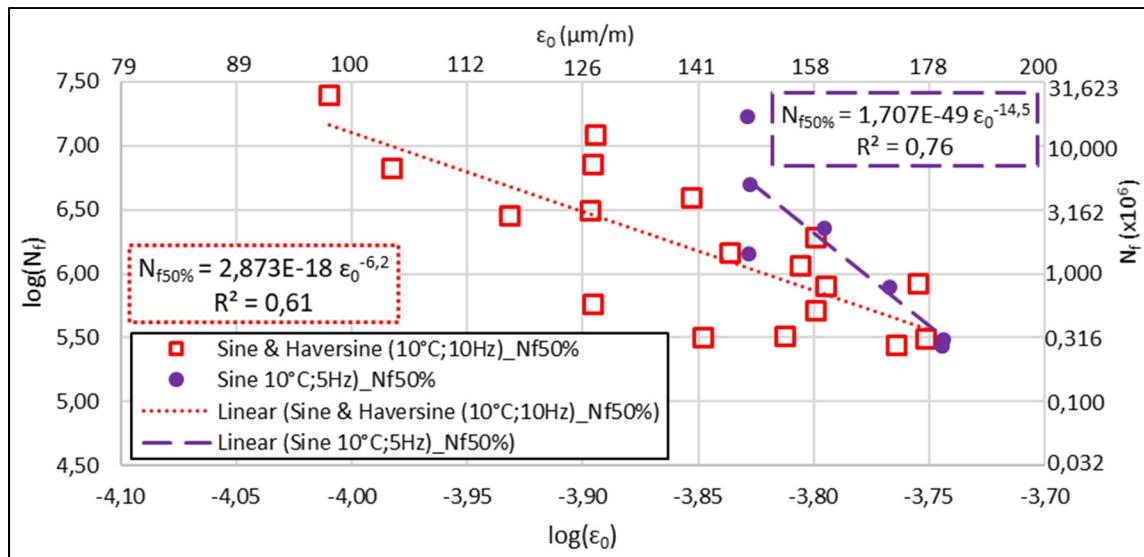


Figure 4.16 Droites de fatigue ($N_{f50\%}$) – Sine (10°C; 10Hz) vs Sine (10°C; 5Hz)

CHAPITRE 5

VALIDATION DES CORRESPONDANCES ET COMPARAISON DES LOGICIELS DE DIMENSIONNEMENT ME DE LA MÉTHODE FRANÇAISE ET AMÉRICAINE

5.1 Validation des correspondances entre les logiciels Alizé-LCPC, OPECC et AASHTOWare Pavement ME Design

L'établissement et la validation de correspondances entre les logiciels Alizé-LCPC, ci-après appelé Alizé, OPECC et *AASHTOWare Pavement ME Design*, ci-après appelé PvME, sont d'une grande importance. Effectivement, les entreprises françaises, comme Eurovia, ont confiance envers la méthode de dimensionnement française et maîtrisent bien la gestion des risques associée à celle-ci. Étant donnée la présence grandissante d'Eurovia sur le territoire américain, il devient nécessaire de maîtriser le logiciel et les risques associés à la méthode américaine. Afin d'approfondir la compréhension de cette méthode et, du même coup, d'augmenter la confiance que les entreprises peuvent y porter, cette section vise à valider que : pour les mêmes intrants, les trois logiciels, référant aux mêmes lois et/ou modèles de calcul de contraintes et de déformations dans la structure de chaussée (modèle de Burmister), d'endommagement par fatigue des matériaux bitumineux (loi de Wöhler) et de cumul des dommages (loi de Miner), mènent au même dimensionnement (§2.3.3).

La validation de cette prémissse et des correspondances est explorée dans les sections 5.1.1 à 5.1.3. C'est par l'entremise de deux exemples que la détermination des correspondances est présentée. Étant donnée la plus grande confiance que les entreprises françaises ont envers la méthode française, les correspondances entre les deux logiciels sont établies suivant la direction suivante : d'Alizé vers PvME.

5.1.1 Intrants Alizé et OPECC et leur correspondance dans PvME

Pour les deux exemples de dimensionnement introduits à ce chapitre, les intrants utilisés dans Alizé proviennent de choix arbitraires (définition de la structure, des propriétés des matériaux

granulaires, du trafic et de la durée) ou des recommandations émises dans la norme NF P98-086 (définition des propriétés des matériaux bitumineux, de la fréquence, de la température équivalente, du risque et des coefficients de calibration). À partir des intrants dans Alizé, les correspondances avec OPECC et PvME sont ainsi établies. Les intrants et les correspondances des deux exemples sont dévoilés à travers les sections 5.1.1.1 à 5.1.1.6. À ce stade, il faut noter que, pour PvME, la version 2.5.3 du logiciel et le système d'unités impérial ont été utilisés.

5.1.1.1 Définition de la structure

Le Tableau 5.1 présente les structures choisies, soit : les matériaux, les épaisseurs et le type d'interface entre chacune des couches dans Alizé et OPECC et leur correspondance dans PvME. Les matériaux bitumineux sélectionnés (BBSG3, EME2 et GB3) sont des enrobés standards français. Les matériaux granulaires (MG), en termes de nombre et d'épaisseur, ont été sélectionnés arbitrairement. Les épaisseurs pour la couche de surface et les matériaux granulaires ont également été fixées arbitrairement. Le type d'interface entre chacune des couches est collé (Norme française, 2019). L'épaisseur de l'enrobé de base, l'EME2 pour la structure #1 et la GB3 pour la structure #2, sont à déterminer (à dét.) suivant les sollicitations de trafic. Les correspondances dans PvME sont simples et directes. En effet, les épaisseurs sont simplement présentées selon le système impérial. Le terme «*full friction*» est utilisé pour reprendre l'expression utilisée dans PvME et correspond à une interface collée.

Tableau 5.1 Définition des structures: matériaux, épaisseurs et interface – Volet 3

Structure #1					Structure #2				
Matériaux	Alizé et OPECC		PvME		Matériaux	Alizé et OPECC		PvME	
	Ép. (mm)	Interface	Ép. (po)	Interface		Ép. (mm)	Interface	Ép. (po)	Interface
BBSG3	70	collée	2,76	full friction	BBSG3	70	collée	2,76	full friction
EME2	à dét.	collée	à dét.	full friction	GB3	à dét.	collée	à dét.	full friction
MG1	200	collée	7,87	full friction	MG1	200	collée	7,87	full friction
Infra	∞	NA	∞	NA	MG2	300	collée	11,81	full friction
					Infra	∞	NA	∞	NA

5.1.1.2 Fréquence et température équivalente

Dans Alizé, le dimensionnement se fait à un seul couple de fréquence et de température équivalente. Dans le cadre des deux exemples (Structures #1 et #2), le dimensionnement se fait à une fréquence de 10 Hz et une température équivalente de 15°C (Tableau 5.2). Pour OPECC, il a également été choisi de faire les dimensionnements à température et fréquence fixes (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 Fréquence et température équivalente dans Alizé et OPECC

Paramètres	
Fréquence (Hz)	10
Température équivalente (°C)	15

Pour PvME, le dimensionnement se fait pour différents couples de fréquence et de température. C'est le principe du calcul incrémental. La fréquence est déterminée en fonction des matériaux de la structure et de la vitesse du trafic (*operational speed* du Tableau 5.16). Au niveau des données climatiques, PvME propose une panoplie de stations climatiques (Tableau 5.3). Les stations climatiques sont situées géographiquement (élévation, latitude et longitude). Les stations climatiques contiennent les données de température, de vitesse du vent, de pourcentage de soleil, de hauteur de précipitation, du pourcentage d'humidité et de hauteur de nappe phréatique associées à chacune des périodes (date et heure). Dans l'optique d'utiliser le module complexe modélisé par PvME tout en faisant la correspondance avec Alizé, il faut fixer la température à 59°F (15°C), la vitesse du vent, le pourcentage de soleil, la hauteur de précipitation et le pourcentage d'humidité à zéro et la profondeur de la nappe phréatique suffisamment profonde pour ne pas affecter les propriétés des matériaux de la structure de chaussée (Tableau 5.4). Dans le cadre des deux exemples présentés, la correspondance avec Alizé en termes de fréquence et de température équivalente ($\theta_{eq} = 15°C$ et $f = 10$ Hz) se fait directement dans les intrants de module complexe en imposant le module dynamique à 10 Hz et 15°C à chacun des couples fréquence et température (§5.1.1.3 et Tableau 5.9).

Tableau 5.3 Station climatique et résumé des données climatiques dans PvME

Climate station	
Elevation	134,47
Climate station	US.MA (147055)
Latitude (°)	42,5
Longitude (°)	-71,25
Depth of water table (ft)	Annual (100)
Climate summary	
Mean annual air temperature (°F)	59
Mean annual precipitation (in)	0
Freezing index (°F-days)	0
Average annual number of freeze/thaw cycles	0
Number of wet days	0
Monthly temperatures	
Average temperature in January (°F)	59
Average temperature in February (°F)	59
Average temperature in March (°F)	59
Average temperature in April (°F)	59
Average temperature in May (°F)	59
Average temperature in June (°F)	59
Average temperature in July (°F)	59
Average temperature in August (°F)	59
Average temperature in September (°F)	59
Average temperature in October (°F)	59
Average temperature in November (°F)	59
Average temperature in December (°F)	59

Tableau 5.4 Données climatiques dans PvME

Date/Hour	Temperature (°F)	Wind speed (mph)	Sunshine (%)	Precipitation (in)	Humidity (%)	Water table (ft)
1985-01-01 12:00:00 AM	59	0	0	0	0	100
1985-01-01 1:00:00 AM	59	0	0	0	0	100
1985-01-01 2:00:00 AM	59	0	0	0	0	100
...	59	0	0	0	0	100
2017-11-30 9:00:00 PM	59	0	0	0	0	100
2017-11-30 10:00:00 PM	59	0	0	0	0	100
2017-11-30 11:00:00 PM	59	0	0	0	0	100

5.1.1.3 Propriétés des matériaux

Le Tableau 5.5 présente les intrants des modules dynamiques et des coefficients de Poisson (§1.2.6.3), à 15°C et 10 Hz, de l'enrobé de surface, des matériaux granulaires et de l'infra pour les deux structures tels que requis par Alizé et OPECC.

Tableau 5.5 Propriétés des matériaux granulaires et de surface dans Alizé et OPECC – Volet 3

Structure #1					Structure #2				
Matériaux	E* (15°C;10Hz) (MPa)	Coefficient de Poisson			Matériaux	E* (15°C;10Hz) (MPa)	Coefficient de Poisson		
		Alizé	OPECC	Alizé			Alizé	OPECC	Alizé
	Alizé/OPECC	v	v ₀	v ₀₀	Alizé/OPECC	v	v ₀	v ₀₀	Alizé
BBSG3	7 000	0,350	0,349	0,351	BBSG3	7 000	0,350	0,349	0,351
MG1	120	0,350	0,349	0,351	MG1	100	0,350	0,349	0,351
Infra	120	0,350	0,349	0,351	MG2	75	0,350	0,349	0,351
					Infra	50	0,350	0,349	0,351

Pour les enrobés de base, les modules dynamiques à 10 Hz pour 10°C et 15°C, les coefficients de Poisson, les ϵ_6 , les a_2 , les Sh et les SN_f sont présentés dans le Tableau 5.6. Les caractéristiques de l'EME2 et la GB3 sont directement prises de la bibliothèque des matériaux d'Alizé.

Tableau 5.6 Propriétés des matériaux bitumineux en couche de base dans Alizé et OPECC – Volet 3

Logiciel concerné	Structure	#1	#2
	Matériaux bitumineux en couche de base	EME2	GB3
Alizé et OPECC	E* (15°C;10Hz) (MPa)	14 000	9 000
Alizé et OPECC	E* (10°C;10Hz) (MPa)	16 940	11 880
Alizé	v	0,35	0,35
OPECC	v ₀	0,349	0,349
OPECC	v ₀₀	0,351	0,351
Alizé	ϵ_6 (10°C; 25Hz) en 2PB ($\mu\text{m}/\text{m}$)	130	90
OPECC	N _{f1} (10°C; 25Hz) en 2PB	3,7129E-14	5,9049E-15
Alizé et OPECC	a_2 (-1/b)	5	5
Alizé et OPECC	Sh (m)	0,025	0,025
Alizé et OPECC	SN _f	0,25	0,30

Du côté de PvME, les intrants pour les propriétés des matériaux sont beaucoup plus nombreux et complexes. Pour chacun des matériaux bitumineux, il faut fixer l'épaisseur, les paramètres volumétriques, les propriétés mécaniques et les propriétés thermiques. Le Tableau 5.7 présente la liste des intrants à fixer pour chacun des matériaux bitumineux. Dans le cadre des exemples, les éléments avec la police verte ont été modifiés et les éléments avec la police rouge et grasse ont été laissés aux valeurs par défaut. Au niveau des paramètres volumétriques, il faut noter que le volume de vides doit correspondre à celui attendu en chantier et le pourcentage de

bitume est volumétrique. Pour les propriétés mécaniques, il faut sélectionner le niveau de précision (1, 2 ou 3) avec lequel les intrants sont fixés selon la connaissance et la précision de la caractérisation en laboratoire des mélanges utilisés. Le niveau trois est le moins précis. Le niveau 1 correspond au niveau avec la plus haute précision. Il faut noter que, si le premier niveau est sélectionné pour les caractéristiques du bitume, le premier niveau sera automatiquement sélectionné pour le module complexe de l'enrobé et vice-versa.

Tableau 5.7 Propriétés des matériaux bitumineux dans PvME – Volet 3

Matériaux bitumineux	BBSG3	EME2	GB3
Asphalt Layer			
Thickness (in)	2,76	à dét.	à dét.
Mixture Volumetrics			
Air voids (%)	4,5	3,0	4,5
Effective binder content (%)	12,20	9,04	10,20
Poisson's ratio	0,35	0,35	0,35
Unit weight (pcf)	157,256	160,315	159,379
Mechanical Properties			
Asphalt binder	Level 1	Level 1	Level 1
Creep compliance	Level 3	Level 3	Level 3
Dynamic modulus	Level 1	Level 1	Level 1
Select HMA E* predictive model	Use viscosity based model (nationally calibrated)		
Reference temperature (°F)	70	70	70
Indirect tensile strength at 14°F (psi)	Level 3	Level 3	Level 3
Thermal			
Heat capacity (BTU/lb-°F)	0,23	0,23	0,23
Thermal conductivity (BTU/hr-ft-°F)	0,67	0,67	0,67
Thermal contraction	1,185E-05	9,011E-06	1,063E-05

Au niveau 1, pour les caractéristiques des bitumes, il faut présenter les résultats liés au rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR, *Dynamic Shear Rheometer*), soit le module dynamique et l'angle de phase pour un minimum de trois températures. Le Tableau 5.8 présente les valeurs utilisées pour chacun des enrobés utilisés dans les exemples.

Tableau 5.8 Propriétés mécaniques des bitumes (*Level 1*) dans PvME – Volet 3

Matériaux	Grade du bitume	Temperature (°F)	Binder G* (Pa)	Phase angle (°)
BBSG3	PG 58-28	136,40	2 806	82,39
		141,08	2 185	83,31
		147,20	1 363	84,52
EME2	PG 88-28	168,80	8 040	40,80
		179,60	5 460	40,70
		217,09	1 438	40,70
GB3	PG 64-28	147,20	4 046	75,09
		157,28	2 150	77,72
		158,00	2 022	77,91

Au niveau 1, pour les modules complexes des enrobés bitumineux, il faut présenter le module dynamique pour un minimum de trois niveaux de températures ayant chacun un minimum de trois fréquences de sollicitation ($3 \times 3 = 9$). Il est recommandé d'avoir minimalement une température sous 0°C, une fréquence sous 1 Hz, une fréquence supérieure à 10 Hz et deux fréquences entre 1 et 10 Hz. De ces trois températures, il faut les valeurs de module complexe pour 130°F ou plus ($\geq 54.4^\circ\text{C}$). Le Tableau 5.9 présente l'allure du tableau des intrants de module complexe. Comme la température et la fréquence sont fixées respectivement à 15°C et 10 Hz pour les exemples, le module dynamique pour chacune des températures et des fréquences a été fixé à sa valeur à 15°C et 10 Hz. De ces intrants, PvME modélise un module complexe duquel il calcule des valeurs de module dynamique pour les différents couples de fréquence et de température rencontrés lors des simulations.

Tableau 5.9 Module complexe des enrobés bitumineux
(Level 1) dans PvME – Volet 3

Matériaux	Temperature (°F)	E* (psi)				
		0,1	0,3	1	3	10
BBSG3	-4	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	14	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	32	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	50	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	68	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	86	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	104	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	130	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
EME2	Temperature (°F)	Frequency (Hz)				
	-4	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528
	14	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528
	32	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528
	50	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528
	68	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528
	86	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528
	104	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528	2 030 528
GB3	Temperature (°F)	Frequency (Hz)				
	-4	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	14	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	32	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	50	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	68	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	86	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	104	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	130	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340

Au niveau des propriétés mécaniques des matériaux granulaires et de l'infra, celles-ci sont nombreuses et exhaustives. Pour chaque matériaux granulaires et l'infra, il faut définir les propriétés physiques et d'ingénierie. Le Tableau 5.10 présente la liste des intrants à fixer pour chacun des matériaux non liés. Dans le cadre des deux structures étudiées, les éléments avec la police verte ont été modifiés et les éléments avec la police rouge et grasse ont été laissés aux valeurs par défaut dans PvME. Le coefficient de poussée latérale des terres est laissé à la valeur par défaut. L'épaisseur est simplement exprimée en pouces et le coefficient de Poisson est fixé à la même valeur qu'Alizé (0,35). Le module résilient peut s'exprimer sous deux niveaux de précision (2 et 3). C'est le troisième niveau, sous une valeur représentative annuelle, qui a été

sélectionné pour exprimer le module résilient des matériaux granulaires. Les valeurs de module sont simplement exprimées en psi. Au niveau de la granulométrie et des autres propriétés d'ingénierie, d'autres intrants sont nécessaires (Tableau 5.11).

Tableau 5.10 Propriétés des matériaux granulaires dans PvME – Volet 3

Structure	#1		#2		
Matériaux granulaires	MG1	Infra	MG1	MG2	Infra
Unbound					
Coefficient of lateral earth pressure	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Layer thickness (in)	7,87	Semi-infinite	7,87	11,81	Semi-infinite
Poisson's ratio	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Modulus					
Resilient modulus (psi)	17 405	17 405	14 504	10 878	7 252
Sieve					
Gradation & other engineering properties	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a

Tout d'abord, la granulométrie de chacun des matériaux granulaires a été fixée aux valeurs moyennes du fuseau granulométrique exigé pour un MG-20 (BNQ, 2014). De plus, les couches granulaires sont compactées. De nombreuses caractéristiques sont laissées aux valeurs par défaut comme l'indice de liquidité et de plasticité, la conductivité hydraulique et la teneur en eau.

Tableau 5.11 Granulométrie et autres propriétés d'ingénierie des matériaux granulaires dans PvME

Matériaux	MG1, MG2 et Infra
Sieve size	% passing
#200	4,5
#50	13,0
#16	28,5
#4	47,5
1/2 in.	80,5
3/4 in.	95,0
1 in.	100,0
Liquid limit	6
Plasticity index	1
Is the layer compacted?	yes
Maximum dry unit weight (pcf)	127,7
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr)	5,697E-02
Specific gravity of solids	2,7
Water content (%)	7,4
User-defined Soil Water Characteristic Curve (SWCC)	
af	2,89095
bf	2,64282
cf	0,80265
hr	109

5.1.1.4 Trafic et durée

Le Tableau 5.12 présente les intrants de trafic et de durée pour les deux exemples utilisés dans Alizé. Pour le calcul du trafic cumulé en nombre d'ÉCAS dans Alizé, quatre intrants sont nécessaires : une moyenne journalière annuelle (MJA), un taux d'accroissement, une durée de service et un coefficient d'agressivité moyen (CAM). Les taux d'accroissement, les durées de service et les CAM ont été fixés arbitrairement. C'est l'ÉCAS américain qui a été sélectionné et configuré dans Alizé. Le Tableau 5.13 présente ses caractéristiques : la distance entre les roues, la charge appliquée par roue, le rayon de la trace des roues et la pression dans les roues.

Tableau 5.12 Paramètres de trafic et de durée dans Alizé – Volet 3

Structure	#1	#2
Moyenne journalière annuelle (MJA)	1 127,6	500,0
Classe de trafic	T0	T1
Taux d'accroissement géométrique (%)	2	2
Durée de service (années)	20	20
Trafic cumulé (nb. de passages)	1,0000E+07	4,4343E+06
CAM	1	1
Trafic cumulé (ÉCAS américain)	1,0000E+07	4,4343E+06

Tableau 5.13 Définition de l'ÉCAS américain dans Alizé et OPECC

Paramètres	
Distance entre les roues (m)	0,343
Charge appliquée par roue (MN)	0,020
Rayon de la trace des roues (m)	0,104
Pression dans les roues (MPa)	0,587

Le Tableau 5.14 présente les intrants de trafic et de durée pour les deux exemples présentés dans OPECC. L'ÉCAS américain est défini de la même manière qu'Alizé (Tableau 5.13).

Tableau 5.14 Paramètres de trafic et de durée dans OPECC – Volet 3

Structure	#1	#2
Durée de service (années)	20	20
Taux d'accroissement géométrique (%)	2	2
CAM	1	1
Débit journalier moyen annuel (DJMA)	1127,6	500,0
% du trafic dans la direction analysée	100	100
% du trafic dans la voie analysée	100	100
% des véhicules lourds	100	100
Nbr. de jours de camionnage par année	365	365
Trafic cumulé (ÉCAS américain)	1,0000E+07	4,4343E+06

Du côté de PvME, la définition du trafic et de la durée est plus laborieuse. Effectivement, pour la durée de service, il faut sélectionner le type de chaussée (nouvelle chaussée et chaussée flexible), la durée de service, la date de construction des matériaux de base, la date de construction de la couche de surface et la date d'ouverture au trafic (Tableau 5.15).

Tableau 5.15 Définition du type de chaussée et de la durée de service dans PvME

Design type	New Pavement	
Pavement type	Flexible Pavement	
Design life (years)	20	
Base construction	May	2019
Pavement construction	June	2019
Traffic opening	July	2019

Le calcul du trafic cumulé en nombre d'ÉCAS n'est pas simple. Tout d'abord, il faut préciser l'*average annual daily truck traffic* (AADTT), le nombre de voies, le pourcentage de camions dans la direction du design et le pourcentage de camion dans la voie du design (Tableau 5.16). Ceci permet d'avoir un nombre de passages. De là, il faut faire correspondre chacun de ces passages à un passage d'un ÉCAS américain. Pour y arriver, il faut fixer la distance entre les roues à 13,5 pouces (0,343 m) et la pression dans les roues à 85,14 psi (0,587 MPa). PvME propose la notion de louvoiement du trafic. Puisqu'Alizé ne considère pas directement cette notion, l'écart-type du louvoiement est fixé à 0. La définition de ces intrants est présentée dans le Tableau 5.16. De son côté, la vitesse du trafic sert au calcul des fréquences de charge dans la structure de chaussée.

Tableau 5.16 Paramètres du trafic et définition de l'ÉCAS américain dans PvME – Volet 3

Structure	#1	#2
Average annual daily truck traffic (AADTT)		
Two-way AADTT	2 737,85	1 214,04
Number of lanes	1	1
% of trucks in design direction	50	50
% of trucks in design lane	100	100
Operational speed (mph)	62,14	62,14
Traffic capacity		
Traffic capacity cap	Not enforced	Not enforced
Axle configuration		
Average axle width (ft)	8,5	8,5
Dual tire spacing (in)	13,5	13,5
Tire pressure (psi)	85,14	85,14
Tandem axle spacing (in)	51,6	51,6
Tridem axle spacing (in)	49,2	49,2
Quad axle spacing (in)	49,2	49,2
Lateral wander		
Design lane width (ft)	12	12
Mean wheel location (in)	18	18
Traffic wander standard deviation (in)	0	0
Wheelbase		
Average spacing of long axles (ft)	18	18
Average spacing of medium axles (ft)	15	15
Average spacing of short axles (ft)	12	12
% of trucks with long axles	0	0
% of trucks with medium axles	0	0
% of trucks with short axles	100	100

Pour faire correspondre chacun des passages à un passage d'un ÉCAS américain, c'est-à-dire l'équivalent du CAM de 1 dans Alizé, il faut attribuer à une classe de véhicule 100 % de la distribution du trafic (Tableau 5.17). Aux autres classes, il faut attribuer une valeur de 0 %. La fonction et le taux de croissance sont également sélectionnés. Pour les présents exemples, la classe 5 a été sélectionnée comme celle représentant 100 % du trafic.

Tableau 5.17 Distribution du trafic lourd selon les différentes classes dans PvME

Véhicule class	Distribution (%)	Growth rate (%)	Growth function
Class 4	0	0	Linear
Class 5	100	0	Linear
Class 6	0	0	Linear
Class 7	0	0	Linear
Class 8	0	0	Linear
Class 9	0	0	Linear
Class 10	0	0	Linear
Class 11	0	0	Linear
Class 12	0	0	Linear
Class 13	0	0	Linear
Total	100		

Il faut également établir la distribution du trafic lourd durant l'année pour chacune des classes de véhicules. Les facteurs correspondent aux numérateurs et le dénominateur est de 12 (12 mois). La somme de tous les numérateurs doit correspondre à 12. Ainsi, le trafic à un certain mois se calcule ainsi :

$$TC_i = TC_{annuel} \cdot \frac{f_i}{12} \quad (5.1)$$

Avec :

TC_i Trafic cumulé au mois i

TC_{annuel} Trafic total annuel

f_i Facteur au mois i ($\sum_{i=1}^{12} f_i = 12$)

Dans les présents exemples, la distribution du trafic de la classe 5 est égale tout au long de l'année (Tableau 5.18).

Tableau 5.18 Distribution du trafic lourd
durant l'année dans PvME

Month	Vehicule class									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
January	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
February	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
March	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
April	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
May	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
June	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
July	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
August	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
September	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
October	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
November	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
December	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0

Pour chacune des classes, il faut déterminer le nombre d'essieux de chacun des types disponibles : simple, tandem, tridem et quad. PvME considère que tous ces types d'essieux ont des pneus jumelés (A. AASHTO, 2008). L'ÉCAS correspond à un essieu jumelé simple. Ainsi, la classe 5 n'est constituée que d'un seul essieu jumelé simple (Tableau 5.19).

Tableau 5.19 Détermination du nombre et
du type d'essieu des différentes classes
de véhicule dans PvME

Vehicule class	Axle type			
	Single	Tandem	Tridem	Quad
Class 4	0	0	0	0
Class 5	1	0	0	0
Class 6	0	0	0	0
Class 7	0	0	0	0
Class 8	0	0	0	0
Class 9	0	0	0	0
Class 10	0	0	0	0
Class 11	0	0	0	0
Class 12	0	0	0	0
Class 13	0	0	0	0

Pour chacune des classes, il faut définir la distribution du poids durant l'année. Comme on cherche à reproduire l'ÉCAS américain pour la classe 5, la charge de 18 000 livres est

sélectionnée et fixée à 100 % du trafic (Tableau 5.20). Toutes les autres charges (3 000 à 41 000 par bond de 1 000) sont fixées à 0 %.

Tableau 5.20 Distribution du trafic lourd en fonction du poids du camion durant l'année dans PvME

Month	Véhicule class	Véhicule weight (lbs)							Total
		3 000	...	17 000	18 000	19 000	...	41 000	
January	5	0	0	0	100	0	0	0	100
February	5	0	0	0	100	0	0	0	100
March	5	0	0	0	100	0	0	0	100
April	5	0	0	0	100	0	0	0	100
May	5	0	0	0	100	0	0	0	100
June	5	0	0	0	100	0	0	0	100
July	5	0	0	0	100	0	0	0	100
August	5	0	0	0	100	0	0	0	100
September	5	0	0	0	100	0	0	0	100
October	5	0	0	0	100	0	0	0	100
November	5	0	0	0	100	0	0	0	100
December	5	0	0	0	100	0	0	0	100

Le seul élément par rapport à la définition de l'ÉCAS américain qui n'est pas modifiable et qui doit être pris pour acquis est le rayon de la trace des roues (0,104 m). Effectivement, la distance entre les roues (0,343 m) et la pression dans les roues (0,587 MPa) sont directement modifiées (Tableau 5.16). La charge appliquée par roue (0,020 MN) est obtenue par la procédure présentée :

1. Fixer la distribution d'une classe à 100 % et des autres à 0 % (Tableau 5.17)
2. Fixer la distribution du trafic à travers l'année (Tableau 5.18)
3. Imposer un seul essieu simple à la classe sélectionnée (Tableau 5.19)
4. Fixer le poids de la classe à 18 000 livres (Tableau 5.20).

5.1.1.5 Risque

La gestion du risque est très différente entre le logiciel Alizé et PvME. Tel que mentionné à la section 5.1, les entreprises françaises maîtrisent le risque tel qu'il est présenté dans la méthode de dimensionnement française. Dans le cadre des exemples, la norme française NF P98-086,

qui propose des niveaux de risque en fonction de la classe de trafic, a été utilisée. Pour les structures #1 et #2, les niveaux de risques sont respectivement 2,0 % et 5,0 % (Tableau 5.21).

Tableau 5.21 Risque dans Alizé et OPECC – Volet 3

Structure	#1	#2
Moyenne journalière annuelle (MJA)	1 127,6	500,0
Classe de trafic	T0	T1
Risque (%) (NF P98-086)	2,0	5,0

Le risque sert au calcul du coefficient de calibration lié au risque (k_r) (Setra-LCPC, 1994):

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad (5.2)$$

Avec :

- k_r Coefficient de calibration lié au risque de calcul retenu
 u Variable centrée réduite associée au risque
 b Pente de la loi de fatigue du matériau (loi bi-logarithmique)
 δ Écart-type de la distribution de $\log(N_f)$ à la rupture

$$\delta = [SN_f^2 + (c^2/b^2)Sh^2]^{0.5} \quad (5.3)$$

Avec :

- SN_f Écart-type sur le $\log(N_f)$ à la rupture
 c Coefficient associant la variation de la déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée (0.02 cm^{-1})
 Sh Écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériaux mis en œuvre (cm)

De son côté, PvME gère le risque par la notion de fiabilité (fiabilité : $reliability = 1 - \text{risque}$). PvME gère le risque en appliquant une correction au FC_{Bottom} calculé (§1.4.3.2) : ajouter le nombre d'écart-types ($S_{e(\text{Alligator})}$) correspondant au taux de fiabilité (A. AASHTO, 2008):

$$FC_{P_i\% \text{ fiabilité}} = FC_{Bottom} + u S_{e(\text{Alligator})} \quad (5.4)$$

Avec :

FC _{P_i% fiabilité}	Pourcentage de fissuration par fatigue au taux de fiabilité i
FC _{Bottom}	Pourcentage de fissuration par fatigue à 50 % de fiabilité
u	Variable centrée réduite associée à la fiabilité

$$S_{e(\text{Alligator})} = 1.13 + \frac{13}{1 + e^{7.57 - 15.5 \log(FC_{Bottom} + 0.0001)}} \quad (5.5)$$

Ainsi, afin de considérer le risque de la même manière qu'Alizé dans PvME, la fiabilité est fixée à 50 % pour les deux exemples (Tableau 5.22). De cette manière, PvME n'applique aucune correction par rapport au risque. La limite est également fixée à 50 %, puisqu'un dommage unitaire ($D = 1$) correspond à une fissuration ($FC_{P_i\% \text{ fiabilité}}$) de 50 % de la voie (§1.4.3.2). Bref, le dimensionnement est bon suivant l'approche française (Alizé) lorsque le $FC_{P_i\% \text{ fiabilité}}$ atteint 50 % avec une fiabilité de 50%.

Tableau 5.22 Correspondances dans PvME pour considérer le risque d'Alizé – Volet 3

Performance Criteria	Limit (%)	Reliability (%)
AC bottom-up fatigue cracking (% lane area)	50	50

5.1.1.6 Coefficients de calibration

Dans Alizé, il y a trois coefficients de calibration. Le calcul du coefficient de calibration lié au risque de calcul retenu (k_r) est présenté à la section 5.1.1.5. Le Tableau 5.23 présente les k_r et les intrants nécessaires à leur calcul pour les deux structures. Ces intrants sont ceux des matériaux standards français (EME2 et GB3). Les coefficients de calibration liés au calage laboratoire-chantier (k_c) sont également ceux des matériaux standards français (Tableau 5.23). Finalement, en fonction du module de la couche non liée sous-jacente à l'enrobé de base, le coefficient de calibration lié à l'homogénéité du sol support (k_s) est choisi. Les k_c des deux structures sont également présentés dans le Tableau 5.23.

Tableau 5.23 Coefficients de calibration dans Alizé et OPECC – Volet 3

Structure		#1	#2	Provenance
Risque	risque (%)	2,0	5,0	NF P98-086 (Tableau B.7)
	u	-2,05	-1,64	
	b	-0,2	-0,2	
	δ	0,354	0,391	
	SN _f	0,25	0,30	
	c (cm ⁻¹)	0,02	0,02	
	Sh (cm)	2,5	2,5	
	k _r	0,716	0,744	
Calage	Enrobé de base	EME2	GB3	NF P98-086 (Tableaux D.7 et D.8)
	k _c	1,0	1,3	
Sol support	Module de la couche sous-jacente	120	100	NF P98-086 (Tableau C.2)
	k _s	1	1/1,065	

Les coefficients de calibration à entrer dans PvME pour produire le même calcul qu'Alizé sont présentés dans le Tableau 5.24. Au niveau de la fonction de transfert traduisant le cumul de dommage en taux de fissuration par fatigue (§1.4.3.2), les coefficients C₁ et C₂ sont fixés à 1 et le coefficient C₃ est fixé à 6000. Ainsi, un dommage unitaire (D = 1) correspondra à un FC_P_{i%} fiabilité de 50 %. Également, puisque le risque est fixé à 50% dans l'entrée des données dans PvME, la formule d'écart-type, telle qu'exprimée par l'équation (5.5), est laissée par défaut.

Au niveau de la loi de durée de vie en fatigue (N_{f-HMA}) (§1.4.3.2), il faut noter que PvME présente les coefficients k_{f1}, k_{f2} et k_{f3} comme étant les coefficients de calibration globaux et les coefficients β_{f1}, β_{f2} et β_{f3} comme étant les coefficients de calibration spécifiques au mélange. Classiquement, dans la littérature, c'est l'inverse. Ainsi, les coefficients k_{f1}, k_{f2} et k_{f3} sont, ici, considérés comme étant les coefficients de calibration spécifiques au mélange. Les coefficients β_{f1}, β_{f2} et β_{f3} sont, ici, considérés comme étant les coefficients de calibration globaux.

L'hypothèse posée ici est que les lois de durée de vie en fatigue d'Alizé, d'OPECC et de PvME sont égales. Ainsi, il devient possible d'établir les correspondances entre OPECC, Alizé et PvME (Figure 5.1).

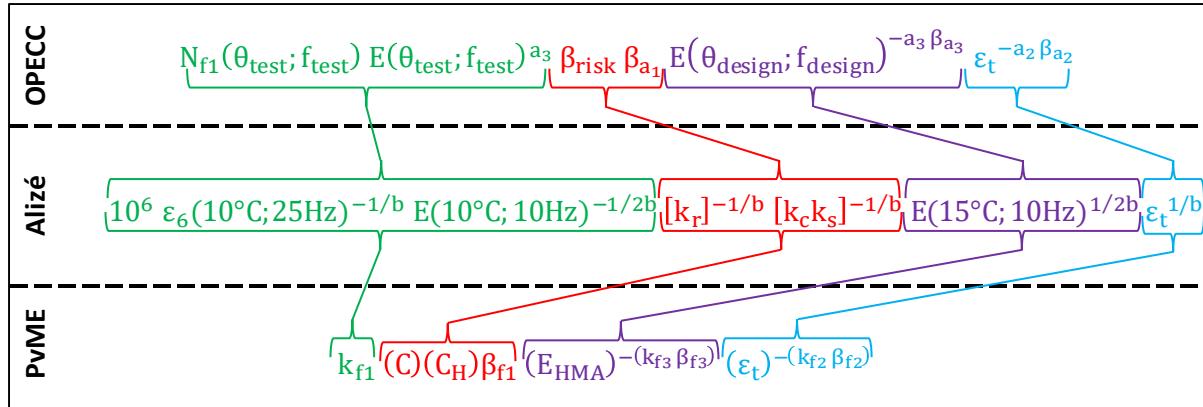


Figure 5.1 Correspondances entre les coefficients de calibration d'OPECC, d'Alizé et de PvME

Pour reproduire le calcul suivant Alizé dans PvME, il convient de se servir des coefficients globaux pour faire les correspondances. Pour annuler le fait qu'implicitement PvME réfère aux coefficients C et C_H dans le calcul de la durée de vie en fatigue et que ces derniers ne sont pas pris en compte dans Alizé, le premier coefficient de calibration global, β_{f1} , est déterminé suivant la relation suivante :

$$(C)(C_H)\beta_{f1} = [k_r]^{-1/b} [k_c k_s]^{-1/b} \quad (5.6)$$

De même, β_{f2} et β_{f3} sont fixés à 1 pour permettre la correspondance avec Alizé.

Le premier coefficient de calibration spécifique au mélange, k_{f1} , se calcule de la manière suivante :

$$k_{f1} = 10^6 \epsilon_6(10^\circ\text{C}; 25\text{Hz})^{-1/b} E(10^\circ\text{C}; 10\text{Hz})^{-1/2b} \quad (5.7)$$

k_{f2} se calcule comme suit :

$$k_{f2} = -1/b \quad (5.8)$$

k_{f3} se calcule comme suit :

$$k_{f3} = -1/2b \quad (5.9)$$

Tableau 5.24 Coefficients de calibration utilisés dans PvME afin d'évaluer l'évolution de la fissuration par fatigue de la chaussée (FC_P) en considérant l'approche du calcul de risque proposée par Alizé (Risque Alizé) – Volet 3

Paramètres		Structure	
Coefficients	PvME	#1	#2
Performance Criteria			
Limit (%)	50	50	50
Reliability (%)	50	50	50
AC Cracking - Bottom Up			
$S_{e(\text{Alligator})}$	Bottom up AC Cracking Standard Deviation $1,13 + \frac{13}{1 + e^{7,57 - 15,5 \log(FC_{\text{Bottom}} + 0,0001)}}$	13	
C_1	Bottom up AC Cracking C1	1	1
$C_2: H_{ac} < 5 \text{ in}$	Bottom up AC Cracking C2: $H_{ac} < 5 \text{ in}$	1	1
$C_2: 5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12 \text{ in}$	Bottom up AC Cracking C2: $5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12 \text{ in}$	1	1
$C_2: H_{ac} > 12 \text{ in}$	Bottom up AC Cracking C2: $H_{ac} > 12 \text{ in}$	1	1
C_3	Bottom up AC Cracking C3	6 000	6 000
AC Fatigue			
$\beta_{f1}: H_{ac} < 5 \text{ in}$	AC Fatigue BF1: $H_{ac} < 5 \text{ in}$	0,000382	0,002366
$\beta_{f1}: 5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12 \text{ in}$	AC Fatigue BF1: $5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12 \text{ in}$	0,000382	0,002366
$\beta_{f1}: H_{ac} > 12 \text{ in}$	AC Fatigue BF1: $> 12 \text{ in}$	0,000382	0,002366
β_{f2}	AC Fatigue BF2	1	1
β_{f3}	AC Fatigue BF3	1	1
k_{f1}	AC Fatigue K1	351,319964	23,012096
k_{f2}	AC Fatigue K2	5	5
k_{f3}	AC Fatigue K3	2,5	2,5

Une deuxième série de coefficients de calibration est déterminée pour calculer l'évolution de la fissuration suivant l'approche proposée PvME pour la gestion du risque. Dans ce cas, le niveau de fiabilité est alors ajusté suivant le risque considéré pour le dimensionnement, c'est-à-dire 98 % et 95 % pour les structures #1 et #2 respectivement. En conséquence, pour la

détermination du β_{f1} , on doit retirer le coefficient de calibration lié au risque de calcul retenu (k_r) d'Alizé tout en conservant k_c et k_s :

$$(C)(C_H)\beta_{f1} = [k_c k_s]^{-1/b} \quad (5.10)$$

Les autres coefficients de calibration (β_{f1} , β_{f1} , k_{f1} , k_{f2} et k_{f3}) demeurent les mêmes. Le Tableau 5.25 présente les coefficients de calibration à implanter dans PvME.

Tableau 5.25 Coefficients de calibration utilisés dans PvME afin d'évaluer l'évolution de la fissuration par fatigue de la chaussée (FC_P) en considérant l'approche du calcul de risque proposée par PvME (Risque PvME) – Volet 3

Paramètres		Structure	
Coefficients	PvME	#1	#2
Performance Criteria			
Limit (%)	50	50	
Reliability (%)	98	95	
AC Cracking - Bottom Up			
S_e (Alligator)	Bottom up AC Cracking Standard Deviation	13 $1,13 + \frac{1}{1 + e^{7,57 - 15,5 \log(FC_{Bottom} + 0,0001)}}$	
C_1	Bottom up AC Cracking C1	1	1
$C_2: H_{ac} < 5$ in	Bottom up AC Cracking C2: $H_{ac} < 5$ in	1	1
$C_2: 5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12$ in	Bottom up AC Cracking C2: $5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12$ in	1	1
$C_2: H_{ac} > 12$ in	Bottom up AC Cracking C2: $H_{ac} > 12$ in	1	1
C_3	Bottom up AC Cracking C3	6 000	6 000
AC Fatigue			
$\beta_{f1}: H_{ac} < 5$ in	AC Fatigue BF1: $H_{ac} < 5$ in	0,002031	0,010382
$\beta_{f1}: 5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12$ in	AC Fatigue BF1: $5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12$ in	0,002031	0,010382
$\beta_{f1}: H_{ac} > 12$ in	AC Fatigue BF1: > 12 in	0,002031	0,010382
β_{f2}	AC Fatigue BF2	1	1
β_{f3}	AC Fatigue BF3	1	1
k_{f1}	AC Fatigue K1	351,319964	23,012096
k_{f2}	AC Fatigue K2	5	5
k_{f3}	AC Fatigue K3	2,5	2,5

5.1.2 Dimensionnement – détermination de l'épaisseur de la couche de base

Tout d'abord, le dimensionnement des deux structures a été fait avec le logiciel Alizé. Le dimensionnement consiste à trouver l'épaisseur de l'enrobé de base, c'est-à-dire, l'EME2 et la GB3 pour la structure #1 et #2 respectivement. Dans Alizé, ces épaisseurs font correspondre le dommage à 1 ($D = 1$) à la fin de la prévision (nombre d'ÉCAS final atteint). La relation linéaire qu'Alizé propose pour l'évolution du dommage en fonction du nombre d'ÉCAS est bien visible dans la Figure 5.2 et la Figure 5.3. Par la suite, cette épaisseur est utilisée dans PvME, en considérant les coefficients de calibration déterminés dans le Tableau 5.24, pour valider que le FC_P final donne bien 50 % lorsque le risque est considéré comme dans Alizé. Enfin, cette épaisseur est utilisée dans PvME, avec les coefficients de calibration déterminés dans le Tableau 5.25, pour visualiser comment PvME considère le risque.

La Figure 5.2 présente, pour la structure #1, l'évolution du dommage selon le dimensionnement d'Alizé ($D = 1$), l'évolution de la fissuration par fatigue (FC_P) suivant PvME lorsque le risque est considéré comme dans Alizé ($FC_P = 48,20 \%$) et lorsqu'il est considéré comme PvME le propose ($FC_P = 42,02 \%$) et l'évolution de la fissuration par fatigue (FC_P) suivant OPECC lorsque le risque est considéré comme dans Alizé ($FC_P = 50,25 \%$) et lorsqu'il est considéré comme PvME le propose ($FC_P = 43,10 \%$)

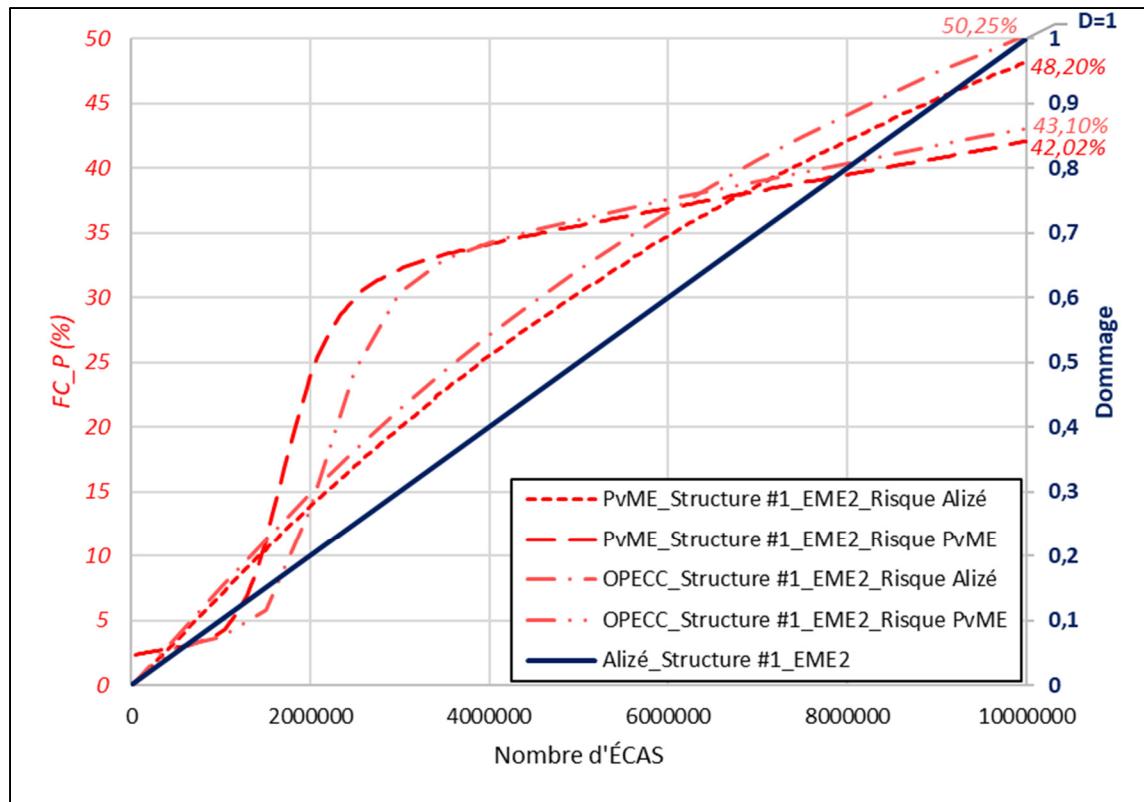


Figure 5.2 Évolution de la fissuration et du dommage de la structure #1

La Figure 5.3 présente, pour la structure #2, l'évolution du dommage selon le dimensionnement d'Alizé ($D = 1$), l'évolution de la fissuration par fatigue (FC_P) suivant PvME lorsque le risque est considéré comme dans Alizé ($FC_P = 47,00 \%$) et lorsqu'il est considéré comme PvME le propose ($FC_P = 38,54 \%$) et l'évolution de la fissuration par fatigue (FC_P) suivant OPECC lorsque le risque est considéré comme dans Alizé ($FC_P = 49,83 \%$) et lorsqu'il est considéré comme PvME le propose ($FC_P = 39,49 \%$)

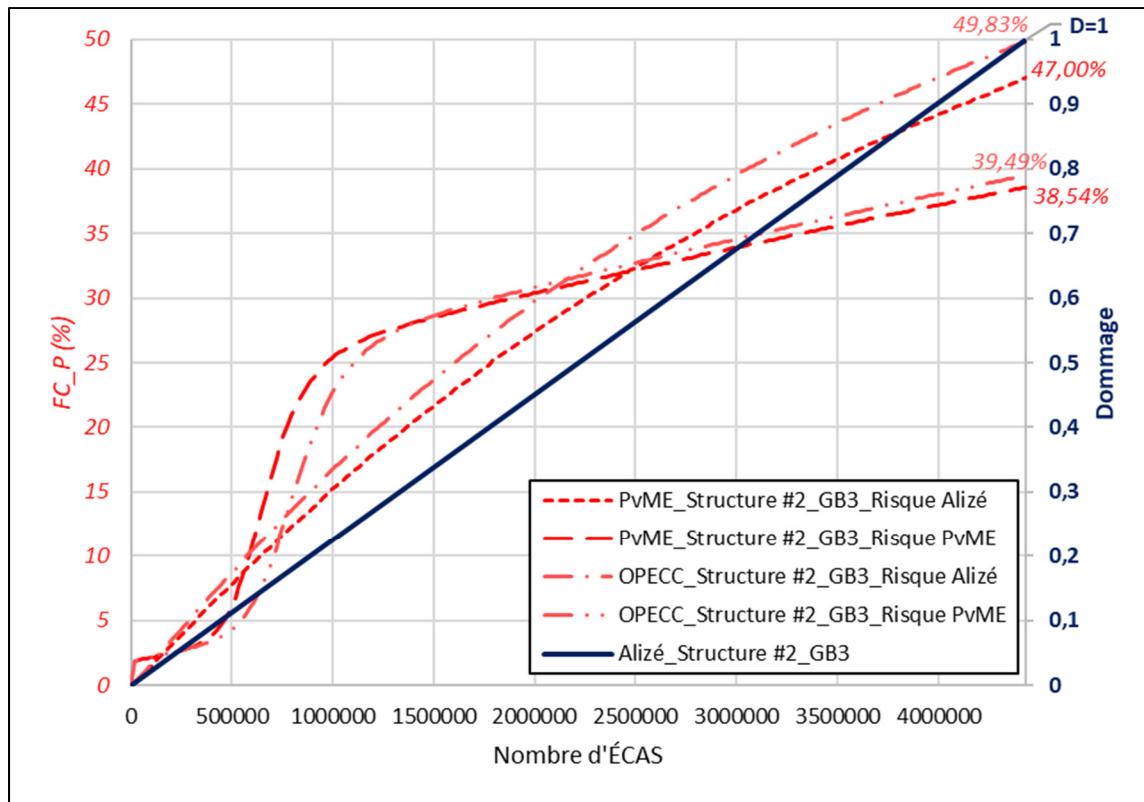


Figure 5.3 Évolution de la fissuration et du dommage de la structure #2

Le Tableau 5.26 fait le récapitulatif des dimensionnements faits lors du volet 3. On y retrouve, pour le dimensionnement Alizé, le taux de risque, la déformation horizontale admissible en traction ($\varepsilon_{t \text{ adm}}$) et l'épaisseur de l'enrobé de base. Pour le taux de fissuration final de PvME lorsque le risque Alizé est considéré (PvME – Risque Alizé), on retrouve le niveau de fiabilité, le coefficient de calibration global β_{fl} tenant compte du k_r d'Alizé, l'épaisseur déterminée par le dimensionnement Alizé exprimée en pouces, le FC_P correspondant et l'épaisseur de l'enrobé de base pour que le FC_P atteigne 50 %. Pour le taux de fissuration final de PvME lorsque le risque PvME est considéré (PvME – Risque PvME), on retrouve le niveau de fiabilité, le coefficient de calibration global β_{fl} excluant le k_r d'Alizé, l'épaisseur déterminée par le dimensionnement Alizé exprimée en pouces, le FC_P correspondant et l'épaisseur de l'enrobé de base pour que le FC_P atteigne 50 %.

Tableau 5.26 Récapitulatif des dimensionnements avec Alizé et PvME – Volet 3

Structure	#1	#2
Enrobé de base	EME2	GB3
Alizé		
Risque (%)	2,0	5,0
$\epsilon_{t \text{ adm}} (\mu\text{m}/\text{m})$	64,6	69,7
Épaisseur de l'enrobé de base (mm) [po]	107,007 [4,2129]	149,755 [5,8959]
PvME - Risque Alizé		
Fiabilité (%)	50,0	50,0
β_{f1}	0,000382	0,002366
Épaisseur de l'enrobé de base déterminé avec Alizé (po)	4,2129	5,8959
FC_P (%)	48,20	47,00
Épaisseur pour que FC_P = 50% (po) [mm]	4,1455 [105,296]	5,7655 [146,444]
PvME - Risque PvME		
Fiabilité (%)	98,0	95,0
β_{f1}	0,002031	0,010382
Épaisseur de l'enrobé de base déterminé avec Alizé (po)	4,2129	5,8959
FC_P (%)	42,02	38,54
Épaisseur pour que FC_P = 50% (po) [mm]	3,6955 [93,866]	5,1455 [130,696]

5.1.3 Analyse des résultats

Pour la structure #1, avec un risque de 2 %, le dimensionnement Alizé mène à une épaisseur de 107 mm d'EME2. Il faut rappeler que le dimensionnement est optimisé lorsque le dommage unitaire ($D = 1$) est atteint. Effectivement, Alizé ne vérifie qu'en un seul point le dimensionnement, c'est-à-dire au nombre d'ÉCAS final. L'évolution du dommage est linéaire en fonction du nombre d'ÉCAS (Figure 5.2). En considérant le risque comme Alizé (intrants du Tableau 5.24), PvME prédit un taux de fissuration final de 48,2 % pour une épaisseur de 107 mm d'EME2. Ce dernier est très près d'une valeur de 50,0 %, qui correspondrait à un dommage unitaire ($D = 1$). Pour atteindre ce dommage, il aurait fallu une épaisseur de 105 mm. En termes de dimensionnement de chaussée, un écart de prédiction de 2 mm est

négligeable. De plus, ayant rapproché au maximum PvME d'Alizé, l'allure de l'évolution de la fissuration est très près de celle d'une droite. En considérant le risque comme PvME le propose (intrants du Tableau 5.25), on remarque que le taux de fissuration suit une fonction sigmoïdale et atteint une valeur finale de 42,0 % pour une épaisseur de 107 mm d'EME2. Pour atteindre un taux de fissuration de 50,0 %, il aurait fallu une épaisseur de 94 mm d'EME2.

Pour la structure #2, avec un risque de 5 %, le dimensionnement Alizé mène à une épaisseur de 150 mm de GB3. Un dommage unitaire ($D = 1$) est atteint (Figure 5.3). En considérant le risque comme Alizé (intrants du Tableau 5.24), PvME prédit un taux de fissuration final de 47,0 % pour une épaisseur de 150 mm de GB3. Ce dernier est très près d'une valeur de 50,0 %, qui correspondrait à un dommage unitaire ($D = 1$). Pour atteindre ce dommage, il aurait fallu une épaisseur de 146 mm. En termes de dimensionnement de chaussée, un écart de prédiction de 4 mm est négligeable. De plus, ayant rapproché au maximum PvME d'Alizé, l'allure de l'évolution de la fissuration est très près de celle d'une droite. En considérant le risque comme PvME le propose (intrants du Tableau 5.25), on remarque que le taux de fissuration suit une fonction sigmoïdale et atteint une valeur finale de 38,5 % pour une épaisseur de 150 mm de GB3. Pour atteindre un taux de fissuration de 50,0 %, il aurait fallu une épaisseur de 130 mm de GB3.

L'allure quasi-linéaire de l'évolution du taux de fissuration de PvME lorsque le risque est considéré comme celui d'Alizé, se rapprochant beaucoup de l'allure de l'évolution du dommage dans Alizé, et l'écart minime qui existe entre les dimensionnements obtenus avec les deux logiciels (107 mm vs 105 mm pour la structure #1 et 150 mm vs 146 mm pour la structure #2) semblent valider la prémissse du volet 3 : «Pour les mêmes intrants, des logiciels ayant des lois et/ou modèles similaires de calcul de contraintes et de déformations (Burmister), d'endommagement par fatigue (Wöhler) et de cumul des dommages (Miner) doivent mener au même dimensionnement».

En outre, les écarts de dimensionnement (2 mm d'écart pour la structure #1 et 4 mm d'écart pour la structure #2) sont bien en deçà de l'écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériaux mis en œuvre ($Sh = 25$ mm)(Setra-LCPC, 1994).

D'un autre côté, l'allure très différente des courbes d'évolution du taux de fissuration selon que le risque soit considéré comme dans Alizé (quasi-linéaire) ou dans PvME (sigmoïdale) met en évidence que le risque d'Alizé n'est pas considéré de la même manière que la fiabilité de PvME. L'écart entre les dimensionnements PvME considérant le risque selon Alizé ou PvME (105 mm vs 94 mm pour la structure #1 et 146 mm vs 131 mm pour la structure #2) appuie cette conclusion. Une étude plus approfondie de la considération du risque dans chacun des logiciels est nécessaire.

De son côté, OPECC mène aux mêmes dimensionnements qu'Alizé. Il devient donc un outil supplémentaire permettant l'application de la méthode française de dimensionnement. De plus, OPECC produit simultanément l'évolution de la fissuration suivant la gestion du risque selon PvME. Celle-ci suit la même forme sigmoïdale que l'évolution de la fissuration de PvME. Toutefois, la superposition des courbes n'est pas parfaite. Il y a un décalage de la partie centrale, partie de forte croissance, de la courbe sigmoïdale. Ainsi, dans cette partie, d'importants écarts quant au taux de fissuration sont observables. Prenons l'exemple de la Figure 5.2. À 200 000 ÉCAS, OPECC prédit un FC_P de 14% et PvME prédit un FC_P de 24%. Cet écart n'est pas négligeable. Néanmoins, en fin de simulation, il y a une bonne précision quant aux taux de fissuration. Dans le cadre des deux exemples, les écarts de FC_P en fin de simulation sont respectivement 1,08 % et 0,95 % pour les structures #1 et #2. En somme, OPECC est un outil intéressant pour produire simultanément le dimensionnement selon la méthode française tout en simulant l'évolution de la fissuration par fatigue (FC_P) suivant PvME lorsque le risque est considéré comme PvME le propose.

5.2 Comparaison des dimensionnements d'Alizé-LCPC et d'AASHTOWare Pavement ME Design incorporant l'EME-14

Ayant maintenant une meilleure compréhension et une plus grande confiance envers PvME, il convient de comparer l'utilisation en parallèle des deux logiciels. C'est-à-dire, comparer les dimensionnements obtenus avec Alizé et PvME pour une structure incorporant l'EME-14 étudié dans le cadre de ce mémoire ou une GB3 en couche de base tout en respectant les méthodes de dimensionnement respectives à chacun des logiciels utilisés. Ceci permet, dans un premier temps, d'évaluer l'écart d'épaisseur entre les deux logiciels pour un même matériau (EME-14 ou GB3) et, dans un deuxième temps, d'évaluer l'économie d'épaisseur qu'amène l'EME-14 par rapport à la GB3 dans chacun des logiciels.

5.2.1 Intrants identiques dans Alizé et PvME

La grande majorité des intrants doivent être identiques d'un logiciel à l'autre. Effectivement, ce sont les écarts liés aux méthodes de dimensionnement que l'on veut mettre en évidence. Ainsi, le choix des matériaux, les propriétés des matériaux autres que la couche de base, le trafic, la durée, la fréquence et la température équivalente sont les mêmes dans Alizé et PvME (§2.3.4). Ces intrants sont présentés plus en détail dans les sections qui suivent (§5.2.1.1 à §5.2.1.2).

5.2.1.1 Définition de la structure

Le Tableau 5.27 présente la structure choisie, soit les matériaux, les épaisseurs et le type d'interface entre chacune des couches dans le logiciel Alizé et leurs correspondances dans PvME. L'enrobé en couche de base est soit l'EME-14 ou la GB3. La section 5.1.1.1 présente davantage de détails et d'explications.

Tableau 5.27 Définition des structures:
matériaux, épaisseurs et interface – Volet 4

Matériaux	Alizé		PvME	
	Ép. (mm)	Interface	Ép. (po)	Interface
BBSG3	70	collée	2,76	full friction
EME-14 ou GB3	à dét.	collée	à dét.	full friction
MG1	250	collée	9,84	full friction
MG2	250	collée	9,84	full friction
Infra	∞	NA	∞	NA

5.2.1.2 Fréquence et température équivalente

Au niveau d’Alizé, la température équivalente et la fréquence sont respectivement 15°C et 10 Hz (Tableau 5.2). Pour PvME, les intrants de température sont présentés dans le Tableau 5.3 et le Tableau 5.4 (§5.1.1.2).

5.2.1.3 Propriétés des matériaux autres que la résistance à la fatigue de l’EME-14

Pour Alizé, le Tableau 5.28 présente les modules dynamiques et les coefficients de Poisson, à 15°C et 10 Hz, de l’enrobé de surface, des matériaux granulaires et de l’infra pour la structure.

Tableau 5.28 Propriétés des matériaux
granulaires et de surface
dans Alizé – Volet 4

Matériaux	$ E^* (15^\circ\text{C}; 10\text{Hz})$ (MPa)	ν
BBSG3	7 000	0,35
MG1	360	0,35
MG2	150	0,35
Infra	50	0,35

Pour les enrobés de base, les modules dynamiques à 10 Hz pour 15 et 10°C, les coefficients de Poisson, les ϵ_6 , les $-1/b$, les Sh et les SN_f sont présentés dans le Tableau 5.29. Pour l’EME-14,

les modules complexes proviennent d'essais en laboratoire en traction-compression directe (TCD) sur éprouvettes cylindriques et la loi de fatigue provient d'essais en flexion 2 points (2PB) sur éprouvettes trapézoïdales (NF P 98-818-24). Les caractéristiques de la GB3 sont prises de la bibliothèque des matériaux d'Alizé.

Tableau 5.29 Propriétés des matériaux bitumineux en couche de base dans Alizé – Volet 4

Matériaux bitumineux en couche de base	EME-14	GB3
$ E^* (15^\circ\text{C}; 10\text{Hz}) (\text{MPa})$	13 516	9 000
$ E^* (10^\circ\text{C}; 10\text{Hz}) (\text{MPa})$	16 399	11 880
ν	0,35	0,35
$\epsilon_6 (10^\circ\text{C}; 25\text{Hz}) \text{ en 2PB } (\mu\text{m/m})$	191 ⁽¹⁾	90 ⁽²⁾
$a_2 (-1/b)$	8,55	5,00
$Sh (\text{m})$	0,025	0,025
SN_f	0,62	0,30
⁽¹⁾ $N_{f1} (\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) = 10^6 \cdot \epsilon_6^{a_2} = 1,6367 \cdot 10^{-26}$		
⁽²⁾ $N_{f1} (\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) = 5,9049 \cdot 10^{-15}$		

Pour PvME, les intrants pour les propriétés des matériaux bitumineux sont présentés dans le Tableau 5.30, le Tableau 5.31 et le Tableau 5.32. La section 5.1.1.3 présente plus en détail ces éléments.

Tableau 5.30 Propriétés des matériaux bitumineux dans PvME – Volet 4

Matériaux bitumineux	BBSG3	EME-14	GB3
Asphalt Layer			
Thickness (in)	2,76	à dét.	à dét.
Mixture Volumetrics			
Air voids (%)	4,5	3,0	4,5
Effective binder content (%)	12,20	9,04	10,20
Poisson's ratio	0,35	0,35	0,35
Unit weight (pcf)	157,256	160,315	159,379
Mechanical Properties			
Asphalt binder	Level 1	Level 1	Level 1
Creep compliance	Level 3	Level 3	Level 3
Dynamic modulus	Level 1	Level 1	Level 1
Select HMA E* predictive model	Use viscosity based model (nationally calibrated)		
Reference temperature (°F)	70	70	70
Indirect tensile strength at 14°F (psi)	Level 3	Level 3	Level 3
Thermal			
Heat capacity (BTU/IB-°F)	0,23	0,23	0,23
Thermal conductivity (BTU/hr-ft-°F)	0,67	0,67	0,67
Thermal contraction	1,185E-05	9,011E-06	1,063E-05

Tableau 5.31 Propriétés mécaniques des bitumes (*Level 1*) dans PvME – Volet 4

Matériaux	Grade du bitume	Temperature (°F)	Binder G* (Pa)	Phase angle (°)
BBSG3	PG 58-28	136,40	2 806	82,39
		141,08	2 185	83,31
		147,20	1 363	84,52
EME-14	PG 88-28	168,80	8 040	40,80
		179,60	5 460	40,70
		217,09	1 438	40,70
GB3	PG 64-28	147,20	4 046	75,09
		157,28	2 150	77,72
		158,00	2 022	77,91

Tableau 5.32 Module complexe des enrobés bitumineux
(*Level 1*) dans PvME – Volet 4

Matériaux	Temperature (°F)	E* (psi)				
		0,1	0,3	1	3	10
BBSG3	-4	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	14	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	32	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	50	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	68	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	86	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	104	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	130	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264	1 015 264
	Temperature (°F)					
EME-14	-4	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330
	14	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330
	32	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330
	50	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330
	68	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330
	86	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330
	104	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330
	130	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330	1 960 330
	Temperature (°F)					
GB3	-4	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	14	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	32	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	50	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	68	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	86	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	104	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340
	130	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340	1 305 340

Les intrants pour les propriétés des matériaux granulaires sont présentés dans le Tableau 5.33. Au niveau de la granulométrie et des autres propriétés d'ingénierie, des intrants supplémentaires sont nécessaires (Tableau 5.11). La section 5.1.1.3 présente plus en détail ces éléments.

Tableau 5.33 Propriétés des matériaux granulaires dans PvME – Volet 4

Matériaux granulaires	MG1	MG2	Infra
Unbound			
Coefficient of lateral earth pressure	0,5	0,5	0,5
Layer thickness (in)	9,84	9,84	Semi-infinite
Poisson's ratio	0,35	0,35	0,35
Modulus			
Resilient modulus (psi)	52 214	21 756	7 252
Sieve			
Gradation & other engineering properties	A-1-a	A-1-a	A-1-a

5.2.1.4 Trafic et durée

Le Tableau 5.34 présente les intrants Alizé de trafic et de durée pour l'exemple du volet 4. L'ÉCAS américain a été sélectionné. Le Tableau 5.13 présente ses caractéristiques : la distance entre les roues, la charge appliquée par roue, le rayon de la trace des roues et la pression dans les roues.

Tableau 5.34 Paramètres de trafic et de durée dans Alizé – Volet 4

Moyenne journalière annuelle (MJA)	17 500
Classe de trafic	TEX
Taux d'accroissement géométrique (%)	2
Durée de service (années)	20
Trafic cumulé (nb. de passages)	1,5520E+08
CAM	1
Trafic cumulé (ÉCAS américain)	1,5520E+08

Les intrants de durée de service de PvME sont les mêmes que ceux présentés au Tableau 5.15. De son côté, le Tableau 5.35 présente les intrants PvME de trafic pour l'exemple du volet 4. Pour produire un trafic cumulé en nombre d'ÉCAS, il faut ajuster les intrants de trafic tel que le présente le Tableau 5.17, le Tableau 5.18, le Tableau 5.19 et le Tableau 5.20 (§5.1.1.4).

Tableau 5.35 Paramètres du trafic et définition de l'ÉCAS américain dans PvME – Volet 4

Average annual daily truck traffic (AADTT)	
Two-way AADTT	42 491,28
Number of lanes	1
% of trucks in design direction	50
% of trucks in design lane	100
Operational speed (mph)	62,14
Traffic capacity	
Traffic capacity cap	Not enforced
Axle configuration	
Average axle width (ft)	8,5
Dual tire spacing (in)	13,5
Tire pressure (psi)	85,14
Tandem axle spacing (in)	51,6
Tridem axle spacing (in)	49,2
Quad axle spacing (in)	49,2
Lateral wander	
Design lane width (ft)	12
Mean wheel location (in)	18
Traffic wander standard deviation (in)	0
Wheelbase	
Average spacing of long axles (ft)	18
Average spacing of medium axles (ft)	15
Average spacing of short axles (ft)	12
% of trucks with long axles	0
% of trucks with medium axles	0
% of trucks with short axles	100

5.2.2 Intrants spécifiques à Alizé

Les différences entre les deux méthodes de dimensionnement signifient que certains intrants sont exclusifs à la méthode française. Les intrants spécifiques à Alizé sont présentés dans les sections suivantes (§5.2.2.1 et §5.2.2.2).

5.2.2.1 Risque

La classe de trafic correspondant à une moyenne journalière annuelle de 17 500 est TEX. La norme française NF P98-086 suggère un niveau de risque de 1,0 % (Tableau 5.36).

Tableau 5.36 Risque dans Alizé – Volet 4

Moyenne journalière annuelle (MJA)	17 500
Classe de trafic	TEX
Risque (%) (NF P98-086)	1,0

5.2.2.2 Coefficients de calibration

Le Tableau 5.37 présente les coefficients de calibration dans Alizé pour l'EME-14 et la GB3. Au niveau du k_r de l'EME-14, le b et le SN_f proviennent directement de la loi de fatigue établie en laboratoire. Le k_c de l'EME-14 a été fixé à 1,0 puisque c'est un matériau se rapprochant de l'EME2 et qu'il est préférable de ne pas bonifier un matériau dont le k_c n'est pas connu. Pour la GB3, les intrants nécessaires au calcul du k_r sont ceux du matériau standard français. Le k_c de la GB3 est également standard (1,3). Pour les k_s , puisque le module du MG1 correspond à 360 MPa, ceux-ci ont une valeur de 1,0.

Tableau 5.37 Coefficients de calibration dans Alizé – Volet 4

Matériaux		EME-14	GB3	Provenance
Risque	risque (%)	1,0	1,0	NF P98-086 (Tableau B.7)
	u	-2,33	-2,33	
	b	-0,117	-0,200	
	δ	0,753	0,391	
	SN_f	0,62	0,30	
	$c (cm^{-1})$	0,02	0,02	
	$Sh (cm)$	2,5	2,5	
	k_r	0,624	0,658	
Calage	k_c	1,0	1,3	NF P98-086 (Tableau D.7)
Sol support	Module de la couche sous-jacente	360	360	NF P98-086 (Tableau C.2)
	k_s	1	1	

5.2.3 Intrants spécifiques à PvME

Les différences entre les deux méthodes de dimensionnement signifient que certains intrants sont exclusifs à la méthode américaine. Les intrants spécifiques à PvME sont présentés dans les sections suivantes (§5.2.3.1 et §5.2.3.2).

5.2.3.1 Risque

Le volume de trafic (AADTT) correspond à une autoroute inter-États urbaine (Urban Intersate)(Federal Highway Administration, 2013). Pour cette classe de route, le guide PvME (*MEPD Guide*) (A. AASHTO, 2008) propose un niveau de fiabilité de 95 % et un taux limite de fissuration de 10 % (Tableau 5.38).

Tableau 5.38 Risque dans PvME – Volet 4

Performance Criteria	Limit (%)	Reliability (%)
AC bottom-up fatigue cracking (% lane area)	10	95

5.2.3.2 Coefficients de calibration globaux et spécifiques au mélange

Il a été choisi de laisser les coefficients de calibration globaux et spécifiques au mélange à leur valeur par défaut, qui correspond à la calibration nationale de PvME. Le Tableau 5.39 présente ces coefficients. Ce choix a été fait puisque, dans la majorité des cas, les ministères des transports des différentes provinces et les départements des transports des différents États américains (DOT, *Department of Transportation*) imposeront ces coefficients de calibration. Bien évidemment, PvME se retrouve alors figé du point de vue de la loi de fatigue des matériaux, puisque c'est à travers ces coefficients que celle-ci est modifiable (§1.4.3.2). De cette manière, seul l'impact des modules aura un effet sur le dimensionnement.

Tableau 5.39 Coefficients de calibration dans PvME – Volet 4

Paramètres		Matériaux	
Coefficients	PvME	EME-14	GB3
Performance Criteria			
Limit (%)		10	
Reliability (%)		95	
AC Cracking - Bottom Up			
$S_{e(\text{Alligator})}$	Bottom up AC Cracking Standard Deviation	$1,13 + \frac{13}{1 + e^{7,57 - 15,5 \log(FC_{\text{Bottom}} + 0,0001)}}$	
C_1	Bottom up AC Cracking C1	1,31	
$C_2: H_{ac} < 5 \text{ in}$	Bottom up AC Cracking C2: $H_{ac} < 5 \text{ in}$	2,1585	
$C_2: 5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12 \text{ in}$	Bottom up AC Cracking C2: $5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12 \text{ in}$	0,867 + 0,2583 H_{ac}	
$C_2: H_{ac} > 12 \text{ in}$	Bottom up AC Cracking C2: $H_{ac} > 12 \text{ in}$	3,9666	
C_3	Bottom up AC Cracking C3	6 000	
AC Fatigue			
$\beta_{f1}: H_{ac} < 5 \text{ in}$	AC Fatigue BF1: $H_{ac} < 5 \text{ in}$	0,02054	
$\beta_{f1}: 5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12 \text{ in}$	AC Fatigue BF1: $5 \text{ in} \leq H_{ac} \leq 12 \text{ in}$	5,014 $H_{ac}^{-3,416}$	
$\beta_{f1}: H_{ac} > 12 \text{ in}$	AC Fatigue BF1: $> 12 \text{ in}$	0,001032	
β_{f2}	AC Fatigue BF2	1,38	
β_{f3}	AC Fatigue BF3	0,88	
k_{f1}	AC Fatigue K1	3,75	
k_{f2}	AC Fatigue K2	2,87	
k_{f3}	AC Fatigue K3	1,46	

5.2.4 Dimensionnement – détermination de l'épaisseur de la couche de base

Le dimensionnement des structures consiste à déterminer l'épaisseur de la couche de base en fonction du matériau de celle-ci, soit l'EME-14 ou la GB3. Le Tableau 5.40 fait le récapitulatif des dimensionnements faits lors du volet 4. On y retrouve, pour les dimensionnements Alizé, le taux de risque, la déformation horizontale admissible en traction ($\epsilon_{t \text{ adm}}$) et l'épaisseur de l'enrobé de base. Pour PvME, on rappelle le taux de fissuration limite, le niveau de fiabilité et l'épaisseur de l'enrobé de base.

Tableau 5.40 Récapitulatif des dimensionnements avec Alizé et PvME – Volet 4

Enrobé de base	EME-14	GB3
Alizé		
Risque (%)	1,0	1,0
$\varepsilon_{t \text{ adm}} (\mu\text{m}/\text{m})$	72,8	32,2
Épaisseur de l'enrobé de base (mm) [po]	74,4 [2,9]	256,8 [10,1]
PvME - Risque PvME		
Limite (%)	10,0	10,0
Fiabilité (%)	95,0	95,0
Épaisseur de l'enrobé de base (mm) [po]	82,8 [3,3]	237,4 [9,3]

5.2.5 Analyse des résultats

Dans les présents exemples, il est intéressant de rappeler qu'Alizé tient compte du module complexe et des lois de fatigue respectives des enrobés de base (EME-14 et GB3) lors du dimensionnement. Ainsi, les performances supérieures en termes de module et de résistance à la fatigue de l'EME-14 l'avantageant grandement par rapport à la GB3. Effectivement, l'utilisation de l'EME-14, contrairement à la GB3, mène à une réduction de 70,8 % de l'épaisseur de la couche de base. L'épaisseur de la couche de base passe de 257 mm pour la GB3 à 75 mm pour l'EME-14 (Tableau 5.41).

Tableau 5.41 Écarts d'épaisseur entre Alizé et PvME et gains sur l'épaisseur de l'EME-14

Logiciel	Épaisseur de la couche de base (mm)		Gain d'épaisseur avec l'EME-14 (mm)	Gain relatif d'épaisseur avec l'EME-14 (%) ($\frac{\text{Ep}_{\text{EME-14}} - \text{Ep}_{\text{GB3}}}{\text{Ep}_{\text{GB3}}} \times 100$ %)
	EME-14	GB3		
Alizé	75	257	-182	-70,8
PvME	83	238	-155	-65,1
Écart Alizé - PvME (mm)	8	-19		
Écart relatif Alizé - PvME (%) ($\frac{\text{Ep}_{\text{PvME}} - \text{Ep}_{\text{Alizé}}}{\text{Ep}_{\text{Alizé}}} \times 100$)	10,7	-7,4		

Du côté de PvME, les coefficients de calibration globaux et spécifiques au mélange ont été laissés à leur valeur par défaut pour le calcul de la durée de vie (§1.4.3.2 et Tableau 5.39).

Ainsi, seules les performances supérieures en termes de module complexe de l'EME-14 le distinguent de la GB3. Néanmoins, ces performances de module complexe ont un impact significatif sur l'épaisseur de la couche de base. En effet, l'utilisation de l'EME-14, contrairement à la GB3, mène à une réduction de 65,1 % de l'épaisseur de la couche de base. L'épaisseur de la couche de base passe de 238 mm pour la GB3 à 83 mm pour l'EME-14 (Tableau 5.41).

En termes de réduction d'épaisseur, Alizé et PvME permettent respectivement une réduction d'épaisseur de la couche de base de 182 mm (70,8 %) et de 155 mm (65,1 %) lorsque l'EME-14 est employé. Ainsi, la prise en compte exclusive des performances de module complexe dans PvME est suffisante pour expliquer une réduction d'épaisseur dans le même ordre de grandeur qu'Alizé, qui tient compte des performances de module complexe et de résistance à la fatigue.

Pour Alizé, une couche de 75 mm d'EME-14 est nécessaire. Pour PvME, une couche de 83 mm d'EME-14 est nécessaire. PvME propose une épaisseur plus épaisse de 8 mm, soit un écart relatif de +10,7 %. Pour Alizé, une couche de 257 mm de GB3 est nécessaire. Pour PvME, une couche de 238 mm de GB3 est nécessaire. PvME propose une épaisseur plus mince de 19 mm, soit un écart relatif de -7,4 %. Il est primordial de mentionner que l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la couche de base demeure le même d'un logiciel à l'autre. Étant dans ce même ordre de grandeur pour les deux types d'enrobés, une solution simple, lorsqu'il est nécessaire de présenter différentes options avec PvME à un client, serait de dimensionner les structures avec Alizé et PvME pour chacun des enrobés et de sélectionner les épaisseurs les plus restrictives. De cette manière, les dimensionnements sont bons dans chacun des logiciels. Dans le présent exemple, on proposerait au client la pose de 257 mm de GB3 (Alizé) ou de 83 mm d'EME-14 (PvME).

CONCLUSION

L'amélioration de l'état du réseau routier ne semble possible que par une augmentation des investissements et/ou l'utilisation de matériaux routiers plus performants. Au niveau matériaux, une piste de solution serait l'intégration de l'EME au sein des structures de chaussée. La démonstration de la valeur ajoutée de l'EME-14 par rapport aux enrobés de base standards s'appuie sur ses caractéristiques thermomécaniques supérieures et des méthodes de dimensionnement mécaniste empirique.

Au volet 1, l'EME-14 est formulé, validé et caractérisé. L'EME-14 présente une aptitude au compactage satisfaisante grâce à son squelette granulaire dense et continu qui facilite sa mise en place. Bien que l'essai d'orniérage n'ait pas été réalisé sur la formule étudiée, la résistance à l'orniérage de la formule d'EME-14 de référence, sur laquelle la présente formulation est basée, est excellente. Au niveau de la résistance au retrait thermique empêché (TSRST), l'EME-14 respecte la logique et rupture sous la température basse du bitume ($\leq -28^{\circ}\text{C}$). Du côté du module complexe (E^*), l'EME-14 présente des modules dynamiques nettement plus élevés qu'une GB-20 ou un ESG-14. Même chose pour ce qui est de sa résistance à la fatigue. L'EME-14 présente une résistance à la fatigue de loin supérieure à celle d'enrobés de base standards. Bref, d'un point de vue des propriétés mécaniques comme la résistance à l'orniérage, la rigidité (E^*) et la résistance à la fatigue, l'EME-14 déclasse les enrobés de base standards. Du côté de sa mise en place et de sa résistance au retrait thermique empêché, l'EME-14 est au moins aussi performant que les enrobés de base standards. Bien entendu, des essais supplémentaires pourraient être faits pour étoffer la caractérisation mécanique en commençant par la réalisation de l'essai d'orniérage.

Puisque chacune des méthodes de dimensionnement ME fait référence à un essai de fatigue bien précis (2PB, 4PB ou TCD) et que ces résultats de résistance à la fatigue ont un impact important sur les dimensionnements, il est nécessaire d'explorer l'influence du type de sollicitation et de la fréquence sur la résistance à la fatigue de l'EME-14. Tout d'abord, quant au type de sollicitation, les durées de vie en fatigue sont les mêmes pour une amplitude donnée

(ε_0 ou $\varepsilon_0^{pk-pk}/2$) que le signal de déformation soit de type sine ou haversine. Effectivement, dans le cas d'un signal de déformation haversine, la viscosité de l'enrobé fait en sorte que le signal de contrainte subit une relaxation menant à son recentrage autour de zéro. Ainsi, c'est la définition de l'amplitude de la déformation imposée qui devient très importante. La Figure 2.4 présente clairement la correspondance qui existe entre les ε_0 et les ε_0^{pk-pk} pour un signal de type sine et haversine. Du côté de la fréquence, une réduction de la fréquence mène à une augmentation de la durée de vie en fatigue de l'EME-14. Cette réduction mène également à une augmentation non négligeable de la pente. Il faut noter que l'étude de l'influence du type de sollicitation et de la fréquence sur la résistance à la fatigue de l'EME-14 n'a été faite que selon l'essai de traction-compression directe. Il pourrait être intéressant d'explorer ces mêmes influences pour l'essai en flexion 2 points et 4 points.

Pour bien illustrer la valeur ajoutée de l'EME-14 en s'appuyant sur la méthode américaine (PvME) et française (Alizé) de dimensionnement ME, il faut, avant tout, comprendre et faire des liens entre ces deux méthodes. Les correspondances établies et validées ne touchent qu'un seul mode de dégradation des chaussées : la fissuration par fatigue de type *Bottom-Up Fatigue Cracking*. Le volet 3 a tenté de répondre à la prémissse suivante : pour les mêmes intrants, ces deux logiciels (Alizé et PvME) ayant des lois et/ou modèles similaires de calcul de contraintes et de déformations (Burmister), d'endommagement par fatigue (Wöhler) et de cumul des dommages (Miner) mènent au même dimensionnement (§2.3.3). C'est par l'entremise de deux exemples de dimensionnement que les correspondances entre les intrants du logiciel Alizé et PvME ont été établies. Les correspondances quant aux structures, à la fréquence et la température équivalente demeurent relativement simples. C'est plutôt au niveau des propriétés des matériaux, du trafic et de la durée que l'ampleur et la complexité du logiciel PvME compliquent la tâche. Enfin, des différences importantes existent entre les deux logiciels quant à la considération du risque, obligeant une manipulation des coefficients de calibration de PvME pour bien faire correspondre le risque de PvME à celui d'Alizé. Malgré tout, l'ensemble des correspondances permet aux deux logiciels de fournir des dimensionnements très similaires, à quelques millimètres près. L'évolution du dommage d'Alizé et du taux de fissuration de PvME suivent également des tendances similaires : linéaire pour Alizé et quasi-

linéaire pour PvME. De cette manière, la prémissé est validée et renforce la confiance qui peut être portée envers PvME. Une étude plus approfondie de la considération du risque dans chacun des logiciels est nécessaire.

Le volet 4 illustre la valeur ajoutée de l'EME-14 par le dimensionnement de deux structures de chaussées (EME-14 vs GB3) selon les méthodes de dimensionnement ME française et américaine. Les structures demeurent les mêmes d'un logiciel à l'autre à l'exception de l'enrobé en couche de base. De plus, la fréquence, la température équivalente, les propriétés des matériaux, le trafic et la durée sont les mêmes dans les deux logiciels. Pour Alizé, le risque et les coefficients de calage (k_r , k_c et k_s) sont fixés selon les recommandations de la norme française NF P98-086. Il faut noter que, pour les dimensionnements Alizé, l'EME-14 sera avantageé par ses performances supérieures de résistance à la fatigue et de module complexe. Pour PvME, le risque est fixé selon les recommandations du guide PvME (*MEPD Guide*) (A. AASHTO, 2008) et les coefficients de calibration globaux et spécifiques au mélange sont laissés à leur valeur par défaut pour l'EME-14 et la GB3, qui correspond à la calibration nationale de PvME. Ainsi, il faut noter que, pour les dimensionnements PvME, l'EME-14 est seulement avantageé par ses performances supérieures de module complexe, puisque c'est à travers les coefficients de calibration que la performance en fatigue se traduit. Bien que plusieurs différences existent entre les deux logiciels, les dimensionnements produits autant pour l'EME-14 que pour la GB3 demeurent dans le même ordre de grandeur, au centimètre près. De plus, les deux logiciels mettent bien en lumière la valeur ajoutée de l'EME-14 par la production de dimensionnements nettement plus minces pour cet enrobé par rapport aux dimensionnements de la GB3. Du côté de PvME, il serait intéressant d'ajuster les coefficients de calibration spécifiques au mélange afin que les dimensionnements prennent compte de la performance en fatigue des enrobés et non seulement du module complexe.

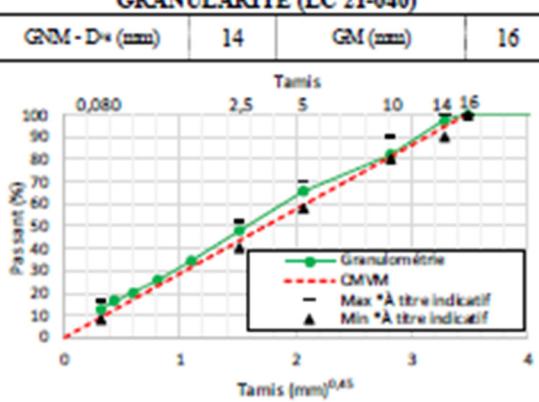
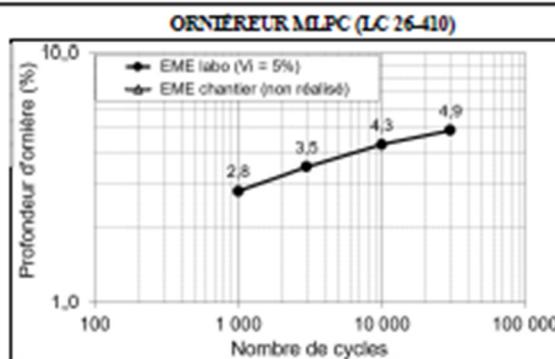
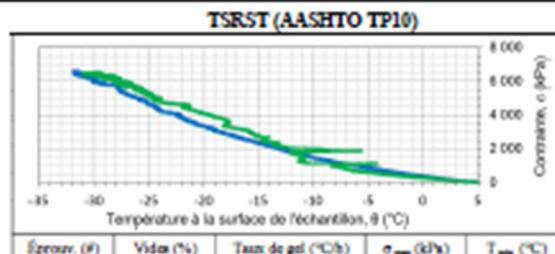
Pour conclure, l'EME-14 déclasse les enrobés de base standards autant du point de vue de ses propriétés mécaniques qu'à l'échelle de la chaussée par la production de dimensionnements plus minces. Il devient évident que l'EME-14 serait un enrobé bitumineux à considérer lors de

la construction de routes à fortes sollicitations provenant du trafic lourd et/ou du débit de circulation (Bitume Québec, 2014).

Les recherches entourant les matériaux haute performance et leur intégration efficace dans les différentes méthodes de dimensionnement ME sont loin d'être terminées. Effectivement, il faut approfondir l'aspect de la gestion du risque respectif à chacune des méthodes de dimensionnement ME pour établir des liens plus directs entre celles-ci. Il faut également travailler à mieux intégrer les matériaux haute performance dans ces méthodes de dimensionnement ME. De plus, un exercice semblable pourrait être mené sur le critère de rupture de l'orniérage, présent dans le deux logiciels (Alizé et PvME). Enfin, PvME propose des critères de rupture, comme la fissuration thermique et l'évolution de l'IRI, qui ne sont pas présents dans Alizé. Il serait très intéressant d'intégrer ces critères à Alizé afin de le bonifier.

ANNEXE I

FICHE TECHNIQUE DE PRODUIT : EME-14

		Fiche technique de produit (FTP) EME14 - Mix #0 - Éprouvettes Plaque Projet RDC II	No. AQ-900 Date 2018/04/03 Page 1 de 2 Appr. 																												
FORMULATION (NORME 4202)		GRANULARITÉ (LC 21-040)																													
<table border="1"> <tr> <td>Binome (PG)</td><td colspan="2">VialFlex M</td></tr> <tr> <td>$T_{\text{f, dilatation}} / \text{CTA / LCMB (}^{\circ}\text{C)}$</td><td colspan="2">103,2 / 101,5 / 106,4</td></tr> <tr> <td>$T_{\text{f, dilatation}} / \text{CTA / LCMB (}^{\circ}\text{C)}$</td><td colspan="2">-31,6 / n. d. / -28,1</td></tr> <tr> <td>$T_{\text{dilatation}}$ (°C)</td><td colspan="2">185</td></tr> <tr> <td>$T_{\text{compactage}}$ (°C)</td><td colspan="2">170</td></tr> <tr> <td>b (%)</td><td colspan="2">4,4</td></tr> <tr> <td>V_{e} (%)</td><td colspan="2">8,5</td></tr> <tr> <td>$d_{\text{p, const}}$</td><td colspan="2">2,682</td></tr> <tr> <td>d_{p}</td><td colspan="2">1,016</td></tr> <tr> <td>$d_{\text{p, min}}$</td><td colspan="2">2,369</td></tr> </table>		Binome (PG)	VialFlex M		$T_{\text{f, dilatation}} / \text{CTA / LCMB (}^{\circ}\text{C)}$	103,2 / 101,5 / 106,4		$T_{\text{f, dilatation}} / \text{CTA / LCMB (}^{\circ}\text{C)}$	-31,6 / n. d. / -28,1		$T_{\text{dilatation}}$ (°C)	185		$T_{\text{compactage}}$ (°C)	170		b (%)	4,4		V_{e} (%)	8,5		$d_{\text{p, const}}$	2,682		d_{p}	1,016		$d_{\text{p, min}}$	2,369	
Binome (PG)	VialFlex M																														
$T_{\text{f, dilatation}} / \text{CTA / LCMB (}^{\circ}\text{C)}$	103,2 / 101,5 / 106,4																														
$T_{\text{f, dilatation}} / \text{CTA / LCMB (}^{\circ}\text{C)}$	-31,6 / n. d. / -28,1																														
$T_{\text{dilatation}}$ (°C)	185																														
$T_{\text{compactage}}$ (°C)	170																														
b (%)	4,4																														
V_{e} (%)	8,5																														
$d_{\text{p, const}}$	2,682																														
d_{p}	1,016																														
$d_{\text{p, min}}$	2,369																														
APTITUDE AU COMPACTAGE (LC 26-004)																															
RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE																															
LOI ESSO		ORNIÉRAGE MLPC (LC 26-410)																													
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Propriétés physiques</td></tr> <tr> <td>Vides (%) (X)</td><td>n. d. (-)</td></tr> <tr> <td colspan="2">Constantes</td></tr> <tr> <td>A = n. d.</td><td>B = n. d.</td></tr> <tr> <td>C = n. d.</td><td>D = n. d.</td></tr> <tr> <td colspan="2"> $\log \lambda = A + B \log \sigma_3 + C \sigma_3 + D \left[\frac{T - T_{\text{ref, } \sigma_3}}{\log(\sigma_3)} \right]$ </td></tr> <tr> <td colspan="2"> <small>où : A, B, C et D : Constantes ESSO, fonction de l'essoré σ₃ : Constante verticale de calcul (10⁶ N/m²) σ₃ : Constante horizontale de calcul (10⁶ N/m²) T : T° de calcul (°C) T_{ref, σ3} : T° de référence pour déterminer C₁ et C₂ de la fraction en σ₃ : Fréquence de calcul (Hz) Note : 30°C et 150Hz sont des valeurs de référence lors de la détermination de la loi ESSO en laboratoire</small> </td></tr> </table>		Propriétés physiques		Vides (%) (X)	n. d. (-)	Constantes		A = n. d.	B = n. d.	C = n. d.	D = n. d.	$\log \lambda = A + B \log \sigma_3 + C \sigma_3 + D \left[\frac{T - T_{\text{ref, } \sigma_3}}{\log(\sigma_3)} \right]$		<small>où : A, B, C et D : Constantes ESSO, fonction de l'essoré σ₃ : Constante verticale de calcul (10⁶ N/m²) σ₃ : Constante horizontale de calcul (10⁶ N/m²) T : T° de calcul (°C) T_{ref, σ3} : T° de référence pour déterminer C₁ et C₂ de la fraction en σ₃ : Fréquence de calcul (Hz) Note : 30°C et 150Hz sont des valeurs de référence lors de la détermination de la loi ESSO en laboratoire</small>																	
Propriétés physiques																															
Vides (%) (X)	n. d. (-)																														
Constantes																															
A = n. d.	B = n. d.																														
C = n. d.	D = n. d.																														
$\log \lambda = A + B \log \sigma_3 + C \sigma_3 + D \left[\frac{T - T_{\text{ref, } \sigma_3}}{\log(\sigma_3)} \right]$																															
<small>où : A, B, C et D : Constantes ESSO, fonction de l'essoré σ₃ : Constante verticale de calcul (10⁶ N/m²) σ₃ : Constante horizontale de calcul (10⁶ N/m²) T : T° de calcul (°C) T_{ref, σ3} : T° de référence pour déterminer C₁ et C₂ de la fraction en σ₃ : Fréquence de calcul (Hz) Note : 30°C et 150Hz sont des valeurs de référence lors de la détermination de la loi ESSO en laboratoire</small>																															
TENUE À L'EAU		RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ																													
PAR TREMPAGE (LC 26-001)		TSRST (AASHTO TP10)																													
<table border="1"> <tr> <td>Récoiff. élastique (%)</td><td>65 à 70</td></tr> <tr> <td>Vides des lots (%) (X)</td><td>n. d. (-)</td></tr> <tr> <td>FBE selon BNQ (μm)</td><td>n. d.</td></tr> <tr> <td>Stabilité lot humide (N)</td><td>n. d.</td></tr> <tr> <td>Stabilité lot sec (N)</td><td>n. d.</td></tr> <tr> <td>Temps à l'eau (%)</td><td>n. d.</td></tr> </table>		Récoiff. élastique (%)	65 à 70	Vides des lots (%) (X)	n. d. (-)	FBE selon BNQ (μm)	n. d.	Stabilité lot humide (N)	n. d.	Stabilité lot sec (N)	n. d.	Temps à l'eau (%)	n. d.																		
Récoiff. élastique (%)	65 à 70																														
Vides des lots (%) (X)	n. d. (-)																														
FBE selon BNQ (μm)	n. d.																														
Stabilité lot humide (N)	n. d.																														
Stabilité lot sec (N)	n. d.																														
Temps à l'eau (%)	n. d.																														
LOTTMAN MODIFIÉ (AASHTO T 283)		<table border="1"> <tr> <th>Éprouv. (E)</th> <th>Vides (%)</th> <th>Taux de gel (°C/h)</th> <th>σ_{max} (kPa)</th> <th>T_{max} (°C)</th> </tr> <tr> <td>TSRST #2</td> <td>2,9</td> <td>-10,1</td> <td>6 720</td> <td>-31,8</td> </tr> <tr> <td>TSRST #3</td> <td>2,9</td> <td>-10,3</td> <td>6 680</td> <td>-31,0</td> </tr> <tr> <td>É</td> <td>2,9</td> <td>-10,2</td> <td>6 690</td> <td>-31,4</td> </tr> </table>		Éprouv. (E)	Vides (%)	Taux de gel (°C/h)	σ_{max} (kPa)	T_{max} (°C)	TSRST #2	2,9	-10,1	6 720	-31,8	TSRST #3	2,9	-10,3	6 680	-31,0	É	2,9	-10,2	6 690	-31,4								
Éprouv. (E)	Vides (%)	Taux de gel (°C/h)	σ_{max} (kPa)	T_{max} (°C)																											
TSRST #2	2,9	-10,1	6 720	-31,8																											
TSRST #3	2,9	-10,3	6 680	-31,0																											
É	2,9	-10,2	6 690	-31,4																											

MODULE COMPLEXE

PARAMÈTRES MODÈLE 2S2P1D

E_0 (MPa) = 43 800	E_{inf} (MPa) = 300
δ = 2,39	k = 0,137
h = 0,44	β = 1 200
PETT (WLF)	$\alpha_T = 10$, $\frac{[-C_1(T-T_{ref,2T})]}{1+C_1(T-T_{ref,2T})}$

T_{ref} (sec.) = 0,5	$T_0 = T_{ref,2T} = 10^\circ\text{C}$
$C_1 = 23,56$	$C_2 = 163,3$

COEFFICIENT DE POISSON

ν_0 = n.d.	ν_{inf} = n.d.
ν_{ref} = n.d.	ν_0 (sec.) = n.d.

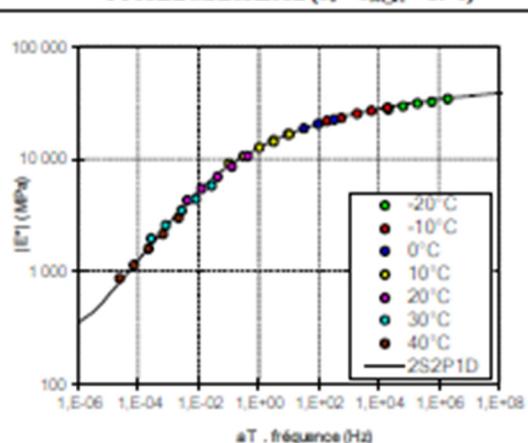
PROPRIÉTÉS SPÉCIFIQUES

T (°C)	f (Hz)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (%)
30	10	5 819	23,1
20	10	10 401	16,4
10	10	16 399	10,32
0	10	22 304	6,9

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Vides (Va ou Vf, %) (x)	2,5 (éprouvette PL1-1)
-------------------------	------------------------

COURBE MAÎTRESSE ($T_0 = T_{ref,2T} = 10^\circ\text{C}$)



RÉSISTANCE EN FATIGUE

PARAMÈTRES DE FATIGUE

Paramètre	Méthode d'analyse	
	Classique, CL	Nouvelle, Phase II/III
Critère de rupture	$N_{f,0\%}$	$N_{f,0\%}^*$
Nombre d'échantillon (n)	18	18
$N_{f,0\%}$: durée pour $t = 1$	2,873E-18	5,606E-18
$a_0 \cdot 1/b$	6,2	6,1
a_0 , effet de θ	2,5	2,5
$a_0 = N_{f,0\%} \cdot (E_{f,0\%})^{1/3}$	1,06E-07	2,07E-07
$\epsilon_{f,0\%}$ (mm/m)	151E-06	145E-06
Coeff détermination, R^2	0,61	0,62
Ecart-type, $S_{log(N)}$	0,59	0,58
Ecart-type résidual, SN^{**}	0,36	0,37

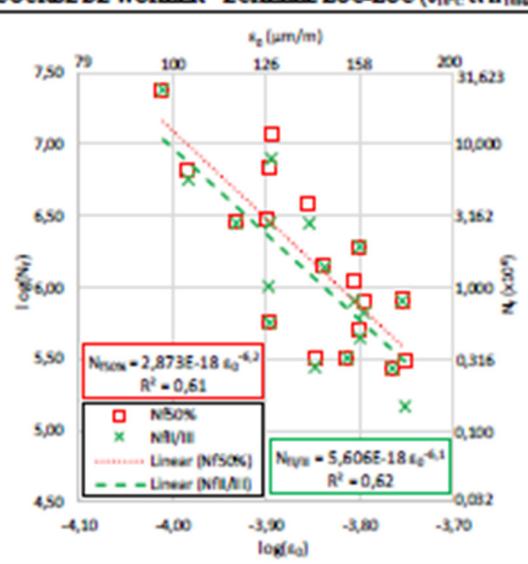
CONDITIONS D'ESSAI

Type d'essai	T/C et T
Mode de sollicitation	ε contrôlée
θ_{int} (°C)	10
f_{int} (Hz)	10

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Taille échantillon (mm)	075 x 150
% vides échantillon (%)	1,9 - 2,6 (2,2)
$E_{f,0\%} = E^* $ (MPa) (x)	12 620 - 20 130 (16 865)

COURBE DE WÖHLER - ÉCHELLE LOG-LOG (θ_{int} et f_{int})



* Etais T/C : $N_{f,0\%} = (N_{f,0\%}^N + N_{f,0\%}^{*,N} + N_{f,0\%}) / 3$

Etais en flexion : $N_{f,0\%} = N_{f,0\%}^*$

** $SN = S_{log(N)} \sqrt{[(1 - R^2)(n - 1)] / (n - 2)}$

ANNEXE II

ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME VIAFLEX M®

Tableau-A I-1 Attestation de conformité du bitume Viaflex M

INFORMATIONS GÉNÉRALES		RECOMMANDATIONS - TEMPÉRATURE D'UTILISATION				
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Bitumar Inc. 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4		Entreposage	Minimale	Maximale		
Fabricant et lieu de fabrication Bitumar Inc. 3000 Broadway, Montréal, QC, H1B 5B4			161	175		
Classe de bitume Viaflex M	Nom commercial Viaflex M	Malaxage	171	185		
N° de lot 17VIAFLEXM-01	Date de fabrication 05/06/2017					
ESSAIS DE CARACTÉRISATION						
Date des essais de caractérisation	06/06/2017	MSCR (AASHTO T350)				
Masse volumique (g/cm³), à 25°C, AASHTO T228	1.016	Recouvrance d'élasticité à 3,2 kPa, R3,2 (%) à 70°C	106.7			
Masse volumique (g/cm³), à 15°C, AASHTO T228	1.022	Complaisance non recouvrable à 3,2 kPa, Jnr3,2 (kPa-1) à 70°C	-0.01			
Viscosité Brookfield (Pa·s), à 135°C, AASHTO T 316	4.485	Complaisance non recouvrable différentielle, Jnrdiff (%) à 70°C	-64.8			
Viscosité Brookfield (Pa·s), à 165°C, AASHTO T 316	0.813					
Stabilité au stockage (°C), LC 25-003	0.3					
TBA moyenne (°C)	98.0					
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	65	NOTES				
Teneur en cendres (%)	0.2	Ce produit doit être entreposé dans un réservoir vide ou contenant le même grade fourni 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.				
Variation de masse au RTFOT (%)	0.616					
Température élevée de caractérisation Te(°C)	103.2					
Température basse de caractérisation Tb(°C)	-31.6					
Module de rigidité So (60) (MPa)	92.4					
Pente de mo (60)	0.395					
Enrobé résiduel (%) (LC25-009)	N.A.					
ESSAIS DE CONTRÔLE						
Date des essais de contrôle	06/06/2017	Peu importe les recommandations du fournisseur, L'entrepreneur doit respecter les documents contractuels.				
G*/sin (δ), bitume d'origine à 88 °C (kPa)	2.84					
Température élevée de caractérisation Te(°C)	103.2					
Module de rigidité Sc (60) (MPa)	92.4					
Pente de mc (60)	0.395					
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	65					

ANNEXE III

INTÉGRATION DU k_{f1} SPÉCIFIQUE AU MÉLANGE DANS PvME

Il est possible que les k_{f1} ($k_{f1} = 10^6 \varepsilon_6(\theta_{test}, f_{test})^{-1/b} |E^*|(\theta_{test}, f_{test})^{-1/2b}$) des mélanges bitumineux aient des valeurs très basses. Malheureusement, la version 2.5.3 de PvME ne considère que les six premières décimales lors de ses calculs. Ainsi, si un k_{f1} de 1×10^{-7} est entré, le calcul de la durée de vie ($N_f = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1} (E_{HMA})^{-(k_{f3}\beta_{f3})}(\varepsilon_t)^{-(k_{f2}\beta_{f2})}$) donnera zéro, puisque k_{f1} est considéré comme valant 0.

Wang (2014) propose une solution pour contourner cette faille informatique. Sa solution est présentée à travers un exemple pour un k_{f1} de $5,62 \times 10^{-18}$. Tout d'abord, la valeur de k_{f1} à entrer dans PvME devient $5,62 \times 10^{-4}$ pour s'assurer de ne pas dépasser les 6 décimales. Ainsi, la valeur de N_f est 10^{14} ($10^{-4}/10^{-18}$) fois trop élevée. Avec une valeur de N_f surestimée, le dommage ($D = n/N_f$) est sous-estimé de 10^{14} fois. Il faut donc multiplier le dommage calculé par 10^{14} fois. Heureusement, le dommage (DI_{Bottom}) se retrouve dans le calcul du taux de fissuration (FC_{Bottom}) :

$$FC_{Bottom} = \left(\frac{1}{60} \right) \left(\frac{C_3}{1 + e^{(C_1 C_1^* + C_2 C_2^* \log(10^{14} DI_{Bottom} * 100))}} \right) \quad (A \text{ II-1})$$

$$FC_{Bottom} = \left(\frac{1}{60} \right) \left(\frac{C_3}{1 + e^{(C_1 C_1^* + 14 C_2 C_2^* + C_2 C_2^* \log(DI_{Bottom} * 100))}} \right) \quad (A \text{ II-2})$$

Ainsi, il suffit de calculer la nouvelle valeur de C_1 (C_{1new}) :

$$C_{1new} C_1^* = C_1 C_1^* + 14 C_2 C_2^* \quad (A \text{ II-3})$$

$$C_{1new} = \frac{C_1 C_1^* + 14 C_2 C_2^*}{C_1^*} \quad (A \text{ II-4})$$

$$C_{1new} = C_1 - 7 C_2 \quad (A \text{ II-5})$$

BIBLIOGRAPHIE

- AASHTO. (2014a). M 332-14, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Rest.
- AASHTO. (2014b). T 350-14, Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). *American Association of State and Highway Transportation Officials*.
- AASHTO, A. (2008). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide-A Manual of Practice. *AAoSHaT Officials, Editor*.
- Agal, T. (2005). *Développement d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées pour la Ville de Montréal* (École de technologie supérieure).
- Baaj, H. (2002). *Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liens hydrocarbone*s. Repéré à <http://www.theses.fr/2002ISAL0034/document>
- Bahia, H. U., & Anderson, D. A. (1995). Strategic highway research program binder rheological parameters: background and comparison with conventional properties. *Transportation research record*, (1488).
- Bitume Québec. (2014). Les enrobés à module élevé adaptés aux climats froids. *Techno-Bitume*, 20 p.
- BNQ. (2014). *Travaux de génie civil - Granulats* (Vol. NQ 2560-114-I/2014). Bureau de normalisation du Québec.
- Burmister, D. M., Palmer, L., Barber, E., & Middlebrooks, T. (1944). The theory of stress and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways. Dans *Highway Research Board Proceedings* (Vol. 23).
- Carter, A. (2017). CTN 771 - Construction et dimensionnement des chaussées. *Programme de Baccalauréat en génie de la construction, École de Technologie Supérieure*, pagination multiple.
- Carter, A., & Perraton, D. (2018). MGC 837 - Matériaux bitumineux : formulation, fabrication, mise en place. *Programme de Maîtrise en génie de la construction, École de Technologie Supérieure*, pagination multiple.
- Corté, J., & Di Benedetto, H. (2004). Matériaux routiers bitumineux 1: description et propriétés des mélanges (pp. 234 p): Hermès science publications.

- Delorme, J.-L., De La Roche, C., & Wendling, L. (2007). Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*.
- Di Benedetto, H. (1998). Modélisation : écart entre état des connaissances et applications. 26 p.
- Di Benedetto, H., Corté, J.-F., Delorme, J.-L., Grisard, A., Piau, J.-M., & De La Roche, C. (2005). *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Paris: Hermès Science Publications.
- Di Benedetto, H., Nguyen, Q. T., & Sauzéat, C. (2011). Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 12(1), 129-158. doi: 10.1080/14680629.2011.9690356. Repéré à <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.9690356>
- Duong, N. S. (2017). *Instrumentation de chaussées: la route intelligente qui s'auto-déetecte?* (Ecole Centrale de Nantes; Université Bretagne Loire).
- EN, N. (2005). 12697-24 Specification: Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: résistance à la fatigue: March.
- Espersson, M. (2014). Effect in the high modulus asphalt concrete with the temperature. *Construction and Building Materials*, 71, 638-643. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.088. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.088>
- Federal Highway Administration. (2013). Highway functional classification concepts, criteria and procedures: US Department of Transportation Washington, DC.
- Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design.
- IDRRIM. (2013). Aide au choix des granulats pour chaussées basée sur les normes européennes. 16.
- Lachance Tremblay, É. (2014). *Incorporation de particules de verre post-consommation dans un enrobé bitumineux de type ESG14* (École de technologie supérieure).
- Lamothe, S. (2004). *Enrobé grenu: influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-orniérage* (École de technologie supérieure).
- Lamothe, S. (2014). *Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques* (École de technologie supérieure, Montréal).

- Meunier, M. (2012). *Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux* (École de technologie supérieure, Montréal).
- MTQ. (2005). *Enrobés: formulation selon la méthode LC*.
- MTQ. (2010). LC 25-007 - Bitume - Évaluation de la température associée à une viscosité. *Recueil des méthodes d'essai LC*.
- MTQ. (2012). Choix des composants d'enrobés pour construction neuve ou reconstruction. 2 p.
- MTQ. (2015). LC 26-320 - Détermination du pourcentage de vides et de la compacité dans les enrobés à chaud compactés. *Recueil des méthodes d'essai LC*.
- MTQ. (2017a). LC 26-040 - Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés. *Recueil des méthodes d'essai LC*.
- MTQ. (2017b). LC 26-700 - Détermination du module complexe des enrobés. *Recueil des méthodes d'essai LC*.
- MTQ. (2018a). LC 26-003 - Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire. *Recueil des méthodes d'essai LC*.
- MTQ. (2018b). LC 26-045 - Détermination de la densité maximale. *Recueil des méthodes d'essai LC*.
- MTQ. (2018c). LC 26-400 - Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC. *Recueil des méthodes d'essai LC*.
- MTQ. (2018d). LC 26-410 - Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage. *Recueil des méthodes d'essai LC*.
- MTQ. (2018e). LC 26-690 - Fabrication d'éprouvettes cylindriques d'enrobé pour les essais en traction-compression directe. *Recueil des méthodes d'essai LC*.
- MTQ. (2018f). Rapport annuel de gestion 2017/2018.
- Nguyen, M. L. (2009). Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux. *INSA de Lyon*.
- Norme française, N. (2019). NF P 98-086. *Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves*.

- Olard, F. (2003). *Comportement thermomécanique des enrobés bitumeux à basses températures : relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé*. Repéré à <http://www.theses.fr/2003ISAL0056/document>
- Perraton, D. (2012). MGC 805 - Science des Matériaux. *Programme de Maîtrise en génie de la construction, École de Technologie Supérieure*, pagination multiple.
- Perraton, D., Baaj, H., & Carter, A. (2010). Comparison of Some Pavement Design Methods from a Fatigue Point of View: Effect of Fatigue Properties of Asphalt Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 11(4), 833-861.
- Perraton, D., Di Benedetto, H., & Carter, A. (2011). Correspondances entre les coefficients des modèles de fatigue dans les méthodes mécanistiques-empiriques de dimensionnement de chaussées souples. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(11), 1287-1299.
- Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Nguyen, Q. T., & Pouget, S. (2018). Three-dimensional linear viscoelastic properties of two bituminous mixtures made with the same binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 04018305.
- Setra-LCPC. (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussées-Guide technique. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, France (in French)*.
- Sohm, J. (2011). *Prédiction des déformations permanentes des matériaux bitumineux* (Ecole Centrale de Nantes (ECN)).
- St-Laurent, D. (2006). Manuel de l'utilisateur; Logiciel de dimensionnement des chaussées souples, Chaussée 2: Québec: Ministère des transports.
- Wang, Y. (2014). Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures and Their Incorporation into the AASHTOWare Pavement ME Program.
- Williams, M. L., Landel, R. F., & Ferry, J. D. (1955). The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 77(14), 3701-3707. doi: 10.1021/ja01619a008. Repéré à <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja01619a008>
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design*. John Wiley & Sons.