

Mesure des propriétés viscoélastiques linéaires et du comportement et des caractéristiques à basse température d'un enrobé de surface incorporant de forts taux de granulats bitumineux récupérés (GBR)

par

Comlan Théophile KAKPO

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DU
DIPLÔME DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

MONTRÉAL, LE 28 AVRIL 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Comlan Théophile Kakpo, 2025



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

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Alan Carter, directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Kevin Bilodeau, codirecteur de thèse
Direction recherche et développement, Bauval Inc.

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

M. Simon Joncas, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

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

M. Nouffou Tapsoba, examinateur externe
Holcim

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

LE 09 AVRIL 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je profite de ces quelques lignes pour exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont été ma force morale dans l'accomplissement de ce rêve.

Ma profonde gratitude va à mes directeurs de recherche, Alan Carter, Michel Vaillancourt et Kevin Bilodeau, pour leur confiance en ce projet, leur disponibilité et leurs précieux conseils. Ces quelques années de collaboration avec vous m'ont permis de grandir dans mes réflexions. La liberté qui m'a été accordée, les discussions et orientations quand elles se sont avérées nécessaires, et les encouragements m'ont permis de mener à bien ce projet. Les mots ne suffiront jamais pour vous témoigner ma reconnaissance.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury pour leur participation, en particulier le président du jury, professeur Simon Joncas, ainsi que le professeur Daniel Perraton et Nouffou Tapsoba pour avoir accepté d'évaluer cette thèse. J'en suis profondément honoré.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance aux collègues du Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) pour leur soutien et leurs conseils. Un merci spécial à Francis Bilodeau pour sa disponibilité constante et ses efforts remarquables pour remettre en marche les presses MTS après les pannes dans des délais très raisonnables. Merci à Sylvain Bibeau, Sébastien Lamothe, Richard Prowt et Mauricio Rios pour leur soutien moral, technique et intellectuel dans mes travaux en laboratoire. À mes amis dont les noms ne sont pas mentionnés ici, je vous dis également merci. Vous avez tous contribué à cette réussite.

Enfin, un grand merci à ma tendre et douce épouse, Théophilia Tilda Lakoussan, qui a comblé ma vie avec nos deux princesses. Ta présence et celle de nos filles sont la plus grande œuvre de ma vie.

Mesure des propriétés viscoélastiques linéaires et du comportement et des caractéristiques à basse température d'un enrobé de surface incorporant de forts taux de granulats bitumineux récupérés (GBR)

Comlan Théophile KAKPO

RÉSUMÉ

L'utilisation de granulats bitumineux récupérés (GBR) est une solution envisagée dans le secteur des matériaux bitumineux pour des raisons environnementales. Bien que le Québec utilise déjà les GBR dans la production d'enrobés bitumineux, les taux sont limités à 10% et 20% pour les couches de surface et de base des chaussées, respectivement. Cette prudence est due aux conditions climatiques locales et au manque de preuves sur les performances à basse température des enrobés avec plus de 20% de GBR.

Un rapport de Bitume-Québec (2023) indique qu'il y a plus de 4,55 millions de tonnes de GBR en inventaire, mais le taux de recyclage annuel est de seulement 14,8%. Utiliser des taux élevés de GBR nécessite de considérer plusieurs facteurs comme la taille des particules et la quantité de bitume, ainsi que la température et la durée de malaxage. Bien que l'ajout de GBR augmente la rigidité et améliore les performances à l'ornierage, il peut rendre les enrobés plus fragiles à basse température.

Pour mieux comprendre et optimiser l'utilisation des GBR dans les régions froides, un projet a été lancé par le laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) et BauVal Inc. Ce projet est divisé en deux parties : la formulation d'enrobés à fort taux de GBR et la caractérisation de leurs performances à basse température. La thèse se concentre sur la deuxième partie. La revue de littérature a permis de mettre l'accent sur les conditions assurant une production de qualité des enrobés recyclés et à bâtir la méthodologie expérimentale permettant la caractérisation des mélanges du projet.

Les résultats montrent qu'un temps de malaxage optimal est nécessaire pour obtenir un comportement similaire au mélange de référence, le comportement VEL et les propriétés thermiques sont influencés par l'ajout du GBR entraînant un gain de module de rigidité tandis qu'au retrait thermique empêché (essai TSRST), l'influence est ressentie lorsque le taux de GBR dépasse 30%. Les essais de traction directe et d'endommagement thermique ont également révélé un gain de performance à basse température avec l'ajout de GBR. Bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour confirmer ces résultats, la notion de reste de réserve de résistance en traction (R_{RRT}), introduite dans cette thèse, montre que la chaussée serait plus robuste dans les basses températures avec l'ajout du GBR jusqu'à 40%. Ce concept de R_{RRT} peut être utilisé comme un outil pour prédire l'apparition de la fissuration transversale dans les chaussées au Québec.

Mots-clés : GBR, temps de malaxage, comportement VEL, TSRST, traction directe, endommagement thermique, performances à basse température

Measurement of Linear Viscoelastic Properties and Low-Temperature Behavior and Characteristics of a Surface Mix Incorporating High Rates of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Comlan Théophile KAKPO

ABSTRACT

The use of recycled asphalt pavement (RAP) is a solution considered in the asphalt materials sector for environmental reasons. Although Quebec already uses RAP in the production of asphalt mixtures, the rates are limited to 10% and 20% for surface and base layers of pavements, respectively. This caution is due to local climatic conditions and the lack of evidence on the low-temperature performance of asphalt mixtures with more than 20% RAP.

A report by Bitume-Québec (2023) indicates that there are more than 4.55 million tons of RAP in inventory, but the annual recycling rate is only 14.8%. Using high rates of RAP requires consideration of several factors, such as particle size and quantity of bitumen, as well as mixing temperature and time. While adding RAP increases stiffness and improves rutting performance, it can make the mixtures more brittle at low temperatures.

To better understand and optimize the use of RAP in cold regions, a project was launched by the Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) and BauVal Inc. This project is divided into two parts: the formulation of asphalt mixes with a high RAP content and the characterization of their low-temperature performance. This thesis focuses on the second part. The literature review highlighted the conditions ensuring the quality production of recycled asphalt and helped to develop the experimental methodology for characterizing the project's mixtures.

The results show that an optimum mixing time is required to obtain behavior like that of the reference mix, VEL behavior and thermal properties are influenced by the addition of RAP, leading to an increase in the stiffness modulus, while at TSRST, the influence is felt when the RAP content exceeds 30%. Direct tensile and thermal damage tests also revealed improved low-temperature performance with the addition of RAP. Although further research is needed to confirm these results, the concept of Residual Tensile Strength Reserve (R_{TSR}), introduced in this thesis, shows that the pavement would be more robust at low temperatures with the addition of RAP up to 40%. This R_{TSR} concept can be used as a tool to predict the occurrence of transverse cracking in pavements in Quebec.

Keywords: RAP, mixing time, VEL behavior, TSRST, direct traction, thermal damage, low-temperature performance

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Structure de chaussée et types de sollicitation	5
1.1.1 Structure d'une chaussée bitumineuse	5
1.1.2 Les sollicitations	6
1.1.2.1 Sollicitations mécaniques.....	7
1.1.2.2 Sollicitations thermiques.....	7
1.2 Enrobé bitumineux.....	8
1.2.1 Les types d'enrobé bitumineux	9
1.2.2 Les granulats	12
1.2.3 Bitume.....	12
1.2.3.1 Classification des bitumes au Québec.....	13
1.2.3.2 Vieillissement du bitume	14
1.2.4 Enrobés recyclés à chaud	16
1.2.4.1 Granulats bitumineux récupérés (GBR).....	16
1.2.4.2 Mobilisation du bitume du GBR et ratio de bitume recyclé (RBR)	17
1.2.4.3 Formation d'agrégats bitumineux (clusters)	18
1.2.4.4 Phénomène de diffusion dans les enrobés recyclés	20
1.2.4.5 Taux de recyclage au Québec	21
1.3 Méthode de formulation des enrobés au Québec	22
1.4 Essais de Caractérisation des enrobés et influence de l'ajout du GBR.....	26
1.4.1 Comportement des enrobés.....	27
1.4.2 Comportement viscoélastique linéaire	28
1.4.2.1 Essai module complexe.....	28
1.4.2.2 Modèles rhéologiques	30
1.4.2.3 Principe d'équivalence temps-température.....	34
1.4.2.4 Représentation graphique des résultats de module complexe	35
1.4.2.5 Paramètres de formulation influençant le module complexe	36
1.4.3 Propriétés thermiques des enrobés	37
1.4.3.1 Réponses aux sollicitations thermiques	37
1.4.3.2 Coefficient de dilatation/contraction thermique	37
1.4.3.3 Variabilité du coefficient DCT	38
1.4.3.4 Influence des constituants	38
1.4.3.5 Impact du GBR	38
1.4.3.6 Importance du coefficient DCT	39
1.4.4 Étude du comportement à basse température.....	39
1.4.4.1 Essai de retrait thermique empêché	39

1.4.4.2	Méthodologie du TSRST	39
1.4.4.3	Influence du GBR sur le TSRST	40
1.4.4.4	Paramètres clés du TSRST.....	41
1.4.5	Résistance en traction des enrobés.....	42
1.4.5.1	Essai de traction directe (TD)	43
1.4.5.2	Influence de la vitesse de sollicitation	43
1.4.5.3	Concept de la réserve de résistance en traction des enrobés en hiver	43
1.4.6	Concept d'endommagement par cycles thermiques	45
1.5	Sommaire	47
CHAPITRE 2 OBJECTIFS.....		49
2.1	Introduction.....	49
2.2	Objectif principal	49
2.3	Objectifs spécifiques	50
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET MATÉRIAUX		51
3.1	Introduction.....	51
3.2	Programme expérimental	52
3.3	Matériaux	54
3.3.1	Granulats vierges et GBR	54
3.3.2	Bitume d'apport et bitume du GBR	56
3.4	Les essais de caractérisation	58
3.4.1	Essai module complexe.....	59
3.4.2	Essais de retrait thermique empêché.....	61
3.4.3	Essai de mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique (DCT).....	63
3.4.3.1	Description de la procédure d'essai	63
3.4.3.2	Biais lié à l'utilisation d'éprouvette avec casque collé à une extrémité	65
3.4.4	Essai de résistance à la traction.....	66
3.4.5	Essai d'endommagement thermique (ET)	68
3.4.5.1	Principe de l'essai ET	69
3.4.5.2	Exemple de résultats	72
3.5	Temps de malaxage.....	73
3.5.1	Normes et Recommandations	73
3.5.2	Expérimentation et Résultats	74
3.6	Préparation des matériaux.....	74
3.6.1	Séchage, tamisage et prise de masse des matériaux granulaires.....	74
3.6.2	Composition, malaxage et compactage des enrobés.....	75
3.6.2.1	Composition des enrobés	75
3.6.2.2	Malaxage et compactage	77
3.6.3	Prélèvement des éprouvettes et collage des casques.....	79
3.7	Formulation des enrobés R60 et R80.....	83
3.8	Sommaire	84

CHAPITRE 4 COMPORTEMENT VISCOÉLASTIQUE LINÉAIRE, PROPRIÉTÉS THERMIQUES ET COMPORTEMENT AU RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ		87
4.1	Introduction.....	87
4.2	Programme expérimental et matériaux	87
4.2.1	Programme expérimental	87
4.2.2	Matériaux	89
4.2.3	Préparation des matériaux, des mélanges et prélèvement des éprouvettes.....	89
4.3	Résultats des essais	89
4.3.1	Module complexe.....	89
4.3.1.1	Résultats et discussions.....	90
4.3.1.2	Analyse du plan Cole-Cole	97
4.3.1.3	Analyse des zones (1, 2 et 3) de comportement du MC	100
4.3.1.4	Sommaire des résultats des essais de MC	108
4.3.2	Mesure des coefficients de dilatation-contraction thermique (DCT) des enrobés de l'étude	109
4.3.2.1	Résultats et discussions.....	109
4.3.2.2	Analyse des résultats	111
4.3.3	Essais TSRST.....	114
4.3.3.1	Résultats et discussions.....	114
4.3.3.2	Analyse des résultats	116
4.3.3.3	Perte de performance au retrait thermique	119
4.3.3.4	Implications au niveau des exigences du MTMD.....	121
4.4	Conclusion	121
CHAPITRE 5 INFLUENCE DE L'AJOUT DE GBR SUR LA RÉSERVE DE RÉSISTANCE EN TRACTION DE LA COUCHE DE SURFACE D'UNE CHAUSSÉE		123
5.1	Introduction.....	123
5.2	Concept de la réserve de résistance et du reste de réserve de résistance en traction.....	124
5.3	Programme expérimental	125
5.4	Déformations et contraintes tangentielles dues au trafic	128
5.5	Résultats des essais de traction directe (TD)	132
5.5.1	Évolution des contraintes en cours d'essai	132
5.5.2	Évolution de la résistance en traction des enrobés.....	133
5.6	Combinaison des essais TD et TSRST	134
5.7	Observations lors du compactage des plaques d'enrobé et vides des éprouvettes d'essai TD.....	135
5.8	Influence des vides air sur les caractéristiques des enrobés bitumineux	136
5.8.1	Influence des vides sur la rigidité des enrobés.....	137
5.8.2	Modèles prédictifs.....	137

5.9	Étude exploratoire de l'impact des vides sur le module complexe des enrobés de ce projet	139
5.9.1	Résultats expérimentaux et observations	140
5.9.2	Application de la contrainte effective	140
5.9.3	Amélioration de la précision des modèles	141
5.10	Correction des résultats des essais TSRST et TD par la méthode des contraintes effectives	143
5.11	Influence de l'ajout du GBR sur les températures de rupture à basse température	145
5.12	Influence du GBR sur la réserve de résistance en traction (RRT) et prise en compte de l'effet du trafic pour l'évaluation de la capacité résiduelle de l'enrobé bitumineux dans la chaussée	147
5.12.1	Influence du GBR sur la RRT	147
5.12.2	Prise en compte du trafic dans l'évaluation de la capacité mécanique de l'enrobé en couche de surface	149
5.13	Conclusion	151
 CHAPITRE 6 ENDOMMAGEMENT PAR CYCLES THERMIQUES À BASSE TEMPÉRATURE		
6.1	Introduction	153
6.2	Résultats	154
6.3	Approche d'analyse de l'essai d'endommagement thermique	157
6.3.1	Chemin de sollicitation de l'essai ET	157
6.3.2	Critère classique de rupture	159
6.3.2.1	Critère Classique de Rupture en Fatigue	159
6.3.2.2	Application du Critère Classique à l'Essai d'Endommagement Thermique (ET)	159
6.3.2.3	Calcul du module de rigidité au cycle i	160
6.3.3	Critère de la variable d'endommagement D	161
6.3.3.1	Variable d'endommagement D	161
6.3.3.2	Calcul de la Variable D	162
6.4	Influence de l'ajout du GBR sur l'évolution de la rigidité à l'endommagement thermique	162
6.4.1	Évolution du module de rigidité E	162
6.4.2	Évolution de la variable D	164
6.5	Conclusion	166
 CONCLUSION		
		167
 RECOMMANDATIONS		
		171
 ANNEXE I FEUILLES DE FORMULE DES ENROBÉS DE L'ÉTUDE		
		175
 ANNEXE II RÉSULTATS DES ESSAIS DE MESURE DU COEFFICIENT DE DILATATION/CONTRACTION THERMIQUE		
		181

ANNEXE III ÉTABLISSEMENT D'UNE DURÉE DE MALAXAGE POUR ENROBÉS À FORT TAUX DE GBR À L'AIDE DES MODULE COMPLEXE ET RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ.....	195
ANNEXE IV RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE	207
ANNEXE V RÉSULTATS DES ESSAIS TSRST.....	221
ANNEXE VI RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION DIRECTE.....	225
ANNEXE VII CONFIGURATION DE STRUCTURE DE CHAUSSÉE ET VARIANTES DE MODELISATION	235
BIBLIOGRAPHIE.....	237

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Critères de sélection du type d'enrobé bitumineux.....	10
Tableau 1.2 Choix des composants de l'enrobé.....	11
Tableau 1.3 Exigences pour le contrôle des bitumes de la norme 4101 du MTMD (Tableau 4101-02)	14
Tableau 1.4 Taux de GBR permis par différents états.....	22
Tableau 1.5 Représentation des modèles rhéologiques	32
Tableau 3.1 Essais du programme expérimental	54
Tableau 3.2 Caractéristiques des matériaux granulaires.....	55
Tableau 3.3 Propriétés des bitumes d'apport et du GBR.....	58
Tableau 3.4 Proportion de GBR, quantité de bitume du GBR et de bitume d'apport dans l'ensemble des enrobés ESG10 et 100% GBR de l'étude	76
Tableau 3.5 Durées de malaxage de l'étude	78
Tableau 4.2 Paramètres 2S2P1D à T_{ref} de 15 °C des enrobés de l'étude	90
Tableau 4.3 Perte du module E^* imaginaire entre l'enrobé R0 et les enrobés avec GBR	100
Tableau 4.4 Résultats des coefficients DCT des enrobés de l'étude	110
Tableau 4.5 Résultats des contraintes de rupture, températures de rupture et T_g des enrobés de l'étude	116
Tableau 5.1 Caractéristiques des matériaux et des mélanges de l'étude	127
Tableau 5.2 Configuration de la structure de chaussée et variantes de modélisation Alizé avec une couche de roulement en enrobé R30	129
Tableau 5.3 Contraintes mesurées et contraintes effectives de rupture des essais TSRST des enrobés de l'étude.....	144
Tableau 5.4 Contraintes mesurées et contraintes effectives de rupture des essais TD des enrobés de l'étude	144

Tableau 5.5 Températures de rupture à basse température.....	146
Tableau 5.6 Réserve de résistance en traction des enrobés et contraintes tangentielle (σT) à la surface des enrobés de l'étude dans la chaussée	150
Tableau 6.1 Paramètres de calcul de $\varepsilon_{ther.}$ et modules de rigidité initiaux	160
Tableau 6.2 Écart entre le module initial et le module à N cycle	164

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Structure de chaussée souple	6
Figure 1.2 Schématisation des sollicitations induites par le trafic.....	7
Figure 1.3 Schématisation des sollicitations induites par la température	8
Figure 1.4 Zones climatiques pour le choix des classes de bitume	11
Figure 1.5 Évolution de la quantité de clusters dans les enrobés recyclés	19
Figure 1.6 Cheminement pour la formulation LC	25
Figure 1.7 Domaines des types de comportement d'un enrobé	28
Figure 1.8 Définition du module complexe	29
Figure 1.9 Paramètres de calage 2S2P1D	32
Figure 1.10 Construction de courbes maîtresses par translation des isothermes à T_{ref}	35
Figure 1.11 Analyse des résultats d'un essai TSRST	42
Figure 1.12 Exemple de détermination de réserve de résistance en traction à partir des essais TSRST et TD	44
Figure 1.13 Domaines des phénomènes de fissuration thermique.....	46
Figure 3.1 Organigramme de la démarche de recherche de la thèse	53
Figure 3.2 Photos des deux classes granulaires issues de la séparation du GBR 0-10 mm.....	56
Figure 3.3 Photos d'une éprouvette d'essai MC	60
Figure 3.4 Exemple de résultats d'un essai de module complexe du ESG10-R30.....	60
Figure 3.5 Photos d'une éprouvette TSRST	62
Figure 3.6 Exemple de résultats et d'analyse des résultats d'un essai TSRST	63
Figure 3.7 Photos d'essai de mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique	64

Figure 3.8 Exemple de résultats d'essai de mesure du coefficient DCT des enrobés R0, R40 et R100.....	65
Figure 3.9 Photos d'éprouvette d'essai TD a) avant essai TD b) après essai TD	67
Figure 3.10 Exemple de résultat d'un essai TD à -20 °C et vitesse de chargement de 220×10^{-6} m/m/h	67
Figure 3.11 Photos de localisation des ruptures d'essai TD	68
Figure 3.12 Photo d'une éprouvette instrumentée et prête pour l'essai ET	69
Figure 3.13 Phases d'évolution des contraintes dans un essai TSRST de l'enrobé R0 Ep01	70
Figure 3.14 Exemple de résultats d'essais d'endommagement thermique (ET) des enrobés R0 et R40.....	72
Figure 3.15 Granulométries des enrobés ESG10, 100% GBR et fuseau du ESG10 du MTMD.....	77
Figure 3.16 Photo d'une plaque 500 mm x 180 mm x 100 mm	80
Figure 3.17 Plan de carottage d'une plaque 500 mm x 180 mm x 100 mm	81
Figure 3.18 Photo d'une plaque 500 mm x 180 mm x 150 mm	81
Figure 3.19 Plan de carottage d'une plaque 600 mm x 400 mm x 150 mm	82
Figure 3.20 Photo de collage d'un casque sur l'éprouvette à l'aide du banc.....	83
Figure 3.21 Résultats de l'essai à la PCG des enrobés ESG10 à 60 et 80% de GBR.....	84
Figure 4.1 Diagramme de la démarche expérimentale pour l'évaluation du comportement VEL, les propriétés thermiques et les performances à basse température des enrobés à l'étude.....	88
Figure 4.2 Évolution des paramètres h , k , δ et β du modèle 2S2P1D des enrobés de l'étude	92
Figure 4.3 Coefficients de translation a_T à $T_{ref} = 15$ °C des enrobés ESG10, de l'enrobé 100% GBR et le modèle WLF de l'enrobé R0	93
Figure 4.4 Résultats dans le plan Cole-Cole des enrobés à l'étude	94
Figure 4.5 Résultats dans l'espace de Black des enrobés à l'étude	94

Figure 4.6 Courbes maîtresses 2S2P1D des enrobés à l'étude	95
Figure 4.7 Évolution de la norme du module complexe expérimental	96
Figure 4.8 Évolution des vides des éprouvettes d'essai MC	97
Figure 4.9 Plan Cole-Cole normalisé des enrobés ESG10 et 100% GBR	99
Figure 4.10 Évolution des composantes visqueuse, élastique et angle de phase du module complexe en fonction du taux de GBR à $25^\circ - 0,3 \text{ Hz}$ dans la zone 1	103
Figure 4.11 Évolution du ratio E2/E1 et angle de phase du module complexe en fonction du taux de GBR dans la zone 1	104
Figure 4.12 Évolution du ratio E2/E1 et angle de phase du module complexe en fonction du taux de GBR	106
Figure 4.13 Évolution du ratio E2/E1 et angle de phase du module complexe en fonction du taux de GBR	107
Figure 4.14 Évolution des coefficients DCT en fonction des paliers de température	110
Figure 4.15 Évolution du coefficient DCT en fonction du RBR	112
Figure 4.16 Évolution du coefficient DCT en fonction du RBR	113
Figure 4.17 Évolution des contraintes induites en fonction de la température des essais TSRST des enrobés de l'étude	115
Figure 4.18 Évolution des températures de rupture et Tg en fonction du RBR.....	117
Figure 4.19 Évolution de la température de rupture au TSRST et du ratio E2/E1 en fonction du taux de GBR.....	118
Figure 4.20 Relation entre la température de rupture au TSRST	119
Figure 4.21 Évolution de la perte de température de rupture à basse température en fonction du taux de GBR.....	120
Figure 5.1 Schéma illustrant le concept de la réserve de résistance en traction (RRT) et du reste de réserve de résistance en traction (RRRT)	125
Figure 5.2 Démarche expérimentale pour évaluer l'influence du GBR et du trafic sur la réserve de résistance en traction.....	126

Figure 5.3 Courbes granulométriques des enrobés ESG10 et 100% GBR des enrobés de l'étude et fuseau du ESG10 du MTMD	127
Figure 5.4 Configuration d'un essieu standard canadien (Meunier, 2012).....	129
Figure 5.5 Déformations horizontales déterminées avec Alizé à la basse de la couche de surface pour les enrobés de l'étude	130
Figure 5.6 Contraintes traction au centre des roues du jumelage déterminées avec Alizé (risque de 5%) à la surface de la chaussée pour les enrobés de l'étude.....	131
Figure 5.7 Évolution des contraintes de traction en fonction de la déformation lors de l'essai TD	132
Figure 5.8 Évolution de la résistance en traction des enrobés ESG10 et 100% GBR en fonction de la température	134
Figure 5.9 Évolution des contraintes d'essai TSRST et la résistance en traction des enrobés ESG10 et 100% GBR en fonction de la température.....	135
Figure 5.10 Photos des éprouvettes d'essai TD des enrobés R30 et R40	136
Figure 5.11 Évolution du module vitreux en fonction des vides d'air et modèles de régression linéaires des différentes méthodes d'analyse (Rowe et al.,2009)	139
Figure 5.12 Évolution de la norme du module complexe des enrobés R30 et R40 en fonction de la teneur en vides à 15 °C-10 Hz.....	142
Figure 5.13 Évolution du module corrigé des enrobés R30 et R40 en fonction de la teneur en vides à 15 °C-10 Hz	143
Figure 5.14 Évolution des contraintes effectives TSRST et contraintes maximales effectives TD des enrobés de l'étude.....	145
Figure 5.15 Évolution de la RRT des enrobés de l'étude	148
Figure 5.16 Évolution du RRRT des enrobés ESG10	151
Figure 6.1 Évolution des contraintes thermiques induites maximales et minimales des enrobés ESG10 de l'étude en fonction des cycles thermiques.....	155

Figure 6.2 Chemins de sollicitation possibles et courbes enveloppes des cycles de réponse obtenus en déformation imposée et contrainte imposée	158
Figure 6.3 Évolution de la rigidité des enrobés ESG10 de l'étude en fonction des cycles thermiques	163
Figure 6.4 Évolution de la variable D des enrobés ESG10 de l'étude en fonction des cycles thermiques	165

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2S2P1D	Combinaison de deux ressorts, deux patins et un amortisseur (<i>2 springs, 2 parabolic elements, 1 dashpot</i>)
AG	Analyse granulométrique
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
Dmm	Densité maximale du mélange
ESG 10	Enrobé Semi-Grenu 0/10mm
ÉTS	École de Technologie Supérieure
GBR	Granulat bitumineux récupéré
GNM	Grosseur Nominale Maximale
LC	Laboratoire des Chaussées
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
MC	Module Complexé
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
MLPC	Matériel du Laboratoire des Ponts et Chaussées
MTMD	Ministère des Transports et de la Mobilité durable
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
Ng	Nombre de giration
Pbi	Pourcentage de bitume initial
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PG	Grade de performance d'un bitume (<i>Performance Grade</i>)
RBR	Ratio de bitume recyclé
SARA	Saturé, Aromatique, Résine et Asphaltène

SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
TD	Traction directe
TSRST	<i>Thermal Stress Restrained Specimen Test</i>
VEL	Viscoélastique Linéaire
WLF	Loi de William – Landel – Ferry

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
°	Degré
°C	Degré Celsius
ω	Pulsation
α	Surface spécifique
φ	Angle de phase
β	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
δ	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
a _T	Facteur de translation
b (%)	Pourcentage de bitume d'ajout
σ	Contrainte
C ₁	Constante qui dépend du matériau testé pour la loi de WLF
C ₂	Constante qui dépend du matériau testé pour la loi de WLF
E*	Module complexe
E*	Norme du module complexe
E ₀	Module vitreux
E ₀₀	Module statique
E ₁	Composante élastique
E ₂	Composante visqueuse
f	Fréquence
g	Gramme
h	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D

Hz	Hertz
k	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
kg	Kilogramme
kN	Kilo Newton
Nf _{50%}	Nombre de cycles à la rupture associés à une perte de 50 % de la valeur du module initial
m	Mètre
mm	Millimètre
µm	Micromètre (10^{-6} m)
µdéf	Microdéformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)
MPa	Mégapascal
R ²	Coefficient de qualité d'une régression linéaire

INTRODUCTION

L'utilisation de granulats bitumineux récupérés (GBR) suscite aujourd'hui un intérêt particulier dans le secteur des matériaux bitumineux, en quête de solutions durables pour répondre aux exigences environnementales et réduire son empreinte écologique. Si l'utilisation du GBR dans la production de nouveaux enrobés bitumineux est une pratique bien établie au Québec, les quantités utilisées restent en deçà des pratiques observées ailleurs. Le ministère des Transports et de la Mobilité Durable du Québec (MTMD), responsable de la normalisation des matériaux de chaussée, reste prudent quant à l'ajout du GBR dans les enrobés de chaussées sous sa responsabilité, limitant les taux à 10% et 20% de GBR dans les couches de surface et de base des chaussées autoroutières, respectivement.

Cette limitation freine le développement de l'industrie des matériaux bitumineux vers des enrobés à fort taux de GBR, d'autant plus que les exigences municipales s'alignent majoritairement sur celles du MTMD. Selon ce dernier, ces limites sont justifiées par les conditions climatiques de la province, susceptibles de provoquer une fissuration transversale prématurée. Or, les performances à basse température des enrobés contenant plus de 20 % de GBR ne sont pas encore bien démontrées. De surcroit, la méthode de formulation n'est pas encore adaptée à l'utilisation de taux élevés de GBR en raison des exigences liées à la sélection du bitume d'apport et au volume de bitume effectif (V_{be}) nécessaires pour garantir les performances souhaitées des enrobés par le MTMD.

Un rapport récent de Bitume-Québec (2023) estime à plus de 4,55 millions de tonnes la quantité de GBR en inventaire au Québec, montrant que cette ressource est disponible et le restera longtemps grâce aux travaux d'entretien et de reconstruction. Cependant, le taux de recyclage annuel moyen est estimé à 14,8 %. Bien que la volonté de recycler soit présente, il faut des moyens et des efforts supplémentaires pour accroître ce taux.

Produire des enrobés performants contenant des quantités importantes de GBR implique de prendre en compte plusieurs aspects tels que la taille des particules de GBR, la quantité de

bitume qu'elles contiennent et leur degré de vieillissement, leur conditionnement avant introduction dans le malaxeur, et même leur origine. La température et la durée de malaxage sont également essentielles pour limiter la formation d'agrégats bitumineux (clusters) et assurer une bonne qualité des enrobés à fort taux de GBR (Bressi, Cavalli, et al., 2015). Le bitume du GBR, en raison de son niveau avancé d'oxydation, influence le comportement et les performances de l'enrobé recyclé, et cette influence est d'autant plus marquée que la quantité de GBR dans le mélange augmente. Malgré la prise en compte de ces divers aspects, le comportement et les performances à basse température restent mal compris.

Il est généralement admis que l'ajout de GBR augmente la rigidité et améliore les performances à l'orniérage, mais il pose des problèmes de performance à basse température et en fatigue (Tapsoba, 2012). En effet, un enrobé dont la rigidité augmente avec l'ajout de GBR devient également plus fragile à basse température à cause du bitume vieilli et oxydé du GBR. Ainsi, les enrobés à fort taux de GBR sont susceptibles de fissurer plus rapidement (Mogawer et al., 2012). Cependant, il a été observé que certains enrobés à fort taux de GBR ont des performances et une durée de vie similaires à celles des enrobés standards (Basuony, Perraton, & Carter, 2014; Copeland, 2011). Il est essentiel de bien comprendre le comportement et les performances à basse température si l'on souhaite maximiser les quantités de GBR autorisées dans les régions froides.

Pour accroître les connaissances sur le comportement et les performances des enrobés à fort taux de GBR et identifier le taux maximum de GBR utilisable dans le contexte climatique québécois, un projet d'optimisation de la formulation d'enrobés à haute teneur en granulats bitumineux récupérés pour régions froides a été lancé au laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) en partenariat avec le groupe BauVal Inc. Ce projet comporte deux parties : la première, centrée sur l'étude de la méthode de formulation pour enrobés à fort taux de GBR, et la seconde, qui fait l'objet de cette thèse, concerne la caractérisation du comportement et des performances à basse température des enrobés formulés dans la première partie. L'organisation de cette thèse est présentée dans la section suivante.

Les travaux de cette thèse ont débuté par une revue de la littérature, qui a orienté les objectifs et le choix des essais de caractérisation retenus pour atteindre les objectifs de cette thèse, structurée en six chapitres. La revue de la littérature est présentée au chapitre 1. Le chapitre 2 énonce les objectifs de la thèse. Le chapitre 3 présente la méthodologie de recherche, soit la démarche expérimentale suivie tout au long des travaux, et qui a permis la rédaction du présent document. Les différents matériaux utilisés pour produire les enrobés destinés aux divers essais y sont également décrits.

Le chapitre 4 est consacré à l'étude de l'évolution du comportement rhéologique, des propriétés thermiques et des performances au retrait thermique empêché avec l'ajout de GBR dans un enrobé ESG10. L'essai de module complexe dont les résultats ont été modélisés à l'aide du modèle rhéologique à spectre continu 2S2P1D a permis d'évaluer l'influence de l'ajout du GBR sur le comportement rhéologique. La mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique a permis de déterminer l'effet de l'ajout du GBR sur la capacité de déformation thermique de l'enrobé à l'étude. Finalement, l'influence de l'ajout de GBR sur les performances à la fissuration thermique a été évaluée par l'essai TSRST.

La caractérisation des performances à basse température des enrobés de l'étude a été complétée par un essai peu courant au Québec : l'essai de traction directe pour l'évaluation de la résistance en traction. Associé à l'essai TSRST, cet essai a permis de déterminer la réserve de résistance en traction des différents mélanges au chapitre 5. Ce chapitre a permis de cerner l'influence de l'ajout de GBR sur les performances à basse température de l'enrobé ESG10. Pour considérer l'effet du trafic sur les performances à basse température, une simulation du comportement à basse température de quatre enrobés de l'étude, en couche de surface, a été réalisée à l'aide de l'outil Alizé. L'effet du trafic a été pris en compte pour identifier son rôle dans l'apparition de la fissuration transversale. L'utilisation des enrobés de cette étude en couche de surface dans la simulation du comportement de la chaussée a révélé un gain de performance à basse température lié à l'ajout de GBR.

Enfin, le chapitre 6 explore la dégradation des performances à basse température des enrobés en les soumettant à un essai d'endommagement thermique, mise au point dans cette étude, où les mélanges subissent des cycles thermiques à basse température. Ce chapitre confirme le gain de résistance en traction à basse température, observé au chapitre 5, lié à l'ajout de GBR dans l'enrobé ESG10.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature de cette thèse vise à mieux cerner le contexte global de l'utilisation des granulats bitumineux récupérés (GBR) dans les enrobés nouvellement produits, ainsi que son influence sur le comportement et les performances de ces enrobés. Elle permettra également d'identifier les problèmes de performance liés à l'ajout de GBR dans les enrobés bitumineux, en particulier dans un climat tempéré comme celui du Québec.

1.1 Structure de chaussée et types de sollicitation

Il existe plusieurs types de chaussée différente les unes des autres par les couches composant leur structure. Les chaussées bitumineuses dont le revêtement est en enrobé bitumineux subit principalement deux types de sollicitation qui sont d'origine mécanique et thermique (Di Benedetto & Corté, 2005).

1.1.1 Structure d'une chaussée bitumineuse

Les chaussées bitumineuses (chaussée souple) sont des structures multicouches. En général, une chaussée se compose d'un revêtement, d'une fondation et d'une sous-fondation reposant sur un sol d'infrastructure (Saint-Laurent, 2006). La Figure 1.1 présente le principe du système multicouche des chaussées. Au Québec, le revêtement de la chaussée peut être réalisé en une seule couche ou en plusieurs couches : une couche de surface, une couche de liaison et une couche de base (Abbas & Lachance-Tremblay, 2023).

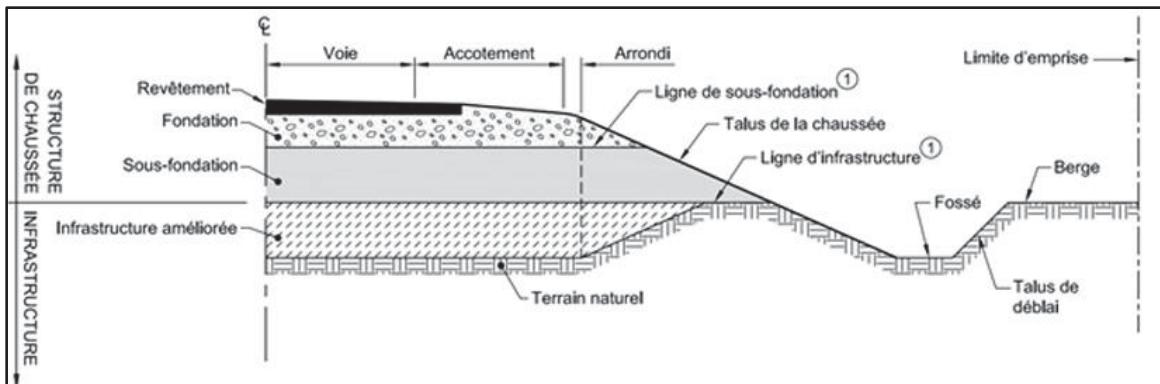


Figure 1.1 Structure de chaussée souple
Tirée de Abbas et Lachance-Tremblay (2023, p. 3) (adapté de Transports Québec (2020))

La couche de surface joue un rôle crucial dans le drainage de la chaussée et la réduction du bruit. Elle doit être sécuritaire et confortable pour les usagers tout en assurant la protection des couches sous-jacentes et l'intégrité globale de la chaussée. La couche de liaison, quant à elle, assure principalement le collage entre les couches de roulement et de base. Elle contribue également à l'étanchéité, à la protection thermique et limite les remontées de fissures. La couche de base joue un rôle plus structurant, supportant les charges, réduisant les contraintes transmises aux couches sous-jacentes et assurant la résistance à la fatigue du revêtement.

La fondation et la sous-fondation sont composées de matériaux granulaires non liés. La fondation réduit les contraintes transmises à la sous-fondation, tandis que la sous-fondation distribue les contraintes au sol d'infrastructure, assure le drainage de la chaussée et protège le sol des effets du gel (Rioux, 1993).

1.1.2 Les sollicitations

Les sollicitations causant des dégradations dans les chaussées sont principalement d'origine mécanique et thermique. Ces sollicitations, se manifestant sous forme de contraintes, entraînent des déformations des différentes couches de la chaussée.

1.1.2.1 Sollicitations mécaniques

Les sollicitations mécaniques proviennent du passage des véhicules (trafic). Les différentes couches de la chaussée sont comprimées par cette charge causant la déformation de la surface de la chaussée. Le passage répété des véhicules entraîne une accumulation de déformations permanentes qui est à l'origine de l'orniérage dans la chaussée. À la base des couches bitumineuses, le trafic induit des contraintes de traction, comme illustré à la Figure 1.2. La répétition de ces contraintes de traction sur des millions de cycles conduit à la fatigue du matériau et provoquant sa rupture (H. Di Benedetto & J. F. Corté, 2005a).

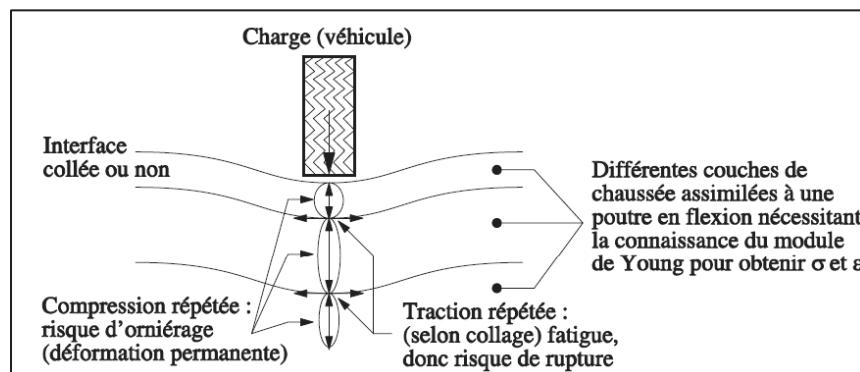


Figure 1.2 Schématisation des sollicitations induites par le trafic
Tirée de Di Benedetto et Corté (2005, p. 77)

1.1.2.2 Sollicitations thermiques

Les variations de température affectent le comportement des enrobés. Lorsque la température augmente, la rigidité des enrobés diminue, et à l'inverse, la rigidité augmente avec la baisse de température. Ces changements de température engendrent des contraintes et des déformations au sein des couches bitumineuses, liées à la capacité de dilatation-contraction des enrobés. Selon Di Benedetto et Corté (2005a), les baisses de température sont plus néfastes pour les chaussées, car elles induisent des contraintes de traction dans les couches en raison de leur retrait empêché dans la chaussée. La fissuration transversale apparaît lorsque la limite de résistance en traction de l'enrobé est dépassée, comme illustrée à la Figure 1.3. Ce mode de

fissuration thermique est le principal mode de dégradation des chaussées dans les pays à climat tempéré (Al-Qadi, Hassan, & Elseifi, 2005).

Yee, Aida, Hesp, Marks, et Tam (2006) ont observé que parfois, la fissuration transversale apparaissait dans les chaussées sans que la température critique basse ait été atteinte sur site. Les contraintes de traction peuvent également être induites dans les matériaux bitumineux par des cycles thermiques répétitifs, conduisant à la fissuration par fatigue thermique (Al-Qadi et al., 2005; Glaoui, Merbouh, Van de Ven, Chailleux, & Youcef, 2012).

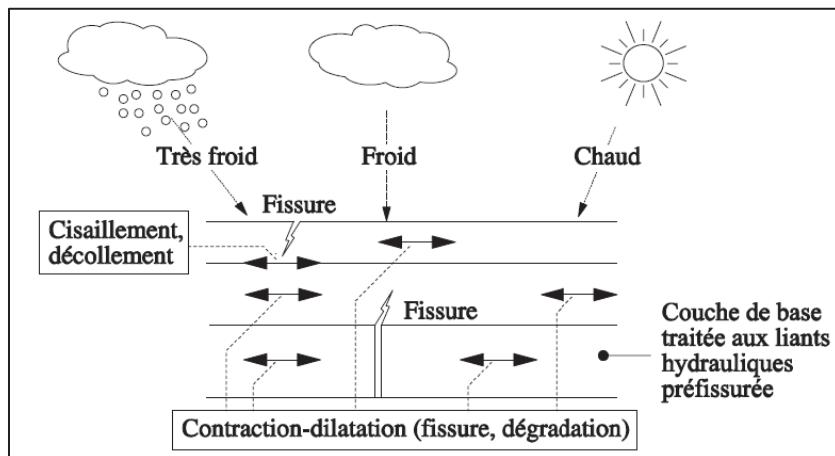


Figure 1.3 Schématisation des sollicitations induites par la température
Tirée de Di Benedetto & Corté (2005, p. 78)

1.2 Enrobé bitumineux

Un enrobé bitumineux est un matériau de chaussée constitué d'un mélange uniforme de granulats de différentes classes et de bitume. En termes de proportions, les granulats représentent environ 95% de la masse totale de l'enrobé, tandis que le bitume en constitue 5% (Di Benedetto & Corté, 2004). Bien que la proportion de bitume soit faible, il joue un rôle déterminant dans le comportement rhéologique, les performances à la fatigue et à la fissuration thermique, ainsi que dans la résistance à l'orniérage des enrobés. Les enrobés bitumineux sont utilisés dans les couches de revêtement de la chaussée. Au Québec, le revêtement d'une chaussée est principalement composé de deux couches : une couche de surface et une couche

de base (MTMD, 2005). Lorsque la chaussée est faiblement sollicitée (faible trafic), le revêtement peut être constitué d'une seule couche. Ainsi, selon sa position dans la chaussée, l'enrobé bitumineux possède une composition bien définie.

1.2.1 Les types d'enrobé bitumineux

Le Québec dispose de plusieurs types d'enrobés bitumineux à chaud et à froid normalisés. Les enrobés bitumineux à chaud, qui nous intéressent particulièrement, sont formulés selon la méthode du Laboratoire des Chaussées (LC) du MTMD (2005). Ces différents enrobés sont utilisés pour les travaux de construction, de reconstruction, de réfection et d'entretien. Il existe ainsi des enrobés pour couche de surface, couche de base, couche de correction et pour des travaux de rapiéçage. Le choix d'un type spécifique d'enrobé se fait sur la base de critères et de paramètres définis par la norme 4202. Ces critères et paramètres sont présentés dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Critères de sélection du type d'enrobé bitumineux
Tiré de (MTMD, 2023)

USAGE PERFORMANCE ET ÉPAISSEUR	TYPE D'ENROBÉ									
	GB-20	ESG-14	ESG-10	EG-10	EGM-10	MUN-10	EC-10	EC-5	EG-5	ESG-5
USAGE (1 : Sous réserve 2 : Adapté 3 : Recommandé)										
Chaussée										
Couche de base	3	2								3 ^(A)
Couche unique		3								
Couche de surface	1 ^(B,C)	2	3	3	3	3 ^(D)	1 ^(B,C)		3 ^(B,E)	
Couche de correction			2				3			
Couche de correction - Dévers	3	3	3				3			
Rapiéçage mécanisé			3				3			
Rapiéçage manuel							3	2 ^(F)		
Voie cyclable						3	3 ^(G)			
Ouvrage d'art										
Couche de surface			3	2 ^(H)					3 ^(B,E)	
Couche de correction			3				3			
Rapiéçage mécanisé sous la membrane							3			
Rapiéçage manuel sous la membrane							3			
Enrobé temporaire			3							
PERFORMANCE* (1 : Passable 2 : Moyenne 3 : Bonne 4 : Très bonne)										
Adhérence	3	3	3	4	4	3	1	N/A	3	N/A
Résistance à l'orniérage	4	3	3	3	3	2	2	1	3	N/A
Résistance à la fissuration	1	2	3	3	2	3	3	3	3	4
Résistance à l'arrachement	2	3	4	4	2	4	3	3	4	N/A
Réduction du bruit pneu-chaussée	N/A	2	3	3	3	N/A	N/A	N/A	3	N/A
ÉPAISSEUR DE POSE (mm)										
Minimale	80	60	40	40	30 ^(I)	40	20	10	25	50
Optimale	100	70	60	50	40	50	30	20	30	60
Maximale	120	80	70	60	50	60	40	30	40	70

Pour satisfaire aux exigences de performances énoncées au Tableau 1.1, le choix des constituants (granulats composant le squelette et le type de bitume) de l'enrobé bitumineux se fait conformément à la norme 4202 du MTMD, tout dépendamment du type de route, du niveau de trafic, de la position de l'enrobé dans la chaussée et de la zone climatique. Ainsi, le choix des composants du squelette minéral se fait suivant le Tableau 1.2. Trois types de route sont définis par le MTMD avec trois classes de trafic associées à chacun en termes de débit journalier moyen annuel (DJMA) ou exprimés en équivalent de charge axiale simple (ÉCAS). Ainsi, selon le débit de circulation, la performance à l'orniérage est exigée pour l'enrobé. Des caractéristiques intrinsèques sont également exigées pour les catégories de granulats.

Le choix de la classe de bitume se fait sur la base de zone climatique. Trois zones ont été ainsi définies par le MTMD et représentées par les couleurs rouge, jaune et verte pour les zones 1, 2 et 3 respectivement comme illustrées par la Figure 1.4.

Tableau 1.2 Choix des composants de l'enrobé
Tiré de MTMD (2023, p. 1)

Type de route	Débit de circulation		Couche de surface					Couche de base et autre couche						
	DJMA	ECAS annuel	Bitume ³			Catégorie gros granulats	Catégorie granulats fins	Essai exigé	Bitume ³			Catégorie gros granulats	Catégorie granulats fins	Essai exigé
			Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG				Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG			
Autoroute	> 20 000	> 1 000 000	64E-28 ⁴	58E-34	S.O.	1a	1	Orniéreur, CPP	64E-28	58E-34	S.O.	2c	1	Orniéreur
	< 20 000 > 5 000	< 1 000 000 > 500 000	64E-28	58E-34	S.O.	1a	1	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	S.O.	3c	1	Orniéreur
	< 5 000	< 500 000	64E-28	58E-34	S.O.	2b	1	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	S.O.	3c	2	Orniéreur
Nationale	> 20 000	> 500 000	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ⁵	1a	1	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	52V-40	3c	1	Orniéreur
	< 20 000 > 5 000	< 500 000 > 300 000	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ⁵	2b	2	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
	< 5 000	< 300 000	64H-28	58H-34	52V-40 58H-34 ⁵	3c	2		64H-28	58H-34	52V-40	3c	2	
Régionale et collective	> 20 000	> 300 000	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ⁵	2b	1	Orniéreur, CPP	64H-28	58H-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
	< 20 000 > 5 000	< 300 000 > 150 000	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ⁵	3b	2	Orniéreur	64H-28	58H-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
	< 5 000	< 150 000	64H-28 ⁶	58H-34 58S-28 ⁵	52V-40 58H-34 ⁵	3c	2		58S-28	58H-34	52V-40	3c	2	

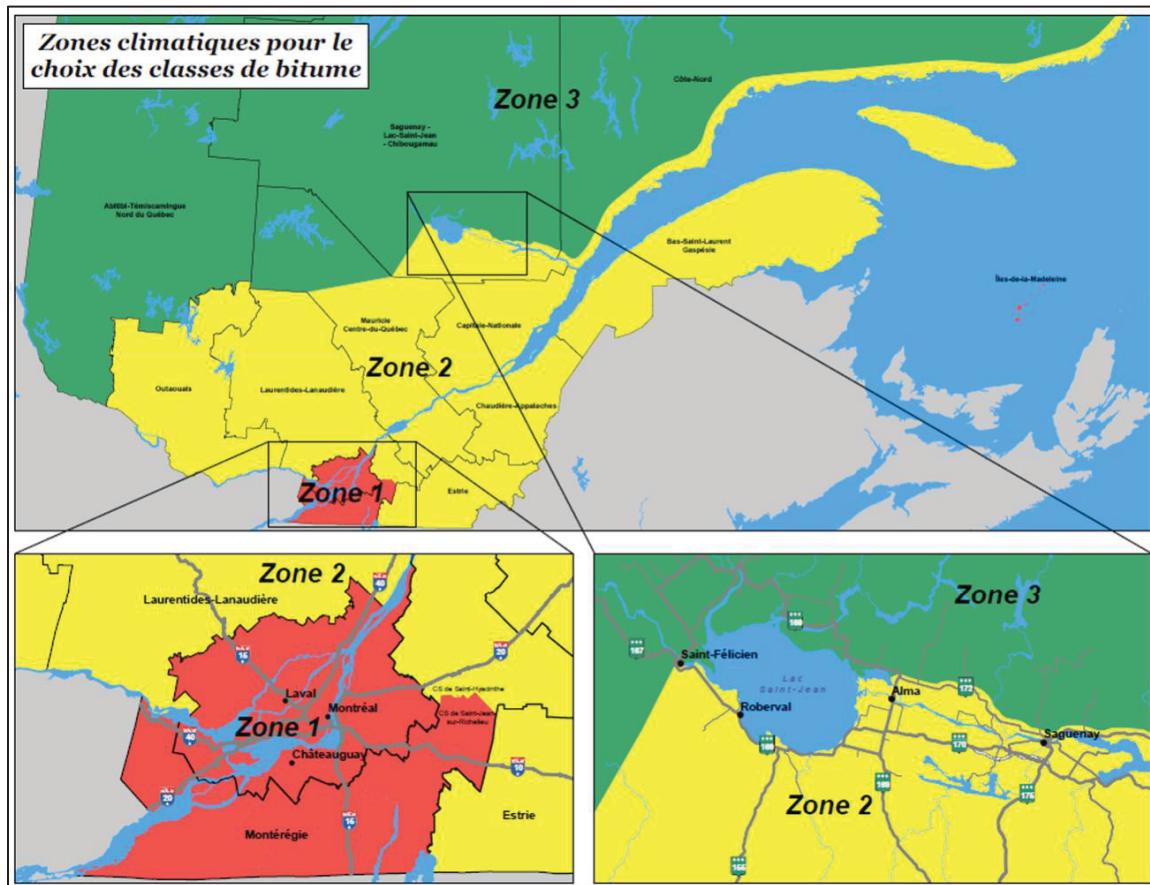


Figure 1.4 Zones climatiques pour le choix des classes de bitume
Tirée de MTMD (2023, p. 2)

Ces exigences du MTMD sur la composition du squelette granulaire et de classe de performance du bitume permettent ainsi de garantir les meilleures performances aux enrobés formulés selon la méthode du laboratoire des chaussées (LC).

1.2.2 Les granulats

Le squelette granulaire des enrobés bitumineux au Québec est constitué de plusieurs classes granulaires d'origine naturelle, dont les différentes fractions sont définies par une taille minimale (d) et une taille maximale (D). Chaque classe doit satisfaire à l'exigence de $D/d \geq 1,4$. Les différentes fractions sont classées par catégorie, en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et aux chocs. Ces catégories sont définies dans les Tableaux 2101-2 à 2101-4 de la norme 2101 du MTMD. En plus des exigences liées aux caractéristiques intrinsèques, le squelette granulaire des enrobés au Québec doit respecter les fuseaux granulaires et présenter une bonne affinité avec le type de bitume sélectionné (MTMD, 2005).

L'utilisation de granulats à forte angularité permet d'augmenter la stabilité du squelette granulaire, et lorsque les granulats ont un très grand nombre de contacts entre eux, les enrobés présentent une meilleure résistance à l'orniérage. Les granulats ont peu d'impact sur la résistance des enrobés à la fissuration thermique et à la fatigue. Toutefois, le guide de formulation des enrobés MTMD (2005) indique que les enrobés offrant la meilleure résistance à la fissuration contiennent le moins possible de granulats supérieurs à 5 mm.

1.2.3 Bitume

Le bitume utilisé dans la fabrication des enrobés est un matériau hydrocarboné de composition complexe, obtenu par distillation sous vide du pétrole brut. Lesueur (2002) définit les bitumes comme étant des mélanges complexes d'hydrocarbures ayant des compositions chimiques variables (dépendant de l'origine du brut) mais des structures similaires. Ainsi, il n'existe pas de formule chimique unique pour définir la composition des bitumes (Robertson et al., 1991).

Son rôle principal dans les enrobés est d'assurer la cohésion et la durabilité du matériau face aux diverses sollicitations.

1.2.3.1 Classification des bitumes au Québec

La classification des bitumes utilisés au Québec est basée sur le système SUPERPAVE, développé aux États-Unis dans le cadre du programme SHRP (Strategic Highway Research Program). En 2019, le système de classification du MTMD a évolué. L'ancien système classait les bitumes par grade de performance à haute et basse température sous la nomenclature PG H-L. Le nouveau système associe à l'ancien, l'essai MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*), un outil prédictif de la résistance à l'orniérage des bitumes (Leclerc, 2018). Ainsi, la nouvelle désignation des bitumes au Québec est PG Hn-L. Le n désigne le niveau de résistance à la sollicitation du trafic et peut être défini comme étant S (standard), H (élévé), V (très élevé), E (extrême) ou U (ultime) avec les exigences indiquées au Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Exigences pour le contrôle des bitumes de la norme 4101 du MTMD
(Tableau 4101-02)

Paramètre	Classe de performance						Méthode d'essai							
	PG 52n-34	PG 52n-40	PG 58n-28	PG 58n-34	PG 64n-28	PG 64n-34								
Bitume d'origine														
DSR 10 rad/s, à T°C	52 °C	52 °C	58 °C	58 °C	64 °C	64 °C								
G*/sinδ	≥ 1,00 kPa						AASHTO T315							
BBR temps de charge 60 s, à T°C	-24 °C	-30 °C	-18 °C	-24 °C	-18 °C	-24 °C	AASHTO T313							
Module de rigidité S _c (60)	≤ S _{max} ⁽¹⁾													
Pente m _c (60)	≥ 0,350	≥ 0,350	≥ 0,400	≥ 0,350	≥ 0,400	≥ 0,350								
Bitume vieilli à court terme (RTFOT)⁽²⁾														
MSCR à T°C	52 °C	52 °C	58 °C	58 °C	64 °C	64 °C	AASHTO T350							
Jnr _{3,2}	n = S	≤ 4,50 kPa ⁻¹												
	n = H	≤ 2,00 kPa ⁻¹												
	n = V	≤ 1,00 kPa ⁻¹												
	n = E	≤ 0,50 kPa ⁻¹												
	n = U	≤ 0,15 kPa ⁻¹												
Jnr _{diff} ⁽³⁾	75 % max.													
R _{3,2} ⁽⁴⁾	≥ 29,371 Jnr _{3,2} ^{-0,263}													

Les diverses classes de bitume indiquées dans le Tableau 1.3 sont utilisées dans les chaussées au Québec. Ces bitumes sont exposés à toutes les sollicitations existantes dans la chaussée et finiront par vieillir complètement au terme de leur durée de vie.

1.2.3.2 Vieillissement du bitume

Lors de la fabrication des enrobés bitumineux et durant leur période de service, les enrobés sont soumis à une combinaison de conditions thermiques et mécaniques qui entraînent des modifications au niveau du bitume. On parle alors de vieillissement du bitume, qui se traduit par une augmentation de la rigidité de l'enrobé. Le vieillissement des bitumes se produit sur le plan physicochimique et peut être divisé en deux types principaux : le vieillissement à court terme, qui se produit pendant le processus de construction, et le vieillissement à long terme, qui survient tout au long de la vie de la chaussée (Petersen, 2009).

Le vieillissement à court terme se produit principalement pendant le malaxage et la mise en œuvre de l'enrobé. L'oxydation est le processus principal, où le contact avec l'air chaud entraîne la formation de composés oxygénés comme les sulfoxydes et les cétones. Le vieillissement sur le plan physique se produit lors de la production et de la mise en œuvre de l'enrobé (Airey, 2003). Le chauffage rend une partie de la phase malténique du bitume soluble. Cette partie soluble est plus facilement absorbée par le squelette granulaire, ce qui modifie ainsi la concentration des différentes phases de la matrice du bitume. Les facteurs qui influencent le vieillissement à court terme (physique) du bitume sont sa teneur dans le mélange, la nature des granulats, la granulométrique, les vides après compactage et les facteurs liés à la production, la température et le temps (Lu & Isacsson, 2002).

Le vieillissement à long terme se manifeste sous l'effet des conditions climatiques et du trafic routier. Les rayons UV, l'oxygène, et les cycles de température jouent un rôle crucial en provoquant l'oxydation et la perte de composants volatils, ce qui rigidifie le bitume. C'est un processus complexe et irréversible qui implique différents phénomènes : fragmentation, addition d'oxygène et condensation ou carbonisation (Das, Balieu, Kringos, & Birgisson, 2015; Petersen, 2009). Ces phénomènes surviennent lorsque l'oxygène atmosphérique atteint la matrice du bitume et se diffuse dans celle-ci. Le vieillissement du bitume est influencé par plusieurs facteurs tels que sa composition chimique, les conditions climatiques et par le trafic. La composition chimique initiale du bitume influence grandement son vieillissement. Les bitumes riches en résines et en asphaltènes sont généralement plus résistants au vieillissement oxydatif. Les conditions climatiques, notamment les températures extrêmes et l'exposition aux UV, accélèrent le processus de vieillissement. Les routes situées dans des climats chauds et ensoleillés montrent des signes de vieillissement plus rapidement que celles dans des climats plus tempérés.

Le vieillissement du bitume est un phénomène complexe et continu influencé par des facteurs chimiques, environnementaux et mécaniques. Il entraîne une évolution des propriétés des enrobés, en conséquence, l'enrobé durcit et ses performances en termes d'orniérage, de fatigue,

de fissuration thermique et de sensibilité à l'eau sont impactées (Woo, Chowdhury, & Glover, 2008). À la fin de leur vie utile dans la chaussée, les enrobés vieillis peuvent être récupérés et, dans certains cas, réutilisés en partie ou en totalité pour la production de nouveaux enrobés.

1.2.4 Enrobés recyclés à chaud

Un enrobé recyclé est un mélange bitumineux composé de granulats neufs, d'un bitume neuf ou encore appelé bitume d'apport et de granulats bitumineux récupérés obtenus par le broyage et le concassage d'anciennes couches bitumineuses des chaussées existantes. Il existe deux procédés permettant de produire des enrobés recyclés à chaud : le recyclage à chaud en place et en centrale (MTQ, 1982). Le recyclage à chaud en place est spécifiquement utilisé pour les travaux de réhabilitation des chaussées existantes. En revanche, le recyclage en centrale est employé à la fois pour les nouvelles constructions et pour la réhabilitation des chaussées.

1.2.4.1 Granulats bitumineux récupérés (GBR)

Le GBR est un matériau obtenu par le fraisage et le décohésionnement des couches d'enrobé bitumineux des chaussées après leur période de service. Il se compose de pierres usagées possédant des caractéristiques intrinsèques résiduelles nécessaires à leur réutilisation, ainsi que de bitume vieilli et complètement rigide. L'utilisation du GBR dans les enrobés remonte aux années 1930, lorsque la hausse des prix du pétrole a favorisé son essor (Basuony et al., 2014). Dans les années 1970, le GBR a été utilisé en grande quantité. Aux États-Unis, les teneurs les plus élevées de GBR dans les mélanges atteignaient les 80% (McDaniel, Shah, Huber, & Copeland, 2012). Cependant, l'usage de fort taux de GBR est devenu moins courant quand le bitume est redevenu facilement accessible (Huang, Shu, & Vukosavljevic, 2011). L'avènement de la méthode de formulation Superpave, qui base la formulation sur le concept de maniabilité et de la performance de l'enrobé dans le temps, a grandement contribué au recul l'utilisation du GBR dans les enrobés et à une limitation des quantités (Copeland, 2011). La méthode Superpave a également permis de prendre en compte le bitume présent dans le GBR dans la formule finale des enrobés, introduisant ainsi les notions de bitume mobilisé ou actif du GBR et de ratio de bitume recyclé (RBR).

1.2.4.2 Mobilisation du bitume du GBR et ratio de bitume recyclé (RBR)

Le GBR est constitué d'un bitume oxydé qui a complètement vieilli au cours de sa période de service. Lorsque le GBR est utilisé dans les enrobés à chaud, les conditions de production (température et malaxage) permettent de réactiver le bitume présent dans le GBR. Ce bitume activé peut être pris en compte en partie ou en totalité dans la formule finale du mélange bitumineux. Selon Navaro et al. (2012), l'activation ou la mobilisation du bitume du GBR est fortement influencée par la température de malaxage et moins sa durée. Cette observation est confirmée par Kaseer, Arámbula-Mercado, et Martin (2019), qui ont également noté que l'utilisation de régénérateur aide à l'activation du bitume de GBR. La source de GBR jouerait aussi un rôle selon les auteurs.

Le degré de mobilisation du bitume du GBR est le rapport en pourcentage de la quantité de bitume activée par la quantité de bitume dans le GBR (Sreeram, Leng, Zhang, & Padhan, 2018; Zhao, Huang, Shu, & Woods, 2015). Il dépend des paramètres cités précédemment pour activer le bitumé du GBR et de la quantité de GBR dans le mélange. La norme 4202 du MTMD considère un degré de mobilisation de 100% pour les GBR incorporés dans ses enrobés pour un taux de recyclage maximum de 20%. Cette valeur a été récemment confirmée par les travaux de Daoudi et Carter (2021). Selon les travaux de Zhao et al. (2015), pour des taux de GBR compris entre 24 et 80%, les degrés de mobilisation varient de 73 à 24%. Une baisse du degré de mobilisation est ainsi observée avec l'augmentation du taux de GBR. Plusieurs autres valeurs de degré de mobilisation sont disponibles dans la littérature et dépendent surtout de la méthode d'estimation utilisée par les auteurs.

Le degré de mobilisation du bitume de GBR permet de déterminer la quantité de bitume recyclé dans la formule finale. Cette quantité de bitume recyclé sert au calcul du ratio de bitume recyclé (RBR) qui est le rapport du pourcentage de bitume recyclé par le pourcentage de bitume total dans le mélange bitumineux (Stroup-Gardiner, 2016). Daoudi et Carter (2021) au terme de leurs travaux recommandent au MTMD l'utilisation du paramètre RBR en remplacement du

taux de GBR dans les enrobés recyclés. Ce qui pourrait permettre de recycler davantage tout en atteignant les objectifs de performances cibles. Cependant, les performances des enrobés contenant du GBR dépendent de la qualité du mélange final. Un autre phénomène, la formation d'agrégats bitumineux, intervient dans la production d'enrobés recyclés et influence leurs performances.

1.2.4.3 Formation d'agrégats bitumineux (clusters)

L'agrégat bitumineux, ou cluster, est un regroupement de particules qui se produit lors de la production d'enrobé bitumineux contenant du GBR. La formation de clusters dans l'enrobé recyclé influence ses performances. Plusieurs auteurs (Bressi, Dumont, & Pittet, 2015; Navaro, 2011; V. H. Nguyen, 2009) se sont intéressés au phénomène et aux conditions nécessaires à leur formation. Les conditions favorisant la formation de clusters sont :

- ✓ la quantité de GBR à incorporer,
- ✓ le conditionnement,
- ✓ la taille du GBR, et
- ✓ les conditions de production (température et durée de malaxage).

La formation de clusters est un phénomène observé exclusivement dans les enrobés à fort taux de GBR. Lorsque le taux de GBR dans l'enrobé dépasse 20 %, la formation de clusters est possible. Le conditionnement du GBR avant son introduction dans l'unité de malaxage peut jouer un rôle crucial. Ainsi, le GBR introduit humide directement dans le malaxeur favorise la formation de clusters. À l'inverse, le séchage et le chauffage préalable du GBR avant le malaxage aident à limiter la présence de clusters dans l'enrobé recyclé.

Selon Nguyen (2009), la taille des particules du GBR influence la formation de clusters dans le mélange recyclé. Le GBR grossier est plus susceptible de former des agrégats que le GBR plus fin. Bressi, Dumont, et al. (2015) soulignent également l'importance de la taille des particules de GBR dans la formation de clusters dans les enrobés recyclés à fort taux. Contrairement à l'observation de Nguyen (2009), ils observent que le GBR fin ($D < 8 \text{ mm}$)

contribue davantage à la formation d'agrégats bitumineux que le GBR grossier. Selon eux, le GBR grossier aide à réduire la formation de clusters dans le mélange recyclé.

Les travaux de Navaro (2011) ont mis en évidence l'importance de la température et de la durée de malaxage sur la formation d'agrégats bitumineux dans la fabrication d'enrobés recyclés à fort taux de GBR. Il a observé que la quantité d'agrégats bitumineux présente dans un mélange recyclé malaxé à 160 °C pendant 20 secondes serait approximativement la même que pour un mélange malaxé à 130 °C pendant 70 secondes. La durée de malaxage passe à 120 secondes si le mélange est malaxé à 110 °C, tel qu'illustrer à la Figure 1.5 qui montre l'évolution de l'indicateur A_t (%) de degré de mélange caractérisant de présence d'amas dans le mélange recyclé.

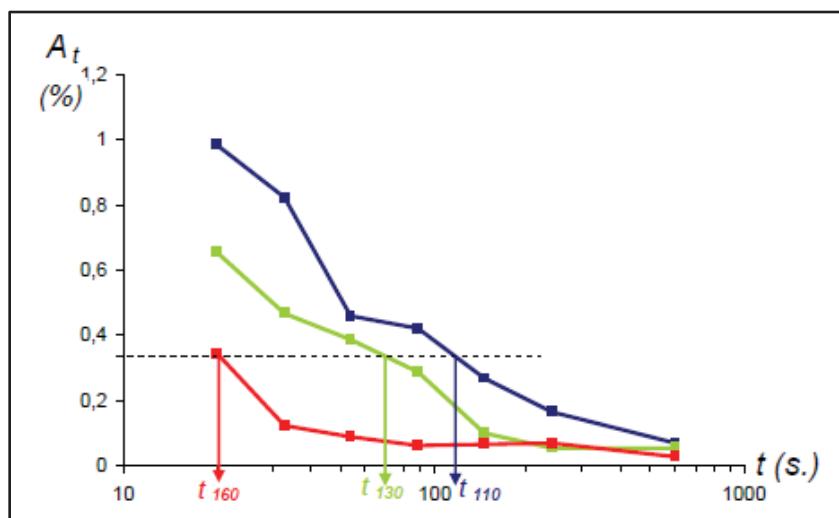


Figure 1.5 Évolution de la quantité de clusters dans les enrobés recyclés
Tirée de Navaro (2011, p. 94)

Ainsi, une augmentation de la température et de la durée de malaxage permet de réduire considérablement la formation des agrégats d'enrobé dans les mélanges à fort taux de GBR. Les travaux de Bressi, Dumont, et al. (2015) ont confirmé l'importance de la température de fabrication des enrobés recyclés à forte teneur en GBR sur le processus de formation des agrégats bitumineux. Les températures de 160 °C et 180 °C éliminent la présence d'agrégats bitumineux dans le mélange recyclé. Toutefois, selon l'équipe de recherche, une température

de mélange de 180 °C favoriserait l'évaporation des huiles légères dans le liant, ce qui ne serait donc pas idéal pour les enrobés incorporants du GBR. La perte des huiles légères entraîne une augmentation de la viscosité, rendant le mélange plus rigide et augmentant sa fragilité. Cela se traduit également par une diminution de la capacité de réparation du bitume.

L'augmentation de la température de malaxage dans les limites acceptables est avantageuse pour les enrobés recyclés, car elle favorise la diffusion entre les bitumes (bitume du GBR et d'apport) présents dans le mélange. Cette diffusion a un effet positif sur la qualité souhaitée pour l'enrobé recyclé.

1.2.4.4 Phénomène de diffusion dans les enrobés recyclés

Lors de la fabrication d'un enrobé recyclé, des phénomènes complexes d'interpénétration appelés diffusion se produisent entre le bitume neuf et le bitume vieillis du GBR. À l'interface entre le bitume neuf et le bitume vieilli, les maltènes (composants légers du bitume) et les asphaltènes (composants lourds) migrent du bitume neuf vers celui du GBR (Ding, Huang, Shu, Zhang, & Woods, 2016). La qualité de la diffusion à cette interface est cruciale pour la cohésion et la performance de l'enrobé recyclé (Karlsson, Isacsson, & Ekblad, 2007). Aux températures de malaxage de l'enrobé recyclé, la vitesse de diffusion est élevée, car les liants sont fluidifiés avec des viscosités faibles. Cette diffusion entre les deux bitumes se poursuit durant le transport et la mise en place et est facilitée par la température.

Selon Kriz et al. (2014), après la mise en place de l'enrobé recyclé, la diffusion du bitume neuf dans celui du GBR serait d'environ 90 % pour le procédé à chaud et de 65 % pour le procédé tiède. La diffusion se poursuivrait des mois, voire des années après la mise en place, pour atteindre un mélange total entre les deux bitumes. Dans le cas du recyclage à froid, on peut supposer que la diffusion dans les mélanges à froid est faible ou quasi nulle après le malaxage et la mise en place. Une possibilité de diffusion dans le recyclage à froid entre le bitume neuf et le bitume du GBR durant le malaxage, le transport et le compactage serait liée à la fraction

légère du bitume neuf. Cependant, une fois en place, le trafic et les conditions climatiques pourraient favoriser la diffusion entre les liants neuf et vieilli.

D'autres auteurs (Druta, Wang, & Zhu, 2009; Huang, Li, Vukosavljevic, Shu, & Egan, 2005; Karlsson & Isacsson, 2003; Yang et al., 2018) ont étudié le degré de mélange des liants neuf et vieilli. Ils ont observé qu'une particule de GBR dans le mélange recyclé était enrobée d'un bitume déposé en plusieurs couches. En moyenne, les auteurs ont observé trois couches : une couche externe, une couche intermédiaire et une couche interne. Les propriétés varient pour ces trois couches, allant des caractéristiques du bitume neuf à celles du bitume vieilli, ce qui montre que l'interpénétration du bitume neuf dans le bitume vieilli est grandement facilitée par la température.

1.2.4.5 Taux de recyclage au Québec

L'utilisation du GBR est une pratique bien établie au Québec. Aujourd'hui, les GBR sont systématiquement utilisés dans la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux du moins dans beaucoup d'états. Les quantités de GBR utilisées dans les enrobés recyclés sont importantes, mais peuvent encore être augmentées pour maximiser les bénéfices économiques et environnementaux.

Selon les régions, la quantité permise de granulats GBR varie considérablement. Le Tableau 1.4 présente quelques taux de recyclage utilisés au Québec, dans certains états au Canada et aux États-Unis, ainsi qu'en France. On constate que des quantités importantes de GBR sont utilisées dans le monde, mais qu'au Québec, le taux de recyclage est inférieur à celui d'autres régions.

Selon le rapport de sondage de Bitume Québec, le taux annuel moyen d'utilisation de GBR dans les enrobés au Québec est en augmentation. Entre 2021 et 2023, ce taux est passé de 12,9 % à 14,8 % (Bitume-Québec, 2023).

En France, bien que le taux de recyclage présenté dans le Tableau 1.4 soit limité à 40 %, des taux atteignant 65 % de GBR dans les mélanges sont permis, à condition de disposer d'un gisement de GBR homogène et bien identifié (SERFASS, 2008).

Les limites d'utilisation des taux de recyclage au Québec sont en grande partie liées aux conditions climatiques (hivers très froids et longs), ainsi qu'aux aspects techniques de production des enrobés recyclés en centrale. En effet, la capacité d'incorporation du GBR dans les centrales standards, sans ajustement préalable, est d'environ 20 % (Abed, Thom, & Presti, 2018; Bitume-Québec, 2016; Zaumanis, Mallick, & Frank, 2016). À ces deux premiers aspects de limitation du taux de GBR, s'ajoutent les performances à la fissuration, qui ne sont pas encore clairement démontrées.

Tableau 1.4 Taux de GBR permis par différents états
Adapté de Applied Research Associates (2020)

États	Taux de GBR permis
Québec	10% couche de surface 20% couche de base
Ontario	20% couche de surface 40% couche de base
France	10 à 40% dans les couches de roulement, liaison et assise
Alberta	30% couche de surface 30% couche de base
Saskatchewan	20% en contribution du bitume
Minnesota	30% ratio bitume GBR et bitume neuf
New York	20% couche de surface 30% couche de base
Manitoba	15% couche de surface 25% couche de base
Vermont	< 20% PG 70-28 20 à 30% PG 70-34
New Hampshire	15 à 20% couche de base et intermédiaire
Maine	10 à 30% selon le type d'enrobé

1.3 Méthode de formulation des enrobés au Québec

La formulation des enrobés est un domaine crucial en génie civil, particulièrement pour la construction et l'entretien des infrastructures routières. Dans le monde, plusieurs méthodes et approches sont utilisées pour la formulation des enrobés bitumineux. Les règles de formulation

sont propres à chaque pays, car elles dépendent des exigences techniques, du trafic et des conditions climatiques. Cependant, le principe de formulation demeure le même pour la sélection des constituants et la caractérisation du mélange.

La méthode de formulation des enrobés utilisée au Québec est celle développée par le laboratoire des chaussées (LC) du MTMD sur la base des lacunes identifiées des méthodes courantes utilisées en France et en Amérique du Nord. Cette méthode combine ainsi les principes Superpave et ceux de la méthode française (Langlois, 1999). La formulation des enrobés en France est basée sur des méthodologies normalisées pour assurer la qualité et la durabilité des revêtements routiers, conformément à la norme européenne NF EN 13108-1 2007. Deux approches principales sont utilisées : l'approche empirique, qui se base sur la performance des recettes de mélange, et l'approche fondamentale, plus courante, qui repose sur des prescriptions limites de composition et des essais fondamentaux. Le choix des matériaux, comme le squelette granulaire et le bitume, est crucial et dépend des conditions climatiques, du trafic, et du type de projet (Delorme, Wendling, & De la Roche, 2007). En Amérique du Nord, la formulation des enrobés repose sur deux concepts principaux : les méthodes volumétriques (Marshall et Superpave) et les méthodes empiriques, encadrées par des normes définies par l'AASHTO et la FHWA. Parmi les méthodes couramment utilisées, la méthode Superpave, développée dans les années 1990, est la plus répandue et se base sur des essais de performance pour adapter les enrobés aux conditions climatiques et au trafic. Les méthodes Marshall et Hveem, plus traditionnelles, continuent d'être utilisées dans certains contextes spécifiques (Asphalt-Institute, 2015; D'Angelo, 2001; Leiva-Villacorta, West, & Brown, 2019). La méthode de formulation LC est une approche en deux étapes. Dans un premier temps, elle impose une exigence volumétrique sur le volume de bitume effectif (V_{be}) et optimise l'aptitude au compactage à l'aide de la presse à cisaillement giratoire (PCG). Dans un second temps, la validation de la formulation est réalisée en évaluant la résistance à l'orniérage. Le cheminement pour formuler un enrobé selon la méthode LC est illustré à la Figure 1.6.

L'optimisation de la granulométrie du squelette minéral de l'enrobé pour répondre aux spécifications des vides interstitiels (V_i) à la PCG est réalisée de manière à respecter le fuseau granulaire fixé par le MTMD pour chaque type d'enrobé, avec un V_{be} également unique à chaque type enrobé. Une fois le type d'enrobé à formuler choisi ou connu, la démarche de la méthode de formulation LC, telle que schématisée à la Figure 1.6, commence par le choix des classes granulaires et leurs proportions respectives, tout en exigeant des caractéristiques intrinsèques aux granulats des diverses classes. Ensuite viennent les étapes de calcul des caractéristiques du combiné granulaire (densité brute et apparente, pourcentage d'absorption et pourcentage de bitume initial). Le calcul du pourcentage de bitume initial (P_{bi}) nécessite le choix préalable du type de bitume, déterminé en fonction de la zone climatique définie par le MTMD. À ce stade de la méthode de formulation, la durabilité de l'enrobé est vérifiée par l'essai de tenue à l'eau, réalisé selon la méthode d'essai LC 26-001.

Au niveau 2, la résistance à l'orniérage du mélange formulé est vérifiée à l'aide de la méthode d'essai LC 26-410 permettant ainsi d'assurer les caractéristiques thermomécaniques souhaitées.

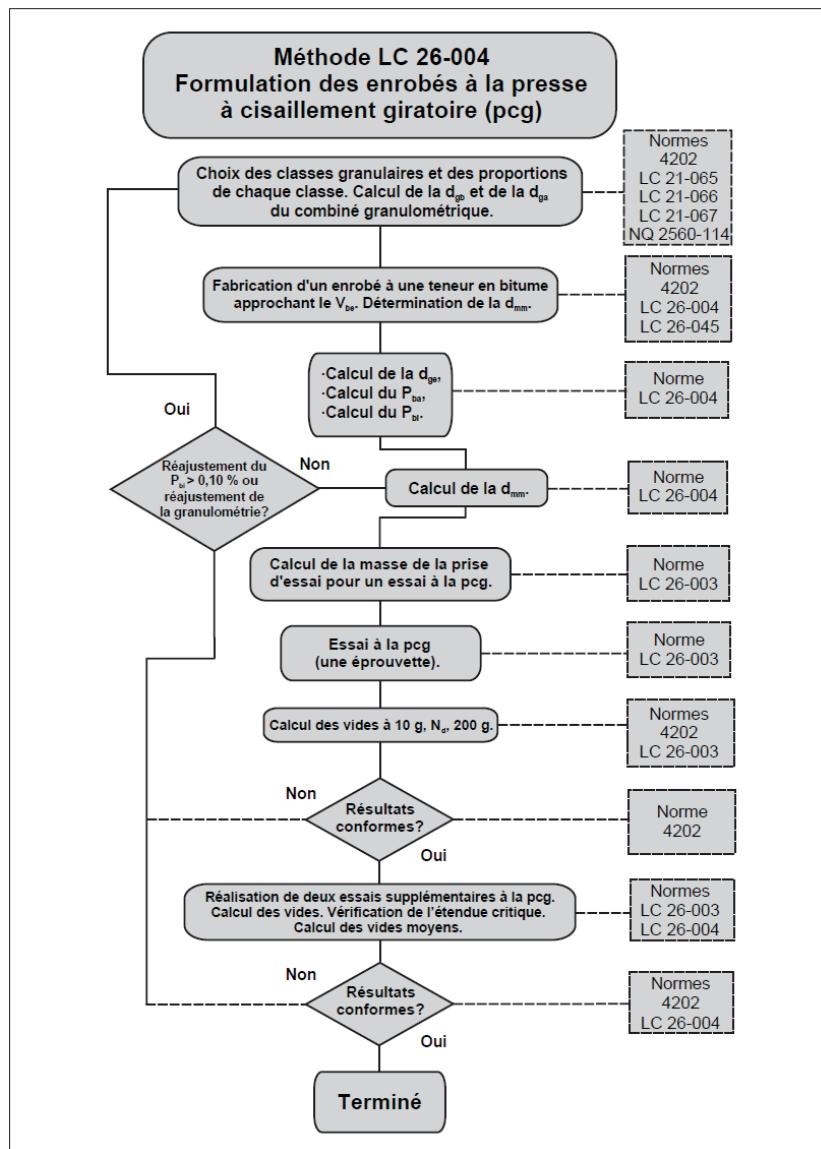


Figure 1.6 Cheminement pour la formulation LC
Tirée de MTMD (2005, p. 50)

La formulation des enrobés est un domaine en constante évolution, avec des avancées technologiques et des approches innovantes visant à améliorer la performance et la durabilité des chaussées. Les méthodes classiques comme Marshall et Superpave restent des références importantes, mais des innovations telles que les enrobés tièdes et le recyclage jouent un rôle de plus en plus crucial dans le développement durable des chaussées et les méthodes de

formulations ne sont pas nécessairement adaptées. Les méthodes de caractérisation doivent également s'ajuster pour répondre aux innovations dans les matériaux bitumineux.

1.4 Essais de Caractérisation des enrobés et influence de l'ajout du GBR

L'utilisation des GBR dans les enrobés au Québec est limitée à de faibles taux en raison d'une compréhension encore limitée des phénomènes physiques et chimiques dans les mélanges recyclés contenant des quantités importantes de GBR. Les travaux de recherche ont montré que les enrobés à fort taux de GBR présentaient des modules de rigidité élevés et un meilleur comportement à l'orniérage. Le bitume vieilli du GBR, étant oxydé, est beaucoup plus rigide. En se mélangeant avec le bitume neuf, il en résulte un mélange recyclé plus rigide que celui sans GBR. La rigidité augmente avec l'augmentation du taux de GBR, ce qui entraîne une augmentation du module et une amélioration de la résistance à l'orniérage du mélange. En revanche, les performances à basse température sont moins bonnes.

Tam, Joseph, et Lynch (1991) ont observé une augmentation de la sensibilité à la fissuration thermique des enrobés à fort taux de GBR. D'autres études (Huang et al., 2011; Mogawer et al., 2012; Nazzal et al., 2017; Noferini, Simone, Sangiorgi, & Mazzotta, 2017) ont constaté la même tendance à mesure que le taux de GBR augmentait dans les mélanges étudiés. Toutefois, les travaux du groupe de recherche du département des transports de l'Illinois (Al-Qadi, Aurangzeb, Carpenter, Pine, & Trepanier, 2012) ont montré que des enrobés recyclés à 50 % de GBR présentaient de très bonnes performances en fatigue, et qu'une sélection adéquate du grade de bitume d'apport permettait également de bonnes performances à la fissuration thermique.

D'autres auteurs ont également montré que les enrobés recyclés à fort taux de GBR étaient une perspective prometteuse et qu'il était nécessaire de pousser les recherches pour mieux comprendre les différents comportements observés. En effet, les enrobés recyclés à fort taux de recyclage peuvent très bien performer lorsque les phénomènes permettant d'obtenir un mélange homogène sont pris en compte lors de la formulation.

1.4.1 Comportement des enrobés

Les enrobés bitumineux sont considérés comme des matériaux homogènes et isotropes, dont le comportement est en grande partie lié à leur composition. Cependant, leur performance dépend également du type de sollicitation à laquelle ils doivent faire face. On distingue deux principaux types de sollicitations pour les enrobés : les sollicitations thermiques et mécaniques. Di Benedetto et Corté (2005a) ont identifié, pour une température de référence fixe et en tenant compte du nombre de cycles de chargement ainsi que de l'amplitude de la déformation, l'existence de quatre types de comportement, dont les domaines sont illustrés à la Figure 1.7. Selon cette figure, le comportement d'un enrobé se définit en fonction du nombre de cycles de chargement et de l'amplitude de déformation correspondante. Ainsi, pour un faible nombre de cycles de chargement et des déformations élevées, le comportement est non linéaire. Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations faibles, le comportement est viscoélastique linéaire. Pour des chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et de faibles déformations, on observe la fatigue et sous un grand nombre de cycles de chargements à une température élevée, l'orniérage apparaît.

L'utilisation du GBR dans la fabrication de nouveaux mélanges bitumineux peut influencer de manière positive ou négative ces différents types de comportements. Dans le cas du comportement viscoélastique linéaire, qui est établi à l'aide du module complexe, l'ajout du GBR dans les enrobés conduit à une augmentation du module (Al-Qadi et al., 2012; Baaj, Ech, Tapsoba, Sauzeat, & Di Benedetto, 2013; Huang et al., 2011; Imaninasab, Loria-Salazar, & Carter, 2023; Mogawer et al., 2012). Pour la fissuration à basse température, l'ajout du GBR se traduit par une baisse des performances des enrobés et l'apparition de fissurations prématuées (Basuony et al., 2014; Huang et al., 2011). Cette baisse de performance est également observée dans certains cas pour le comportement à la fatigue. En revanche, une amélioration de la résistance à l'orniérage est obtenue avec l'ajout du GBR dans les enrobés.

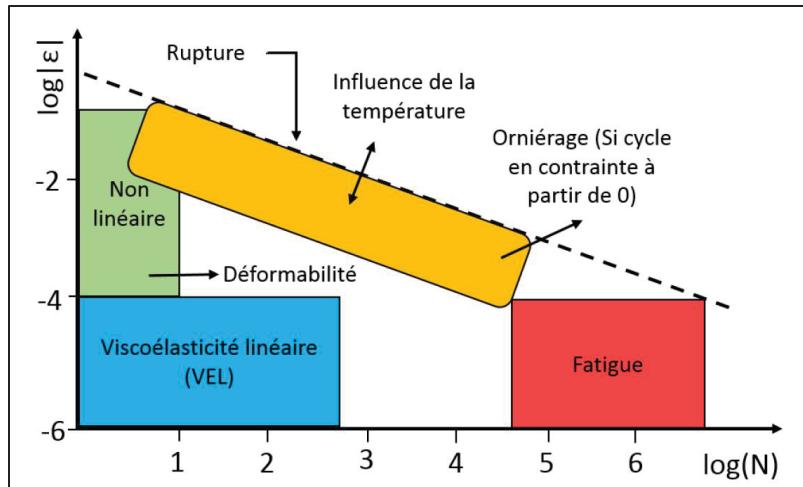


Figure 1.7 Domaines des types de comportement d'un enrobé
Tirée de Pedraza (2018, p. 39), adaptée de Di Benedetto & Corté (2005)

Pour évaluer le comportement d'un enrobé et l'influence possible de l'ajout du GBR, des essais thermomécaniques sont réalisés en laboratoire.

1.4.2 Comportement viscoélastique linéaire

1.4.2.1 Essai module complexe

Les enrobés bitumineux présentent un comportement viscoélastique linéaire (VEL), car leur réponse à une sollicitation composée respecte le principe de superposition de Boltzmann. Ce comportement est étudié en laboratoire à l'aide de l'essai de module complexe. Le module complexe (E^*) est l'expression de la rigidité d'un matériau bitumineux sous chargement cyclique (Di Benedetto et Corté, 2005). Il est caractérisé par sa norme, le module de rigidité du matériau et l'angle de phase. Le module de rigidité est un indicateur du degré de cohésion au sein de la structure d'un matériau. Pour un enrobé bitumineux, le degré de cohésion varie en fonction de la température et de la fréquence de chargement (Carter & Perraton, 2002a).

Selon Di Benedetto et Corté (2005), le module complexe peut être défini, tel qu'illustré à la Figure 1.8, comme le rapport entre l'amplitude complexe d'une contrainte sinusoïdale de pulsation ω ($\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$), et l'amplitude complexe de la déformation sinusoïdale qui en

résulte ($\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$) en régime établi (Figure 1.8). L'angle de phase du module complexe est un paramètre important qui traduit le comportement élastique ou visqueux de l'enrobé bitumineux. Cet angle a fait l'objet de plusieurs études (Oshone, Dave, Daniel, & Rowe, 2017; G. Rowe, 2009) et varie entre 0 et 90 degrés. Il est obtenu à partir du décalage temporel entre les valeurs maximales des signaux de déformation et de contrainte suivant l'équation (1.1).

$$\varphi = 2\pi f \Delta t \quad (1.1)$$

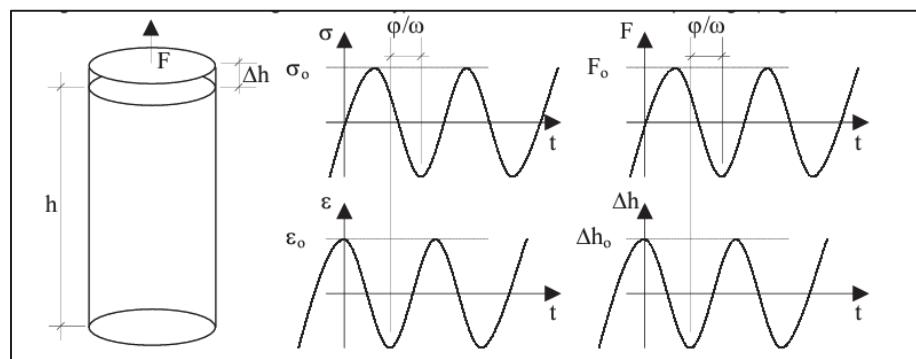


Figure 1.8 Définition du module complexe
Tirée de Carter et Perraton (2002, p. 4)

Le module complexe est défini sous la forme :

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

Où

- E^* module complexe ;
- $|E^*|$ norme du module complexe ;
- σ_0 amplitude de contrainte ;
- ε_0 amplitude de déformation ;
- ω pulsation ($2\pi f$) (rad/s) ;
- φ angle de phase ($\varphi = \omega * t$) ;

- i partie imaginaire d'un nombre complexe ($i^2 = -1$) ;
- t temps caractéristique.

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

En résumé, le module complexe et son angle de phase fournissent des informations cruciales sur le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux, permettant ainsi d'évaluer leur performance sous diverses conditions de charge et de température. La modélisation des résultats de module complexe en comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé est faite à l'aide de modèles rhéologiques.

1.4.2.2 Modèles rhéologiques

Le comportement viscoélastique linéaire (VEL) des enrobés bitumineux peut être modélisé à l'aide d'assemblages discrets de ressorts et d'amortisseurs. Divers modèles rhéologiques analogues existent pour décrire ce comportement. Ces modèles sont montrés au Tableau 1.5.

Les modèles de base :

1. Modèle de Maxwell :

- Composition : Ressort et amortisseur en série.
- Représentation : Liquide viscoélastique.
- Limitation : Ne décrit pas correctement le comportement VEL des enrobés.

2. Modèle de Kelvin-Voigt :

- Composition : Ressort et amortisseur en parallèle.
- Représentation : Solide viscoélastique.
- Limitation : Ne décrit pas correctement le comportement VEL des enrobés.

Pour améliorer la description du comportement VEL, les modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt ont été généralisés. Ces généralisations incluent les modèles à spectre continu, constitué d'un nombre infini d'éléments des modèles initiaux. Ce qui améliore la modélisation du comportement VEL des mélanges bitumineux (Olard, 2003).

Par la suite, Huet (1963) a proposé un modèle analogique à spectre continu à trois éléments (1 ressort et 2 éléments à fluage parabolique) permettant une meilleure modélisation du comportement VEL, mais moins bien représenté dans le domaine des basses fréquences et hautes températures. Ce problème a été corrigé par le modèle de Huet-Sayegh par ajout d'un ressort de faible rigidité en parallèle aux éléments du modèle de Huet.

L'amélioration par la suite du modèle de Huet-Sayegh par Olard et Di Benedetto (2003) par ajout d'un amortisseur linéaire à ce dernier a donné le modèle 2S2P1D. Le modèle 2S2P1D est un puissant outil de modélisation qui permet de décrire le comportement viscoélastique linéaire aussi bien du liant que des mastics et enrobés bitumineux (Di Benedetto, Mondher, Sauzéat, & Olard, 2007). Il nécessite sept paramètres pour la calibration du modèle aux données expérimentales comme montré à la Figure 1.9.

Tableau 1.5 Représentation des modèles rhéologiques
Adapté de Alvaro Pedraza (2018) et Tran (2020)

Nom du modèle	Représentation du modèle	Équation du module complexe
Maxwell		$E^*(\omega) = E \frac{i\omega\tau}{1+i\omega\tau} = \frac{E \omega^2 \eta^2 + i E^2 \omega \eta}{E^2 + \omega^2 \eta^2}$
Kelvin-Voigt		$E^*(\omega) = E + i\omega\eta$
Huet		$E^*(\omega) = \frac{E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$
Huet-Sayegh		$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$
2S2P1D		$E^*(i\omega\tau_E) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + \delta(i\omega\tau_E)^{-h} + \delta(i\omega\beta\tau_E)^{-1}}$

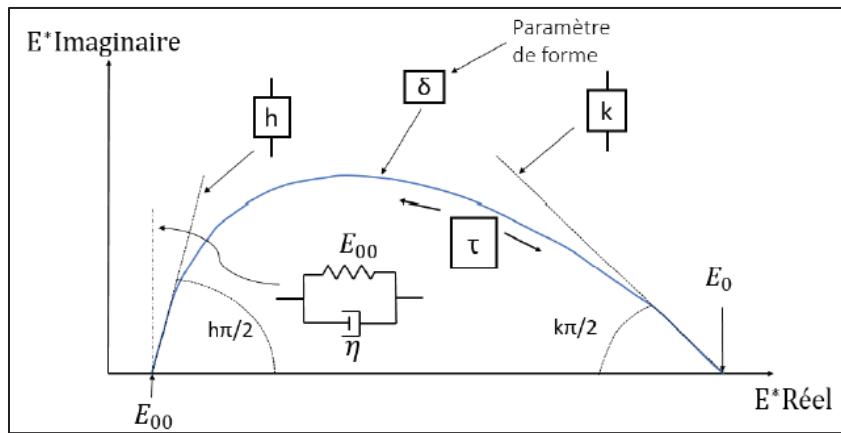


Figure 1.9 Paramètres de calage 2S2P1D
Tirée de Pedraza (2018, p. 51), adaptée de Olard & Di Benedetto (2003)

Les paramètres montrés au Tableau 1-5 et à la Figure 1-9 sont les suivants :

h, k, δ : paramètres des éléments paraboliques, tels que $0 < k < h < 1$; ce sont des éléments à fluage parabolique calibrés dans le plan de Cole-Cole. k est la pente à basse température. h est la pente à haute température. δ est le facteur de forme, il a une influence sur le maximum de la courbe. Selon (A Pedraza, Di Benedetto, Sauzéat, & Pouget, 2019), ses paramètres sont peu influencés par l'ajout du GBR.

E_0 : module vitreux quand $\omega \rightarrow \infty$; pour les fréquences très élevées, le module tend vers un nombre réel (angle de phase nul). Le comportement du matériau tend vers un comportement purement élastique dans le plan Cole-Cole. Le paramètre est lié au squelette granulaire et à la teneur en vides influence sa valeur (A Pedraza et al., 2019).

E_{00} : module statique quand $\omega \rightarrow 0$; $E_{00} > 0$ pour les enrobés bitumineux. Le comportement tend alors vers celui d'un matériau purement élastique.

η : viscosité newtonienne avec $\eta = (E_{00} - E_0)\beta\tau_E$. Le paramètre β du modèle 2S2P1D permet de caractériser le comportement visqueux pur des bitumes à haute température. Plus β est élevée, plus la viscosité η du modèle est élevée, et donc plus le module complexe est élevé (Nguyen, 2009).

τ_E : temps caractéristique, dont la valeur varie uniquement avec la température et qui rend compte du principe d'équivalence classique entre fréquence et température. Il est ajusté à chaque isotherme T . La loi WLF permet de suivre l'évolution de τ_E en fonction de la température lorsque le principe d'équivalence temps-température est vérifié.

Les modèles offrent une compréhension précise et détaillée du comportement viscoélastique des enrobés bitumineux, permettant d'optimiser leur formulation et leur performance sous diverses conditions de chargement et de température. Ces deux paramètres influencent grandement le comportement des enrobés bitumineux.

1.4.2.3 Principe d'équivalence temps-température

Le comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux dépend à la fois de la température et de la fréquence de sollicitation (pulsation ω). Selon Carter et Perraton (2002b), un résultat de module complexe n'a de signification que lorsqu'il est associé à une température et à une fréquence spécifiques. Pour un enrobé bitumineux, l'augmentation de la fréquence de sollicitation est équivalente à une diminution de la température. De même, une augmentation de la température correspond à une diminution de la fréquence de sollicitation. Ce principe est défini comme le principe d'équivalence temps-température (PETT).

Le PETT permet de transposer les résultats obtenus à une température donnée T à une température de référence T_{ref} , en déterminant les fréquences équivalentes. Cette transposition est rendue possible grâce aux coefficients de translation a_T , définis par la relation de Williams, Landel et Ferry (WLF) (Nguyen, Di Benedetto, & Sauzéat, 2013) :

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{(T-T_{ref})+C_2} \quad (1.3)$$

Où :

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

Le PETT permet ainsi d'obtenir à partir des résultats des isothermes, à une température de référence (T_{ref}), une courbe unique appelée courbe maîtresse. Cette courbe est très utile pour prévoir les caractéristiques rhéologiques dans des domaines de température-fréquence inaccessibles expérimentalement. La Figure 1.10 illustre la construction de courbes maîtresses ((a) norme du MC et (b) angle de phase) à partir des isothermes et coefficients a_T .

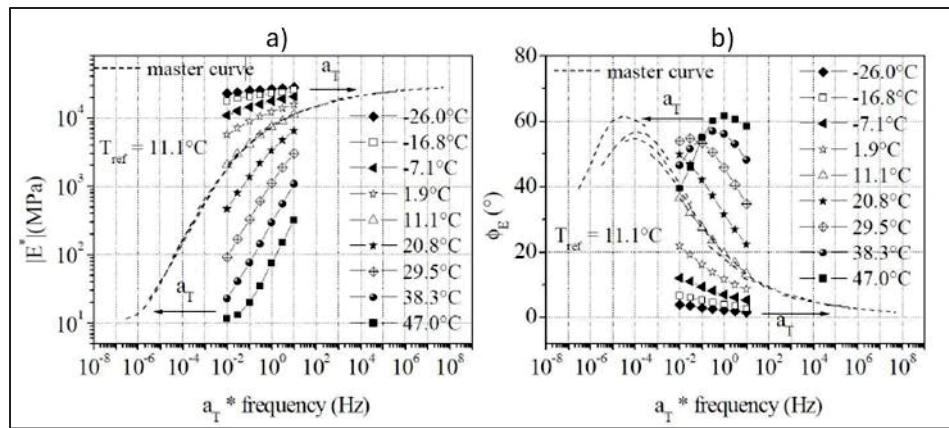


Figure 1.10 Construction de courbes maîtresses par translation des isothermes à T_{ref}

a) norme de E^* et b) angle de phase de E^*

Adaptée de Tran (2020, p. 46)

1.4.2.4 Représentation graphique des résultats de module complexe

Les résultats de module complexe sont représentés sous diverses formes graphiques permettant de visualiser le comportement viscoélastique linéaire (VEL). Les représentations graphiques courantes des résultats de module complexe comprennent la courbe maîtresse, le plan Cole-Cole et l'espace de Black (Carter & Perraton, 2002; Di Benedetto & Corté, 2005).

- Courbe maîtresse : Il s'agit d'une courbe isotherme à une température de référence, montrant l'évolution de la norme du module complexe par rapport à une plage de fréquences étendue.
- Plan Cole-Cole : C'est un plan complexe représentant le module complexe indépendamment du couple température-fréquence, construit à partir de la partie réelle (E_1) et de la partie imaginaire (E_2) du module complexe. Si le PETT s'applique, les résultats d'essai forment une courbe unique.
- Espace de Black : Cette représentation montre la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de l'angle de phase φ . Elle permet de visualiser la zone des modules faibles et la diminution de l'angle de phase à haute température. Comme le plan Cole-Cole, lorsque le matériau respecte le PETT, les points expérimentaux suivent une courbe unique.

1.4.2.5 Paramètres de formulation influençant le module complexe

Les différents paramètres de composition de l'enrobé bitumineux influençant la rigidité sont le liant, les granulats, les fines et la teneur en vides (Moutier, 1991; Moutier, Duan, & Chauvin, 1988).

- Liant : Une augmentation de sa teneur entraîne une augmentation du module jusqu'à une valeur optimale, au-delà de laquelle le module diminue. La nature du liant influence également la norme du module ainsi que la susceptibilité thermique et cinétique de l'enrobé.
- Granulats et fines : La rigidité de l'enrobé bitumineux dépend beaucoup du squelette granulaire à faibles fréquences et hautes températures. Les fines améliorent la qualité du mastic, augmentant ainsi les caractéristiques mécaniques de l'enrobé jusqu'à une certaine teneur, après quoi les caractéristiques diminuent.
- Teneur en vides : La diminution de la teneur en vides entraîne une augmentation de la rigidité et une diminution de la susceptibilité à la température (Doucet & Auger, 2010a; Hofko, Blab, & Mader, 2012).
- L'utilisation de GBR entraîne une augmentation de la rigidité du module complexe.

Ces paramètres de formulation sont cruciaux pour optimiser les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux, permettant ainsi d'obtenir des performances adaptées aux conditions d'utilisation prévues.

Les résultats de module complexe sont influencés par les vides des éprouvettes surtout pour les basses températures. Une normalisation permet de se défaire de cette influence des vides, mais également des effets de la granulométrie sur les résultats expérimentaux. Dans le plan Cole-Cole, les résultats normalisés sont déterminés avec les équations (1.4) et (1.5) (Nguyen et al., 2013).

$$E^* \text{ Réel normalisé} = \frac{E_{Réel}^* - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (1.4)$$

$$E^* \text{ Imaginaire normalisé} = \frac{E_{Ima.}^* - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (1.5)$$

La normalisation peut se faire pour toutes les formes de présentation graphique du module complexe permettant une analyse de meilleure qualité du comportement VEL.

1.4.3 Propriétés thermiques des enrobés

Les enrobés bitumineux, constituant les chaussées, sont soumis quotidiennement à des sollicitations mécaniques et thermiques, conduisant à des réponses spécifiques du matériau.

1.4.3.1 Réponses aux sollicitations thermiques

La réponse des enrobés aux sollicitations thermiques se traduit par une dilatation ou une contraction du matériau. Lorsque les températures baissent, la capacité des enrobés à se contracter est cruciale pour éviter les fissurations thermiques. Les enrobés peuvent se fissurer lorsque les contraintes thermiques excèdent leur capacité à résister à ces baisses de température. Ainsi, la capacité des enrobés à se dilater ou se contracter sous l'effet des variations de température se traduit sous forme de coefficient.

1.4.3.2 Coefficient de dilatation/contraction thermique

Le coefficient de dilatation/contraction thermique (DCT) est une propriété clé qui décrit le potentiel de déformation thermique des enrobés (Islam & Tarefder, 2015). Ce coefficient varie en fonction de la température d'essai et est plus stable en dessous de la température de transition vitreuse (T_g) et sa mesure est moins précise pour les hautes températures à cause du phénomène de fluage (Di Benedetto & Corté, 2005). Les variations qu'on observe entre le coefficient de dilatation et celui de contraction pour un même palier de température témoignent

de l'anisotropie des enrobés (Di Benedetto & Corté, 2005; Islam & Tarefder, 2015; Olard, 2003).

1.4.3.3 Variabilité du coefficient DCT

Les coefficients DCT observés dans la littérature varient considérablement :

- Lamothe (2014) mentionne dans sa revue littéraire des valeurs de coefficient DCT variant de 3 à 34 $\mu\text{def}^{\circ}\text{C}$ en dilatation et 13 à 59 $\mu\text{def}^{\circ}\text{C}$ en contraction pour les enrobés bitumineux.
- Islam et Tarefder (2015) ont obtenu pour l'ensemble des mélanges étudiés des coefficients variant de 0,2 à 28 $\mu\text{def}^{\circ}\text{C}$ en dilatation et 1,9 à 33,8 $\mu\text{def}^{\circ}\text{C}$ en contraction.

Cette variabilité témoigne de l'anisotropie des enrobés et est influencée par plusieurs facteurs tels que la proportion de bitume, la nature des granulats, et le sens de la variation de température (dilatation ou contraction).

1.4.3.4 Influence des constituants

Le coefficient DCT est principalement influencé par la proportion de bitume dans le mélange, la nature des granulats, et le sens de la variation de température (Xu & Solaimanian, 2008) :

- Proportions des Constituants : Notamment la proportion de bitume, qui est un facteur crucial.
- Nature des granulats : La nature des granulats joue un rôle significatif.
- Teneur en vides et granulométrie : Selon Islam (2015), ces facteurs n'ont pas d'influence significative sur le coefficient DCT.

1.4.3.5 Impact du GBR

Il y a peu d'études sur l'influence de l'ajout du GBR sur les coefficients DCT. Teguedi (2017) a conclu que l'ajout de 20% à 40% de GBR n'avait pas d'effet clair sur le coefficient DCT, tandis que l'enrobé à 100% de GBR présentait un coefficient DCT plus élevé.

1.4.3.6 Importance du coefficient DCT

Le coefficient DCT est crucial, car il traduit le potentiel de déformation thermique des enrobés et permet également de comprendre comment les sollicitations thermiques se traduisent en sollicitations mécaniques. Les variations de température induisent des contraintes thermiques dans la chaussée, et lors de baisses de température, des contraintes de traction apparaissent en raison du retrait empêché du matériau dans la chaussée.

La compréhension du comportement thermique à travers les coefficients DCT des enrobés bitumineux est essentielle pour concevoir des chaussées durables, surtout dans les régions où les variations de température sont importantes. L'optimisation des formulations et l'incorporation judicieuse de GBR peuvent améliorer les performances des enrobés bitumineux.

1.4.4 Étude du comportement à basse température

1.4.4.1 Essai de retrait thermique empêché

Pour évaluer le comportement des enrobés bitumineux à basse température, des essais en laboratoire comme le Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) sont utilisés. Cet essai simule les conditions thermiques sur site, particulièrement les sollicitations qui causent les fissures transversales, une forme majeure de dégradation des chaussées dans les climats tempérés (DLC, 2004; Lukánen, 2011; Rys, Judycki, Pszczola, Jaczewski, & Mejlun, 2017; Tran, 2020).

1.4.4.2 Méthodologie du TSRST

- **Principe de l'essai**

L'essai consiste à soumettre une éprouvette dont les conditions aux limites empêchent toute déformation à une baisse de température avec une vitesse de refroidissement contrôlée. Lors de l'essai TSRST, la contrainte augmente avec la baisse de la température, représentant ainsi

la contrainte induite dans le matériau. La fissuration survient lorsque cette contrainte atteint la résistance en traction de l'enrobé à une température donnée.

- Norme de Réalisation

Cet essai est réalisé suivant la norme AASHTO TP10-98.

- Vitesse de Refroidissement

Une vitesse de refroidissement de 10 °C/h est couramment utilisée pour éviter le développement de gradients thermiques au sein de l'éprouvette.

Les conditions d'essai provoquent des contraintes de traction dues au retrait empêché. Pour les enrobés sans GBR, les éprouvettes se brisent lorsque la température basse critique du bitume est dépassée.

1.4.4.3 Influence du GBR sur le TSRST

L'ajout de GBR dans les enrobés tend à diminuer les performances de résistance à la fissuration, augmentant ainsi la température de rupture à basse température (Basueny et al., 2014; Huang et al., 2011). Cependant, des études montrent des résultats variés. En analysant les modules de relaxation, Stimilli, Virgili, Canestrari, et Bahia (2017) ont constaté que les enrobés à 40% de GBR, avec une teneur en bitume plus élevée et une granulométrie contrôlée, présentaient de meilleures performances à basse température que les mélanges avec 25% de GBR.

Rhéomètre à Flexion de Poutre (BBR), utilisé pour évaluer le potentiel de fissuration à basse température des liants, cet essai montre également une augmentation de la température critique basse avec l'ajout de GBR. Singh et Girimath (2016) notent que l'ajout de 25% de GBR ne change pas significativement la température critique basse du bitume.

Lu et Isacsson (2001) rapportent une bonne corrélation entre les résultats du BBR et la température de rupture au TSRST, bien que l'essai BBR ne soit pas suffisant pour prédire la

fissuration thermique des chaussées, le type de granulat jouant également un rôle crucial (Badeli, Bilodeau, Carter, & Perraton, 2018; Marasteanu et al., 2007).

1.4.4.4 Paramètres clés du TSRST

Les paramètres principaux évalués dans l'essai TSRST incluent :

- Température de Rupture : La température à laquelle l'éprouvette se fissure.
- Contrainte de Rupture : La contrainte au moment de la fissuration.
- Pentes d'évolution de la contrainte en phase linéaire ($dT/d\sigma$) : Indiquant la variation de la contrainte avec la température.
- Température de transition vitreuse (T_g) : La température où le matériau passe d'un comportement rigide à un comportement viscoélastique.

La Figure 1.11 montre un exemple de détermination des paramètres d'un essai TSRST. Les pentes sont calculées avec l'équation (1.6) :

$$\text{Pente (kPa/}^{\circ}\text{ C)} = \frac{\sigma_f - \sigma_i}{T_f - T_i} \quad (1.6)$$

Où

σ_f et σ_i : contrainte finale et contrainte initiale de la section de la courbe concernée

T_f et T_i : Température finale et température initiale de la section de la courbe concernée

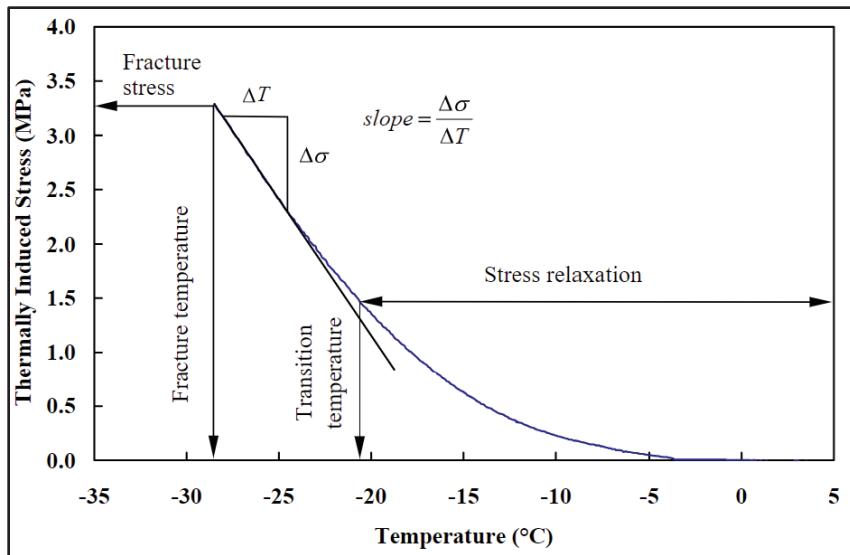


Figure 1.11 Analyse des résultats d'un essai TSRST
Tirée de Lu et Isacsson (2001, p. 38)

Ces paramètres permettent de mieux décrire le comportement des enrobés bitumineux sous sollicitations thermiques. Les essais en laboratoire, tels que le TSRST, sont essentiels, mais dans les basses températures, d'autres essais sont pris en compte pour compléter la caractérisation des performances assurant ainsi une meilleure conception et durabilité des chaussées.

1.4.5 Résistance en traction des enrobés

Le passage des véhicules sur une chaussée applique une force verticale sur celle-ci, induisant des contraintes de compression et de traction (H. Di Benedetto & J. F. Corté, 2005a). Les contraintes de traction apparaissent principalement à la base des couches bitumineuses. En hiver, lorsque les températures sont basses, les couches bitumineuses deviennent très rigides et leur comportement est majoritairement élastique, les rendant plus susceptibles de subir des fissurations thermiques lorsque leur résistance en traction est dépassée (Jung & Vinson, 1994).

1.4.5.1 Essai de traction directe (TD)

En laboratoire, la résistance en traction des enrobés bitumineux est évaluée à l'aide de l'essai de traction directe (TD). C'est un essai de rupture à température constante qui permet de mesurer la résistance de l'enrobé à la fissuration sous sollicitation mécanique (Olard, Di Benedetto, Dony, & Vaniscote, 2005; Tušar, Hribar, & Hofko, 2014).

- Principe de l'essai TD : À une température fixée, une éprouvette aux dimensions normalisées est soumise à une vitesse de sollicitation constante jusqu'à la rupture.
- Température et vitesse de sollicitation : L'essai est réalisé à différentes températures, permettant ainsi de déterminer une enveloppe de résistance à basse température du matériau, correspondant à la limite de résistance à la fissuration.

1.4.5.2 Influence de la vitesse de sollicitation

Les résultats des essais TD sont influencés par la vitesse de sollicitation. Dans des études antérieures, des vitesses de 300×10^{-6} m/m/h et 45000×10^{-6} m/m/h ont été utilisées pour réaliser des essais TD (Olard et al., 2005). Teltayev et Radovskiy (2018) ont récemment utilisé une vitesse de 1×10^{-4} m/m/s pour les essais TD dans leur étude.

La vitesse de sollicitation peut être établie en utilisant le coefficient de contraction thermique de l'enrobé et la vitesse de refroidissement de l'essai TSRST (Pedraza, 2018). Ainsi, l'évolution des contraintes en cours d'essai TD reflète celle de l'essai TSRST, permettant de mieux simuler les conditions réelles de fissuration thermique sur site. La combinaison des résultats de ces deux essais a permis de développer le concept de réserve de résistance en traction.

1.4.5.3 Concept de la réserve de résistance en traction des enrobés en hiver

En hiver, les chaussées doivent supporter les contraintes de traction induites par le trafic sans que les couches bitumineuses ne se fissurent. Une contrainte thermique est imposée par l'abaissement de température, mais cette contrainte n'amène pas nécessairement à la rupture

si la contrainte thermique induite est inférieure à la résistance en tension de l'enrobé à une température donnée. L'écart entre la traction thermique induite et la résistance en tension est la réserve. C'est cette réserve de résistance en traction qui leur permet de résister aux sollicitations mécaniques. Tant que cette réserve n'est pas épuisée, la chaussée peut supporter les contraintes de traction mécaniques générées par le passage des véhicules.

Pour évaluer cette capacité, les essais de traction uni axiale (TD) peuvent être combinés aux essais de retrait thermique empêché (TSRST). Cette combinaison permet de mieux comprendre et quantifier la réserve de résistance à la traction (RRT) des enrobés à basse température. La Figure 1.12 illustre un exemple de détermination de la RRT d'un enrobé.

La réserve de résistance en traction (RRT) à une température expérimentale est définie comme la différence entre la contrainte de traction mesurée par l'essai TD et la contrainte mesurée par l'essai TSRST à la même température. La valeur maximale de cette réserve est un paramètre important utile pour comprendre les propriétés à basse température des enrobés bitumineux en termes de contraintes thermiques et de charges liées au trafic (Pszczola & Szydłowski, 2018).

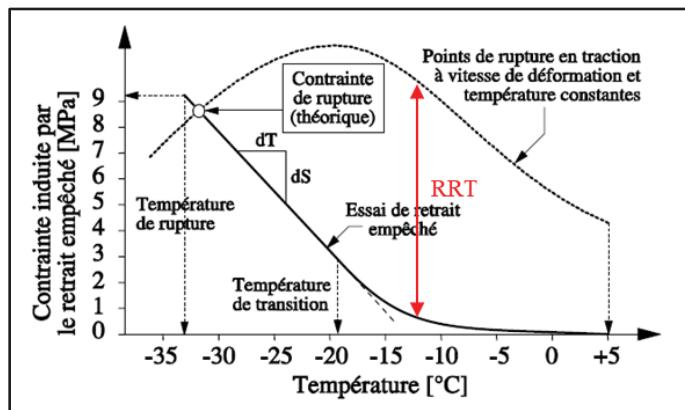


Figure 1.12 Exemple de détermination de réserve de résistance en traction à partir des essais TSRST et TD
Adaptée de Di Benedetto & Corté (2005, p. 210)

Formellement, la RRT est exprimée par l'équation suivante :

$$\text{RRT} = \sigma_{TD} - \sigma_{TSRST} \quad (1.7)$$

Où :

σ_{TD} est la contrainte de traction mesurée par l'essai TD.

σ_{TSRST} est la contrainte mesurée par l'essai TSRST.

La RRT représente la capacité de la chaussée à résister aux contraintes de traction liées au trafic durant l'hiver. Une haute RRT indique que l'enrobé possède une bonne résistance aux contraintes mécaniques et thermiques, réduisant ainsi le risque de fissuration. Cette réserve de résistance en traction peut être réduite et ne plus permettre à la chaussée de résister convenablement aux sollicitations mécaniques au fur à mesure que le bitume s'oxyde. Si d'éventuels cycles thermiques se produisent, ils conduiraient à la fatigue thermique des matériaux bitumineux.

1.4.6 Concept d'endommagement par cycles thermiques

La fissuration à basse température des chaussées est liée à deux phénomènes thermiques. Le premier phénomène est une baisse rapide de température juste qu'au dépassement de la température basse critique du liant de l'enrobé. L'enrobé se fissure, car ses conditions aux limites dans la chaussée empêchent sa contraction engendrant ainsi des contraintes de traction qui conduisent à la ruine du matériau (Di Benedetto & Corté 2005). Le second phénomène est représenté par les cycles thermiques durant la période hivernale. Les cycles thermiques donnent lieu à la contraction et à la dilation répétées du matériau qui conduisent au final à la fissuration par fatigue thermique du matériau de chaussée (Behnia, Buttlar, & Reis, 2018).

La fatigue thermique est un phénomène de fissuration associé à une variation thermique cyclique dont la plage de température des cycles se trouve bien au-dessus de la température de rupture basse des enrobés (Glaoui et al., 2012). Les variations de température journalière comprises entrent – 7 et + 20 °C et qui se répètent, sont à l'origine de ce phénomène. Le niveau de contraintes thermiques induites par cette variation de température montré à la Figure 1.13

n'est pas le plus important qu'on observe. Mais leurs répétitions entraînent de la fissuration thermique dans les chaussées. La fatigue thermique est un phénomène qu'on observe dans les climats modérés (Jackson & Vinson, 1996). En évaluant l'effet des cycles thermiques pour une plage de température de - 20 °C à + 20 °C sur la contrainte thermique induite lors du retrait empêché, Olard (2003) a observé l'apparition de contraintes de compression au cours des cycles thermiques et une dissymétrie importante entre les phases de traction et de compression. L'étude prédit la fissuration thermique au bout de trois à quatre jours de cycle thermique. De telles conditions climatiques existent au Québec. Selon les données historiques d'environnement Canada, entre 2003 et 2023, la plus basse température enregistrée à la station Montréal/Pierre Elliott Trudeau était de -20,2 °C. Mais, des événements avec des températures hivernales sous les -30 °C peuvent subvenir.

Carter et Paradis (2010) ont évalué l'influence des cycles thermiques pour une plage de température de -5 °C à +20 °C sur la fissuration thermique des chaussées au Québec. Après une quarantaine de cycles thermiques, les auteurs sont arrivés à la conclusion que les cycles thermiques seuls ne causaient pas la fissuration thermique et d'autres paramètres doivent être pris en compte.

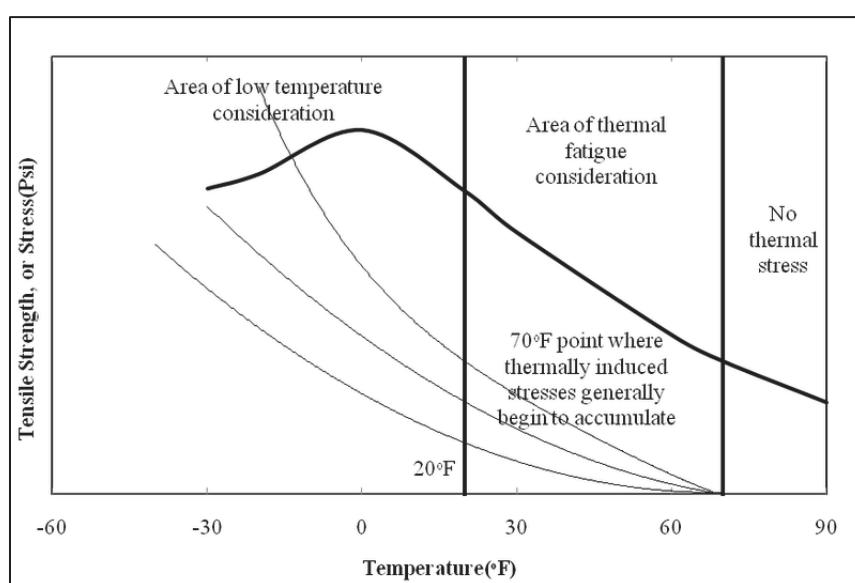


Figure 1.13 Domaines des phénomènes de fissuration thermique
Tirée de Vinson, Janoo et Haas (1989, p. 21)

Les enrobés bitumineux des chaussées au Québec sont soumis à des conditions thermiques sévères en hiver. Les deux principaux phénomènes thermiques, la baisse rapide de température et les cycles thermiques jouent un rôle dans la fissuration thermique. Cependant, les études montrent que les cycles thermiques seuls ne sont pas suffisants pour causer la fissuration prématuée des chaussées (Carter & Paradis, 2010; Ghos et al., 2022; Zhang et al., 2015). La présence de trafic, d'eau, et de sel doit être considérée pour une évaluation complète des causes de la fissuration thermique (Carter & Paradis, 2010).

1.5 Sommaire

La revue de littérature présentée dans cette thèse aborde divers aspects des enrobés bitumineux, notamment la méthode de formulation du MTMD des enrobés à chaud, l'ajout de granulats bitumineux récupéré (GBR) dans l'enrobé, les phénomènes impliqués dans la production d'enrobés contenant du GBR, ainsi que la caractérisation des enrobés et l'influence de l'ajout de GBR sur leurs caractéristiques.

Tout d'abord, il est essentiel de noter que l'enrobé est essentiellement constitué d'un squelette granulaire et d'un liant bitumineux, ce qui lui confère un caractère complexe. Ce liant peut être un bitume spécifié ou un mélange de bitume, comme c'est le cas avec l'utilisation de GBR. L'ajout de quantités importantes de GBR entraîne des phénomènes physiques et chimiques lors de la production d'enrobés recyclés, influençant ainsi leur qualité. Il est crucial de choisir un temps et une température de malaxage adéquats pour garantir une bonne qualité de production.

L'ajout de GBR affecte le comportement et les performances des enrobés. La rigidité des enrobés augmente avec l'ajout de GBR en raison de l'oxydation complète du bitume du GBR, ce qui améliore les performances à l'ornierage. Cependant, les performances à la fissuration, particulièrement à basse température, sont négativement impactées par l'ajout de GBR. Par conséquent, dans les régions froides, l'ajout de GBR peut poser des problèmes pour les chaussées, justifiant ainsi la limitation à 20 % de la quantité permise de GBR au Québec.

Pour établir le comportement viscoélastique linéaire des enrobés, des essais de module complexe sont réalisés et les résultats sont calibrés avec un modèle rhéologique, permettant de visualiser le comportement rhéologique de l'enrobé. La détermination des propriétés thermiques des enrobés, réalisée à l'aide de l'essai de mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique, permet de connaître leur capacité de déformation thermique. Ces propriétés sont également utilisées pour convertir les sollicitations thermiques en sollicitations mécaniques.

Pour évaluer le comportement et les performances des enrobés à basse température, l'essai de retrait thermique empêché est utilisé. Une caractérisation complète du comportement et des performances à basse température est obtenue grâce à la détermination de l'enveloppe de résistance en traction via des essais de traction directe. Ensuite, la capacité de la chaussée à supporter le trafic sans se rompre à basse température, nommée réserve de résistance en traction, peut être établie en combinant les résultats du retrait thermique empêché avec ceux des essais de traction directe.

La limitation de la quantité permise de GBR aux taux qualifiés de faibles au Québec est donc liée aux performances à basse température. La caractérisation des enrobés contenant des quantités importantes ou à fort taux de GBR devrait inclure des essais avec des cycles thermiques, car selon la littérature, ces cycles peuvent causer des dégradations importantes dans la chaussée.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS

2.1 Introduction

La quantité de granulat bitumineux récupéré (GBR) utilisée annuellement dans les enrobés connaît une croissance au Québec (Bitume-Québec, 2023). Cette croissance est en grande partie liée d'une part à l'âge très avancé des chaussées entraînant une disponibilité du GBR en quantité très importante. D'autre part, elle contribue à l'atteinte des objectifs environnementaux du secteur des chaussées. Tant que le GBR est disponible et accessible, on ne devrait plus produire des enrobés sans ajout de GBR. Le souhait de l'industrie des matériaux bitumineux est d'utiliser des quantités encore plus importantes. Pour ce faire, il est nécessaire d'augmenter les taux permis. Cependant, le MTMD reste prudent avec l'utilisation des forts taux à cause du climat. Les hivers très froids et longs que connaît le Québec représentent des conditions très sévères pour les chaussées bitumineuses et comme indiqué dans la littérature, les performances à basse température des enrobés recyclés ont souvent fait défaut et on craint de voir apparaître régulièrement des fissures transversales dans les chaussées. En plus, pour produire des enrobés à fort taux de GBR de qualité, dont les performances sont optimales, des conditions de production spéciales sont exigées. Pour amener le MTMD à revoir sa position sur les forts taux de recyclage, il faut maintenant établir les conditions qui permettent de produire des enrobés à fort taux de GBR de qualité dans un premier temps et par la suite, démontrer que ces mélanges bitumineux peuvent performer dans le climat du Québec.

2.2 Objectif principal

L'objectif principal de cette thèse est de mesurer les propriétés rhéologiques et les propriétés mécaniques à basse température d'un enrobé de surface de type semi-grenu 10 mm (ESG10) incorporant de forts taux de GBR. Cette étude vise à enrichir les connaissances sur le comportement et les performances des enrobés à fort taux de recyclage en conditions de basses températures, particulièrement dans les régions froides. Elle devrait également permettre

d'optimiser la quantité de GBR autorisée dans les enrobés au Québec, tout en favorisant la conception d'enrobés performants et durables.

2.3 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques du travail de recherche sont de:

- Établir une durée de malaxage à utiliser en laboratoire pour les enrobés à fort taux de GBR basée sur l'étude du comportement rhéologique et des performances au retrait thermique empêché d'un enrobé ESG10 contenant du GBR au taux de 0, 30 et 40%;
- Déterminer l'influence de l'ajout du GBR sur le comportement rhéologique, les propriétés thermiques et sur la performance au retrait thermique empêché de l'enrobé ESG10;
- Déterminer la réserve de résistance en traction des enrobés ESG10 de l'étude et celle d'un enrobé composé à 100% de GBR (sans ajout de bitume neuf);
- Simuler le comportement à basse température d'une chaussée dont la couche de surface est en enrobé ESG10 incorporant du GBR au taux de 0, 20, 30 et 40%;
- Évaluer l'influence de l'ajout du GBR et du trafic sur la réserve de résistance à la traction;
- Mettre au point un essai de sollicitation thermique qui permet de dégrader la rigidité des enrobés; et
- Quantifier l'évolution de la dégradation de la rigidité des enrobés avec GBR soumis à des cycles thermiques à basse température.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE ET MATÉRIAUX

3.1 Introduction

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre d'un projet global visant à optimiser la formulation des enrobés contenant du granulat bitumineux recyclé (GBR) et à caractériser le comportement des enrobés à fort taux de GBR. Ce projet global est structuré en deux volets principaux : l'optimisation de la formulation et la caractérisation du comportement.

La première partie, axée sur l'optimisation de la formulation, a été complétée par Marc-André Bérubé en 2024. Les mélanges formulés lors de cette phase initiale ont servi de base pour la seconde partie de notre projet.

Selon la littérature, de nombreux essais sont disponibles pour évaluer le comportement et les performances des enrobés. Les aspects rhéologiques, les propriétés thermiques et les performances à basse température, qui constituent l'objet principal de notre étude, sont souvent mesurés par des essais tels que le module complexe, le coefficient de dilatation/contraction thermique, et le retrait thermique. Ces essais ont été utilisés dans le cadre de cette thèse.

Afin d'obtenir une caractérisation plus complète et approfondie du comportement et des performances des enrobés à basse température, nous avons également inclus l'évaluation de la résistance en traction et de la résistance à l'endommagement thermique. Ces essais supplémentaires enrichissent la méthode standard de caractérisation des enrobés habituellement utilisée au Québec, permettant ainsi une analyse plus exhaustive et précise des enrobés à fort taux de GBR. Ce chapitre vise à offrir une compréhension globale des efforts expérimentaux nécessaires pour atteindre les objectifs de la thèse et à garantir une planification rigoureuse et structurée des différentes phases de l'étude.

3.2 Programme expérimental

Après la phase de recherche bibliographique et l'établissement des objectifs de recherche, un plan de travail détaillé pour la thèse a été élaboré. Ce plan est structuré en cinq phases. La première phase qui traite du temps de malaxage optimal pour enrobé à fort taux de GBR est présenté à l'annexe 3. Les quatre phases restantes sont illustrées dans l'organigramme de la Figure 3.1.

Chaque phase du plan de travail comprend les principaux essais de caractérisation des enrobés, les taux de GBR dans l'enrobé ESG10, le type de bitume neuf utilisé, qualifié de bitume d'apport dans la suite du document, ainsi que les hypothèses de recherche correspondantes. Cette organisation méthodique permet de structurer de manière cohérente et systématique l'ensemble des travaux expérimentaux nécessaires à l'atteinte des objectifs de la thèse.

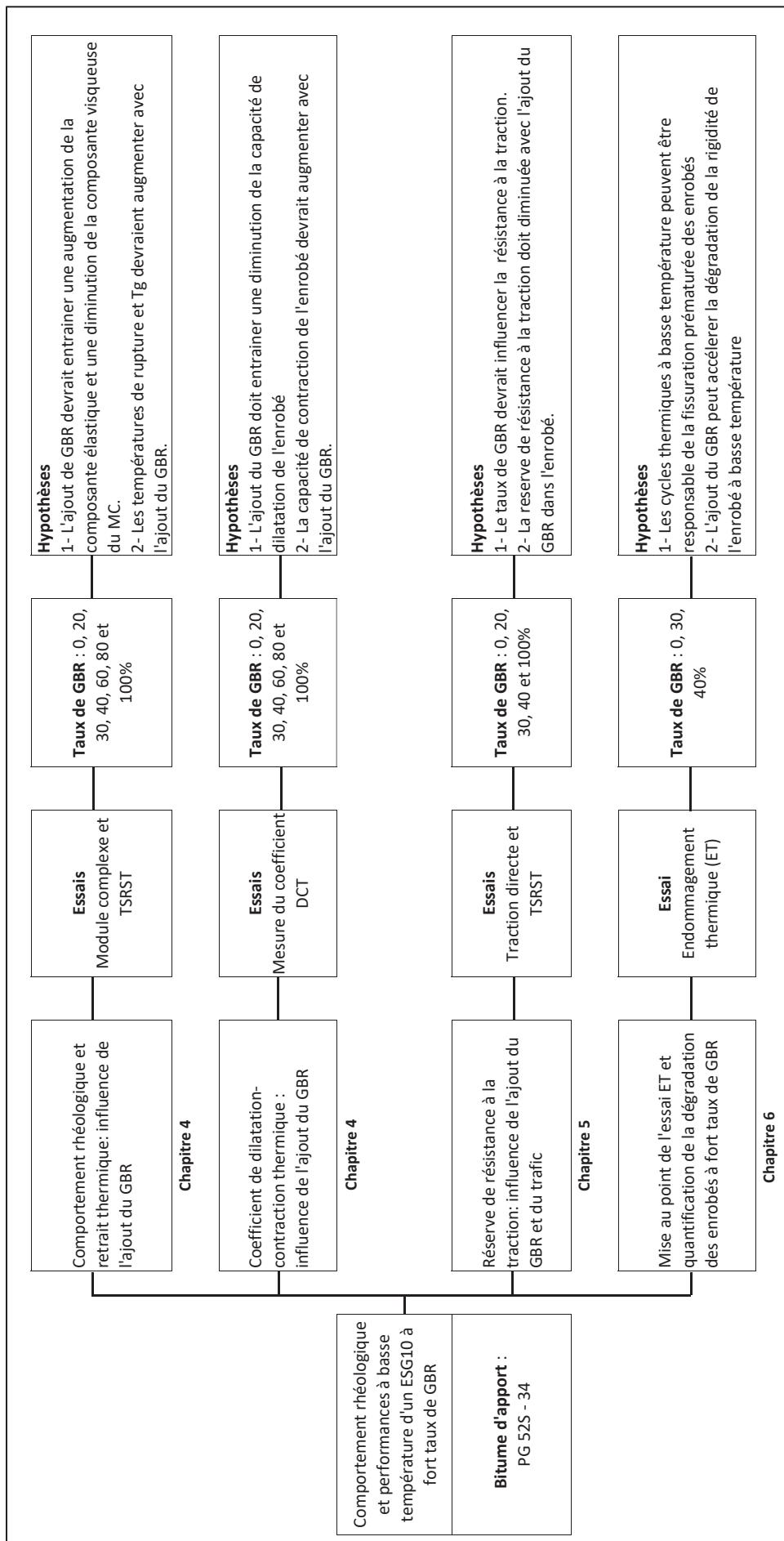


Figure 3.1 Organigramme de la démarche de recherche de la thèse

Le Tableau 3.1 offre une vue d'ensemble des essais prévus pour cette phase du projet. Toutefois, il convient de souligner que certaines répétitions d'essais, telles que celles concernant la traction directe et les modules complexes, ne sont pas prises en compte dans ce tableau. Une description détaillée des essais inclus dans le programme expérimental est fournie dans la section 3.4 de la méthodologie de recherche.

Tableau 3.1 Essais du programme expérimental

Essai	Norme	Quantité/Mélange	Répétition des essais	Total
Mesure du module complexe en traction-compression cyclique sinusoïdale	LC 26-700	12	Non	12
Résistance au retrait thermique empêché (TSRST)	AASHTO TP10-93	12	1	24
Résistance à la traction directe	NF EN 12697-26	28	1	56
Dilatation et contraction thermique	-	7	1	14
Endommagement thermique	-	3	Non	3

3.3 Matériaux

Différentes classes de matériau granulaire et un bitume d'apport ont été utilisés pour la production des enrobés qui ont servi pour les travaux de cette étude. Les caractéristiques de ces divers matériaux ainsi que celles des mélanges étudiés sont présentées dans cette partie de la thèse.

3.3.1 Granulats vierges et GBR

Les différents granulats vierges utilisés dans cette étude ont été fournis par la compagnie partenaire Bauval. Ils sont d'origine granitique et proviennent de la Carrière Sable LG située à Saint-Hyppolite (Québec). Le GBR est également fourni par Bauval et provient de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). Ces caractéristiques ont été mesurées au

laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB). Le Tableau 3.2 présente les caractéristiques, dont la granulométrie, la densité brute et l'absorption en eau, des matériaux granulaires de l'étude. Les GBR de classe granulaire 0 – 5 mm et 5 – 10 mm (Figure 3.2), ont été obtenus par séparation en laboratoire au tamis de 5 mm du GBR 0 – 10 mm.

Tableau 3.2 Caractéristiques des matériaux granulaires

Tamis (mm)	Granulométrie des granulats vierges (%)					Granulométrie GBR (%)		
	5 - 10 mm	2,5 - 5 mm	0 - 5 mm	0 - 2,5 mm	Filler	0 - 10 mm	5 - 10 mm	0 - 5 mm
28	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	100	100	100	100
10	93	100	100	100	100	99	96	100
5	14	89	96	100	100	80	44	100
2,5	3	20	66	86	100	64	31	83
1,25	2	7	48	59	100	53	26	68
0,630	2	3	34	40	100	41	21	52
0,315	2	2	26	25	100	28	16	35
0,160	2	1	18	12	100	15	8	19
0,080	1,2	0,9	11,7	3,9	100,0	8,9	4,1	11,1
Densité brute	2,728	2,741	2,721	2,737	2,700	2,714	2,751	2,746
Absorption en eau (%)	0,44	0,23	0,27	0,22	0,00	1,45	1,50	0,90
Provenance	Sables L.-G, St-Hippolyte					CMM		



Figure 3.2 Photos des deux classes granulaires issues de la séparation du GBR 0-10 mm
 a) GBR 0-5 mm b) GBR 5-10 mm

3.3.2 Bitume d'apport et bitume du GBR

Le bitume d'apport utilisé dans le projet est de type PG 52S – 34. C'est un bitume réservé aux chaussées à faible trafic, antérieurement, utilisé pour la zone climatique 3. Mais, il a récemment été retiré des spécifications du tableau de choix des composantes des enrobés du MTMD (2023) présenté au chapitre 1. Le choix de ce bitume pour ce projet repose sur la méthode de formulation des enrobés recyclés Superpave, qui se base sur la charte des mélanges pour la sélection du bitume d'apport. Cette méthode de formulation recommande, pour des taux de GBR compris entre 15 et 25 %, de sélectionner un bitume d'apport de grade inférieur. En revanche, pour des taux de GBR supérieurs à 25 %, il est conseillé de se référer à une charte de mélange prenant en compte les températures élevées et basses afin de déterminer le bitume d'apport le plus approprié.

Le bitume sélectionné est un bitume non modifié au polymère issu du processus de distillation. Il a été sélectionné en vue d'une utilisation potentielle pour les zones climatiques 1 et 2 du ministère des Transports de la province de Québec au Canada. Bien que le bitume utilisé dans ce projet de doctorat ne soit pas dans la liste des bitumes sélectionnés dans le tableau de sélection des composants, il demeure un bitume qui peut-être classifier comme un bitume 52S-34 selon la classification de type PG avec MSCR selon les normes actuelles de classification des bitumes au Québec et aux États-Unis.

Le bitume extrait du GBR à l'aide de trichloréthylènes a été caractérisé en laboratoire dans la première phase du projet. Ces caractéristiques et celle du bitume d'apport PG 52S – 34 sont fournies au Tableau 3.3. Ce tableau présente les propriétés essentielles pour la formulation des enrobés des deux bitumes.

Tableau 3.3 Propriétés des bitumes d'apport et du GBR

Essai (température)	Propriétés	Bitume d'apport PG 52S - 34	Bitume du GBR
Pen⁽¹⁾ (25 °C)	Pénétration (dmm)	159	35
BRV⁽¹⁾	$\eta_{135\text{ }^{\circ}\text{C}}$ (Pa-s)	0,171	1,724
	$\eta_{165\text{ }^{\circ}\text{C}}$ (Pa-s)	0,058	0,408
	T _{malaxage} (°C) ⁽²⁾	135	188
	T _{compactage} (°C)	124	174
DSR⁽¹⁾ (H;H+6°C)	T _{high}	52,7	84
MSCR^(3, 5) (64 °C)	Recouvrance élastique, R3.2 (%)	0	35,3
	Non-rec. Creep comp., Jnr3.2 (kPa-1)	3,18	0,499
	Compliance delta, Jnr diff (%)	9,3	68,4
	Classe de trafic (n : lettre)	S	S.O.
BBR^(4, 5)	m(60 s)	0,917 ⁽⁶⁾	0,29
(-12°C)	S(60 s) (MPa)	48	330
(-18°C)	m(60s)	0,63	0,259
	S(60 s) (MPa)	116	240
	T _b (°C)	-34,9	-24,5
	ΔT _c (°C) ⁽⁷⁾	+0,4	-5,6
DSR⁽⁵⁾ +BBR PG (H-L)		52-34	82-22
DSR⁽⁵⁾ +BBR+PG (Hn-L) MSCR		52S-34	S.O.

⁽¹⁾ Sur bitume non vieilli.

⁽²⁾ Au Québec, T_{malaxage} est limité à 168 ± 2 °C en laboratoire.

⁽³⁾ Les essais ont été réalisés sur les résidus d'essais du RTFOT, mais les bitumes du GBR n'ont pas été vieillis artificiellement.

⁽⁴⁾ Les essais ont été effectués sur des résidus du RTFO et du PAV, mais le bitume du GBR n'a pas été vieilli artificiellement.

⁽⁵⁾ Pour la région de Montréal, H et L exigés sont 64 et -28 °C. C'est la raison pour laquelle l'essai MSCR a été réalisé à H = 64 °C. Le niveau de trafic (n) spécifié est E et H pour les routes à fort trafic ou S pour les routes à faible trafic.

⁽⁶⁾ Les essais sont effectués à -24 et -30 °C.

⁽⁷⁾ ΔT_c = T_b, S(60) - T_b, m(60)

3.4 Les essais de caractérisation

Le programme expérimental élaboré pour atteindre les objectifs de cette thèse inclut des essais courants, tels que les essais de module complexe, les essais de mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique (DCT), et les essais de retrait thermique empêché (TSRST), ainsi que des essais moins couramment utilisés au Québec, tels que l'essai de traction directe (TD) et l'essai d'endommagement thermique (ET) mis au point spécifiquement pour cette thèse.

L'intégration des essais TD et ET est cruciale : l'essai TD permet de définir l'enveloppe limite de la capacité de l'enrobé à supporter les contraintes de traction. La connaissance de cette capacité du matériau à basse température, et l'identification des phénomènes qui pourraient impacter cette capacité devraient permettre d'expliquer l'apparition prématuée de fissures transversales. Ainsi, l'identification d'un de ces phénomènes a conduit à la mise au point de l'essai ET pour évaluer la dégradation de la rigidité des enrobés sous sollicitations thermiques.

De plus, l'étude vise à tester l'enrobé ESG10, avec et sans ajout de GBR, dans les conditions *in situ* les plus sévères possibles. Cela permettra de déterminer les avantages et inconvénients de l'ajout de GBR en forte teneur dans ce type d'enrobé.

3.4.1 Essai module complexe

Le module complexe est mesuré à l'aide de l'essai de traction-compression cyclique sinusoïdal sur la base des normes AASHTO T342 et LC 26-700. Cet essai consiste à soumettre une éprouvette normalisée d'enrobé à des sollicitations sinusoïdales dans le domaine des petites déformations. Différents couples température-fréquence ont été utilisés pour les essais MC. Les températures d'essai sont -35, -25, -15, -5, 5, 15, 25 et 35 °C, tandis que les fréquences varient de 0,01 à 10 Hz (0,01 ; 0,03 ; 0,1 ; 0,3 ; 1 ; 3 et 10 Hz). Une presse hydraulique équipée d'une enceinte thermique, comme montré à la Figure 3-2, est utilisée pour ces essais.

L'éprouvette, mesurant entre 130 et 150 mm de hauteur et ayant un diamètre de 75 mm, est instrumentée avec trois capteurs de déformation (extensomètres) de 25 mm de longueur de déplacement et quatre thermocouples disposés autour de l'éprouvette lors de la réalisation de l'essai MC (voir Figure 3.3). Pour visualiser et analyser le comportement rhéologique de l'enrobé bitumineux, les résultats expérimentaux des essais MC sont calibrés avec le modèle rhéologique à spectre continu 2S2P1D.

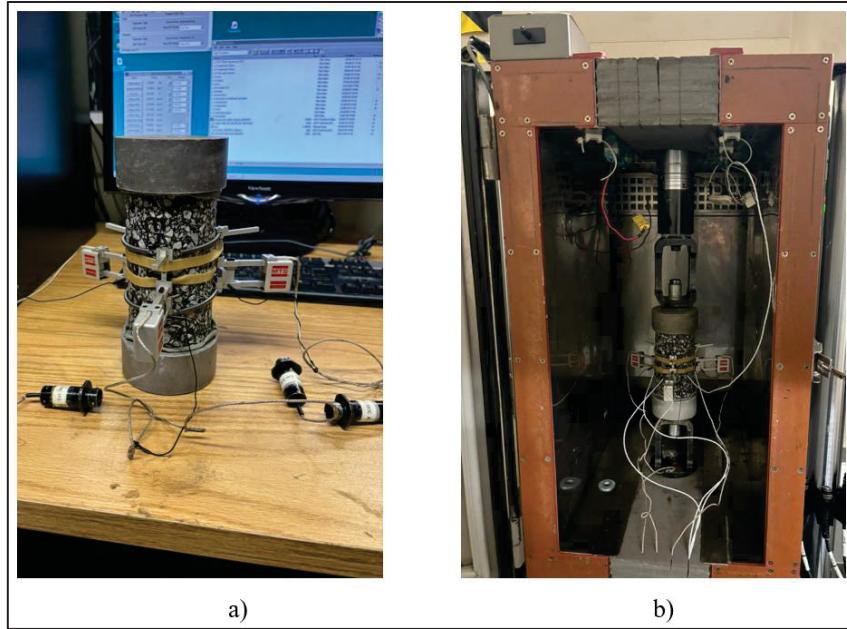


Figure 3.3 Photos d'une éprouvette d'essai MC

a) Éprouvette avec casque et extensomètre b) Éprouvette instrumentée installée dans l'enceinte thermique de la presse hydraulique

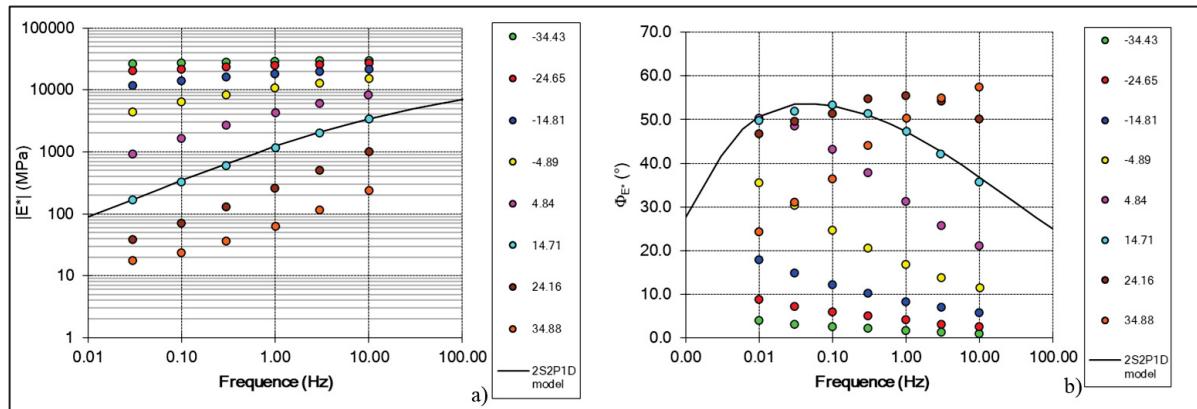


Figure 3.4 Exemple de résultats d'un essai de module complexe du ESG10-R30
a) Courbes isothermes de $|E^*|$ et b) courbes isothermes de ϕ_E

Un exemple de résultats montrant les courbes isothermes de la norme du module complexe et de l'angle de phase est illustré à la Figure 3.4. L'essai de module complexe permet d'établir le comportement VEL du matériau bitumineux et de connaître la rigidité du matériau pour le dimensionnement des chaussées. Pour le comportement et les performances à basse température, d'autres types d'essai sont nécessaires.

3.4.2 Essais de retrait thermique empêché

L'essai de retrait thermique empêché, ou Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST), est utilisé pour évaluer la performance des enrobés face à la fissuration thermique. Cet essai permet également de simuler les sollicitations thermiques présentes dans les chaussées (Di Benedetto & Corté, 2005). Les normes qui ont encadrées la réalisation de cet essai dans ce projet sont ASTM D8303-20 et AASHTO TP10-93. Une presse hydraulique munie d'une enceinte thermique, la même que celle utilisée pour les essais de module complexe, est utilisée pour les essais TSRST.

L'éprouvette d'essai mesure entre 230 et 250 mm de hauteur avec un diamètre d'environ 60 mm. Trois extensomètres de 165 mm de longueur et quatre thermocouples sont fixés autour de l'éprouvette comme l'illustre la Figure 3.5.

L'essai consiste à soumettre l'éprouvette, dont les deux extrémités sont collées sur des casques métalliques et fixées dans l'enceinte de la presse hydraulique, à une baisse de température avec une vitesse de refroidissement de 10 °C/h. Cette vitesse de refroidissement normalisée permet d'éviter le développement d'un gradient thermique au sein de l'éprouvette durant l'essai (Di Benedetto & Corté, 2005). Ces conditions d'essai induisent des contraintes de traction dans l'éprouvette en raison de son retrait empêché, et celle-ci finit par se briser lorsque la température critique basse du bitume est dépassée.

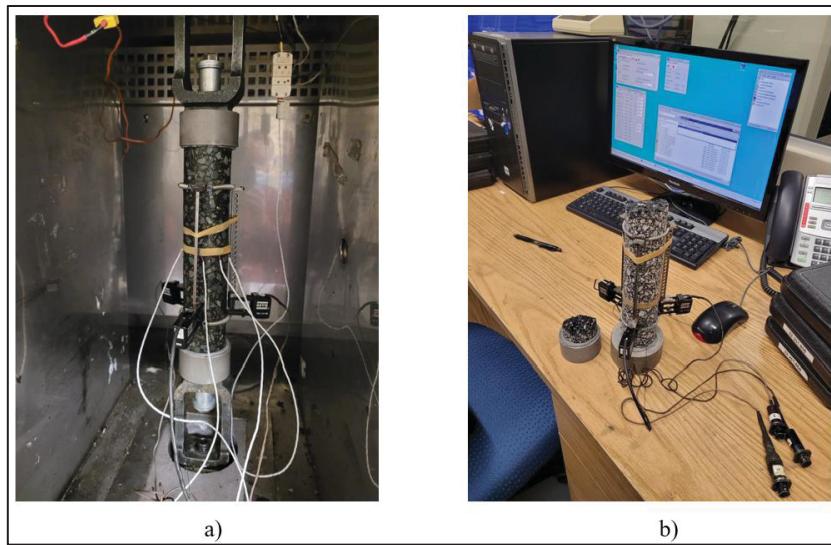


Figure 3.5 Photos d'une éprouvette TSRST

- a) Éprouvette TSRST instrumentée et installée dans l'enceinte de la presse hydraulique
- b) Éprouvette TSRST après l'essai

Comme mentionné au paragraphe 1.4.4.4, cet essai permet de connaître la température de rupture, la contrainte à cette température et la température Tg. Ces paramètres permettent de prédire l'apparition de la fissuration dans la chaussée. Un exemple des résultats et l'analyse des résultats de l'essai TSRST est illustré à la Figure 3.6. Pour compléter la caractérisation à basse température, d'autres essais sont encore nécessaires.

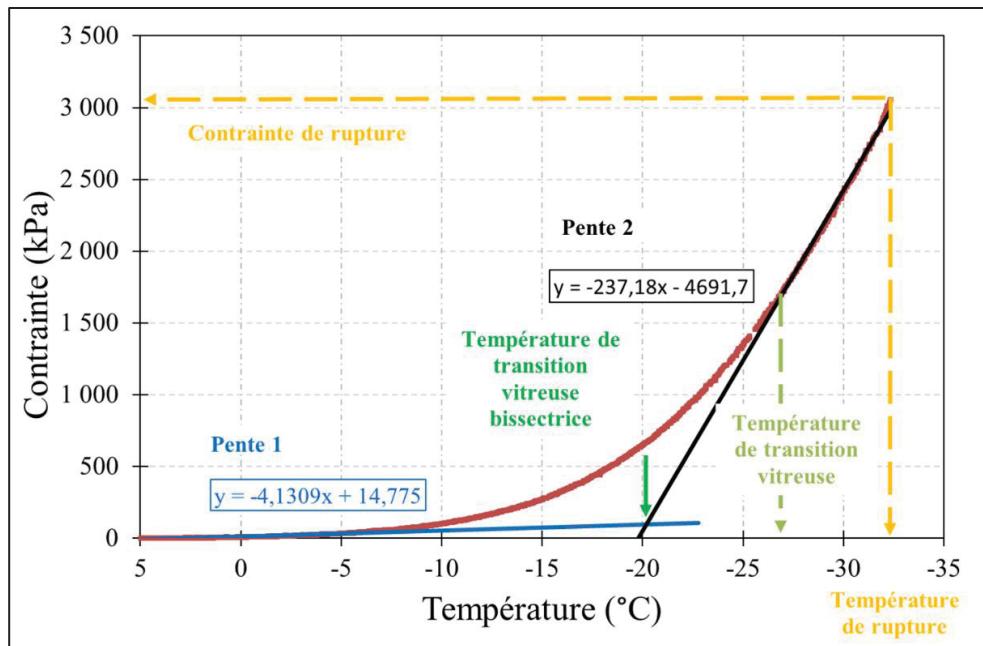


Figure 3.6 Exemple de résultats et d'analyse des résultats d'un essai TSRST

3.4.3 Essai de mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique (DCT)

3.4.3.1 Description de la procédure d'essai

L'essai de mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique n'est pas un essai mécanique, mais plutôt un essai de détermination de la propriété thermomécanique du matériau bitumineux (Olard, 2003). Cet essai est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique, en utilisant le même équipement et la même éprouvette que pour l'essai TSRST.

L'éprouvette est soumise à une variation de température à une vitesse de 10 °C/h. Une extrémité de l'éprouvette est collée à un casque métallique et fixée dans la presse, tandis que l'autre extrémité est laissée libre, sans casque collé dessus (voir Figure 3.7). Quatre plages de température sont utilisées dans ce projet pour cet essai : de +21 à +5 °C, de +5 à -20 °C, de -20 à +5 °C et de +5 à +20 °C.

Pendant l'essai, les déformations axiales de contraction ou de dilatation de l'éprouvette dues à la variation de température sont mesurées à l'aide des extensomètres fixés sur l'éprouvette. Le coefficient de dilatation/contraction est ensuite calculé à partir des données recueillies à l'aide de l'équation :

$$\tau\alpha_L (\mu\text{def} / ^\circ\text{C}) = \frac{\alpha_L}{\Delta T} \quad (3.1)$$

Où

α_L est la déformation moyenne des trois extensomètres en μdef .

ΔT est l'écart dans la plage de température considérée.

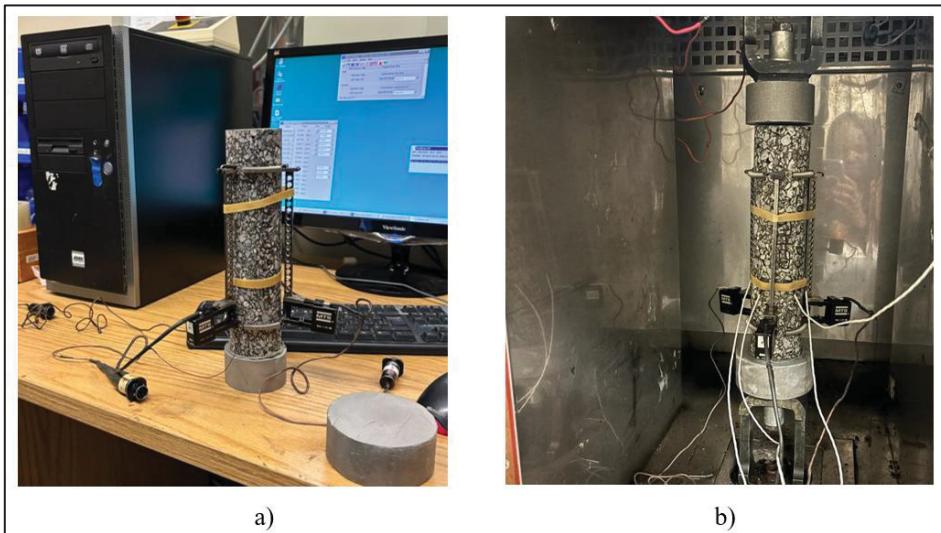


Figure 3.7 Photos d'essai de mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique
a) éprouvette avec casque collé à une extrémité et instrumenté b) éprouvette installée dans la presse hydraulique MTS

Un exemple de résultats de mesure du coefficient DCT montrant l'évolution de la température et de la déformation de l'éprouvette d'essai est illustré à la Figure 3.8.

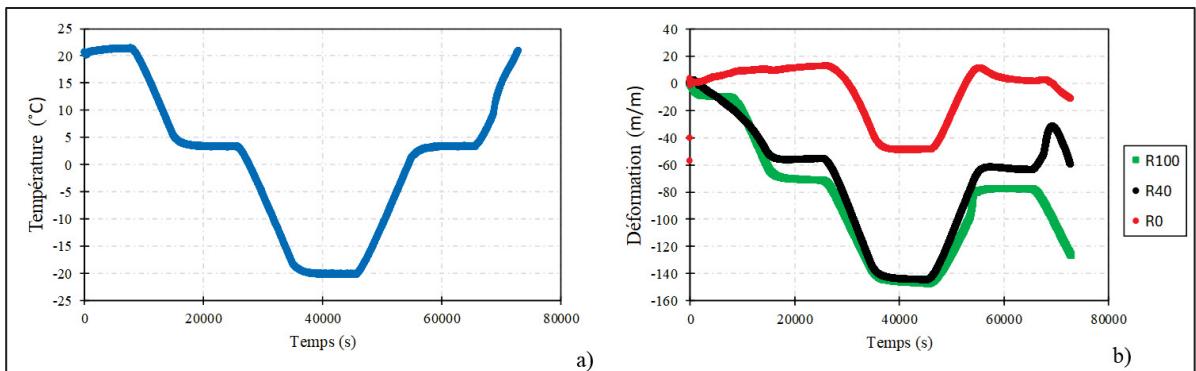


Figure 3.8 Exemple de résultats d'essai de mesure du coefficient DCT des enrobés R0, R40 et R100

a) Évolution de la température et b) de la déformation en fonction du temps

3.4.3.2 Biais lié à l'utilisation d'éprouvette avec casque collé à une extrémité

L'essai de mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique (DCT) est généralement réalisé à l'aide d'une éprouvette dont les extrémités sont libres, permettant ainsi un mouvement complet dans toutes les directions pendant l'essai. Dans cette étude la mesure du coefficient DCT est faite dans la direction longitudinale. Lors de la baisse de température, l'éprouvette se contracte des extrémités vers le centre, tandis que lors de la montée en température, la dilatation se fait du centre vers les extrémités.

Dans ce projet, une éprouvette avec un casque collé à une extrémité est utilisée pour diverses raisons. Premièrement, chaque essai de mesure du coefficient CDT est suivi d'un essai TSRST utilisant la même éprouvette, ce qui permet de gagner du temps et d'économiser des matériaux. Deuxièmement, l'espace disponible dans l'enceinte thermique de la presse hydraulique et la taille de l'éprouvette ne permettent pas la réalisation de l'essai avec une éprouvette positionnée horizontalement.

Comme le montrent les photos de la Figure 3.7, l'éprouvette est maintenue en position verticale avec trois extensomètres et des thermocouples fixés autour d'elle. Le casque métallique collé à une extrémité permet de fixer et de maintenir l'éprouvette dans cette position pendant l'essai. Bien que la présence du casque réduise le degré de liberté de l'éprouvette, ce qui pourrait

influencer les résultats, la même procédure a été appliquée à toutes les éprouvettes testées dans ce projet. Cela permet une comparaison cohérente entre les résultats des différents mélanges testés. De plus, les résultats obtenus avec cette méthode sont conformes aux valeurs disponibles dans la littérature. En complément des raisons liées à l'utilisation d'une éprouvette avec casque collé à une extrémité, il avait déjà été montré par l'expérience du LCMB que ces conditions d'essai permettaient d'obtenir des résultats comparables à ce qui se faisait ailleurs.

3.4.4 Essai de résistance à la traction

L'essai de traction directe (TD) est un essai essentiel pour connaître la résistance en traction des matériaux bitumineux. Elle permet d'établir la performance de résistance en traction pour la période hivernale. Dans ce projet, l'essai a été réalisé conformément à la norme NF EN 12697-26. L'essai TD consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une traction simple à une vitesse de sollicitation constante et contrôlée, jusqu'à la rupture de l'éprouvette, pour une condition de température donnée. La vitesse de sollicitation utilisée dans ce projet est 220×10^{-6} m/m/h ($3,67 \times 10^{-3}$ mm/min). Elle est calculée à l'aide d'un coefficient de contraction thermique mesuré au cours de ce projet et d'une vitesse de refroidissement de 10 °C/h, utilisée pour les essais TSRST, selon l'équation suivante :

$$V_{\varepsilon_{TD}} = \tau \alpha_L \times 10 \text{ °C/h} \quad (3.2)$$

Avec,

$\tau \alpha_L (\mu_{def} / \text{°C})$ est le coefficient de contraction thermique retenu pour le projet.

Les températures d'essai sont de -35, -27, -20, -5, 5 et 20 °C. Les éprouvettes d'essai sont identiques à celles utilisées pour les essais de module complexe, ainsi que les appareils.

Les photos de la Figure 3.9 montrent une éprouvette instrumentée avant et à la fin de l'essai TD. Au cours de l'essai, on mesure la force nécessaire à la traction, traduite en contrainte de traction à l'aide de la section de l'éprouvette, ainsi que la déformation en fonction du temps

jusqu'à la rupture. La Figure 3.10 présente un exemple des résultats d'un essai TD à la température de -20 °C, illustrant l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation au fil du temps.

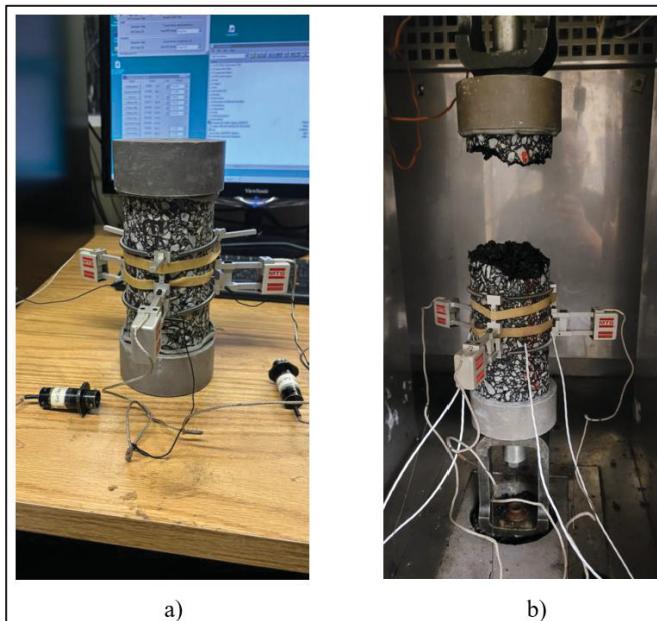


Figure 3.9 Photos d'éprouvette d'essai TD a) avant essai TD b) après essai TD

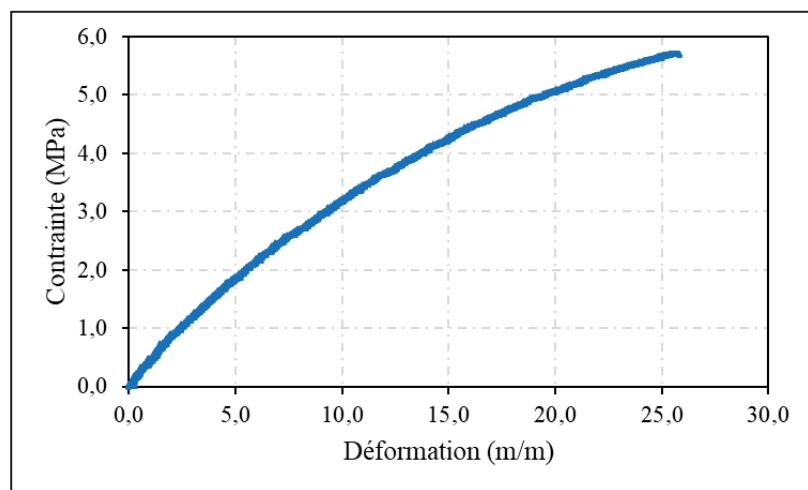


Figure 3.10 Exemple de résultat d'un essai TD à -20 °C et vitesse de chargement de 220×10^{-6} m/m/h

Au cours de cette étude, la rupture des éprouvettes a été localisée à trois différentes positions. On observe des ruptures en haut, proche du casque, au centre de l'éprouvette et en bas proche du casque comme montré à la Figure 3.11.



Figure 3.11 Photos de localisation des ruptures d'essai TD
a) en bas, b) au centre et c) en haut

L'essai TD permet de connaître la résistance de l'enrobé. La réalisation de cet essai présente un caractère primordial pour la caractérisation des performances à basse température, car il peut être associé à l'essai TSRST pour évaluer la capacité de la chaussée à supporter le trafic dans les basses températures. Cette capacité de la chaussée dans les basses températures peut être impactée par des phénomènes thermiques cycliques. Il est donc judicieux que la dégradation des caractéristiques mécaniques des chaussées soit évaluée à l'aide d'essai en laboratoire.

3.4.5 Essai d'endommagement thermique (ET)

La période hivernale au Québec est souvent longue et caractérisée par des températures extrêmement froides. Les cycles thermiques à basse température représentent l'une des conditions qui pourraient être considérées comme faisant partie des plus difficiles pour les chaussées bitumineuses dans un tel climat. Ces cycles peuvent expliquer, à eux seuls, les

fissures transversales observées sur les revêtements des chaussées à la fin de l'hiver. L'essai d'endommagement thermique (ET) a été mis au point dans le cadre de ce projet pour quantifier la dégradation de la rigidité sous des cycles thermiques à basse température des enrobés de ce projet.

L'essai ET complète les essais TSRST et TD, permettant ainsi une caractérisation plus approfondie des matériaux dans des conditions extrêmes. Basé sur l'essai TSRST, il en utilise les conditions, les éprouvettes et l'appareillage. La Figure 3.12 montre une éprouvette installée dans la presse hydraulique pour un essai ET.



Figure 3.13 Photo d'une éprouvette instrumentée et prête pour l'essai ET

3.4.5.1 Principe de l'essai ET

Le retrait thermique empêche des enrobés lors de la baisse de température induit des contraintes thermiques au sein du matériau. La rupture survient lorsque la température critique du bitume est dépassée ou lorsque la résistance en traction de l'enrobé est excédée. L'évolution des contraintes pendant le retrait thermique empêché peut être divisée en deux phases distinctes comme montré à la Figure 3.13.

La première phase est caractérisée par une évolution non linéaire des contraintes, attribuable à la capacité de relaxation du matériau. Au fur et à mesure que la température diminue, le matériau a la capacité de redistribuer et de relâcher une partie des contraintes internes induites accumulées, ce qui entraîne cette non-linéarité. Dans la deuxième phase, les contraintes évoluent de manière quasi linéaire jusqu'à la rupture du matériau. Cette phase quasi linéaire correspond à un comportement élastique, généralement observé à des températures inférieures à la température de transition vitreuse du matériau.

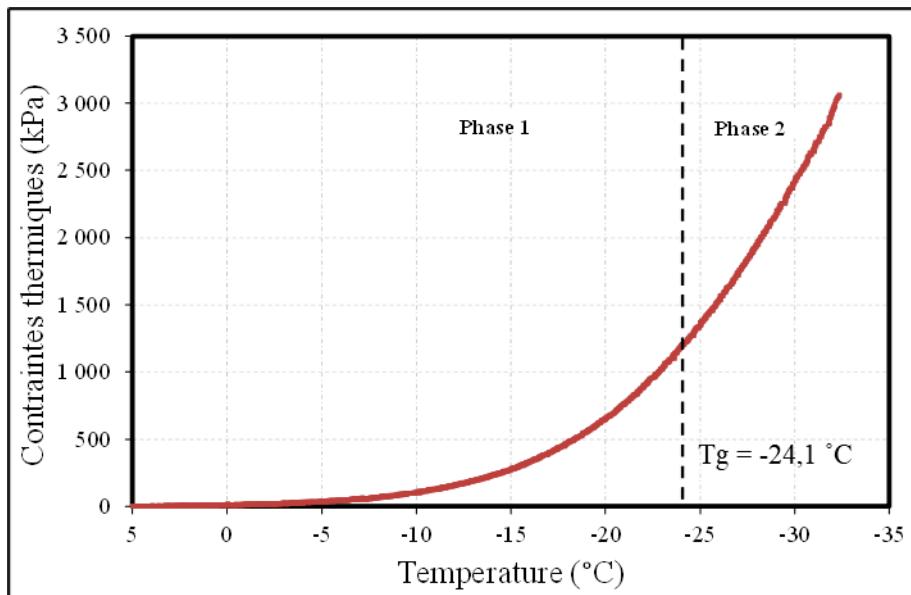


Figure 3.14 Phases d'évolution des contraintes dans un essai TSRST de l'enrobé R0 Ep01

L'essai d'endommagement thermique (ET) a pour but de soumettre le matériau à des cycles thermiques dans une plage de températures correspondant à la deuxième phase du retrait thermique empêché. Cet essai simule les conditions sévères que les enrobés peuvent rencontrer sur le terrain. Pendant l'essai, les caractéristiques mécaniques du matériau, représentées ici par les contraintes, diminuent progressivement avec le nombre de cycles thermiques, jusqu'à la rupture de l'éprouvette d'essai.

Cependant, en raison de la durée prolongée d'un cycle thermique, qui rend l'essai très long, le nombre de cycles a été limité à 40 dans cette étude. Cette limitation permet de comparer de

manière efficace l'évolution de la dégradation des caractéristiques mécaniques entre les enrobés avec et sans GBR. L'objectif de cet essai est de mieux comprendre comment l'incorporation de GBR affecte la durabilité et la résistance des enrobés sous des conditions thermiques sévères.

Le cycle thermique utilisé dans cet essai est compris entre -20 °C et -30 °C. Il se compose de deux phases distinctes :

- Phase de retrait (ou phase de sollicitation) : Durant cette phase, la température descend à vitesse 10 °C de -20 °C à -30 °C. Ce refroidissement induit des contraintes de traction dans le matériau, car le retrait thermique est empêché, ce qui entraîne une accumulation de contraintes internes dans l'enrobé.
- Phase de retour : Ensuite, la température remonte à vitesse de 10 °C de -30 °C à -20 °C. Cette remontée entraîne un relâchement des contraintes induites lors de la phase de retrait. Ce cycle de contraction-expansion est répété plusieurs fois pour simuler les conditions thermiques sévères que les enrobés pourraient rencontrer sur le terrain.

Comme illustré à la Figure 3.14, le tout premier cycle thermique est unique par rapport aux cycles suivants. Il commence dans des conditions similaires à celles d'un essai TSRST, c'est-à-dire avec un conditionnement préalable à 5 °C, suivi d'un retrait thermique de 5 °C à -30 °C. Ce premier cycle permet de définir une ligne de base pour les contraintes maximales et minimales.

Pour chaque cycle thermique, on mesure une contrainte maximale (lors de la phase de retrait) et une contrainte minimale (lors de la phase de retour). La diminution progressive des contraintes maximales au fil des cycles indique que le matériau subit des dommages cumulatifs au cours de l'essai. Ce phénomène de dégradation des contraintes maximales montre que le matériau perd progressivement sa résistance en tension, ce qui est un indicateur clé de la fatigue thermique et de la durabilité des enrobés sous conditions thermiques répétées.

3.4.5.2 Exemple de résultats

Au cours de l'essai, on mesure l'évolution des contraintes induites par la baisse de température, le relâchement des contraintes durant les phases de remontée de température, et les cycles thermiques en fonction du temps. La Figure 3.14 illustre un exemple de résultats des enrobés R0 et R40.

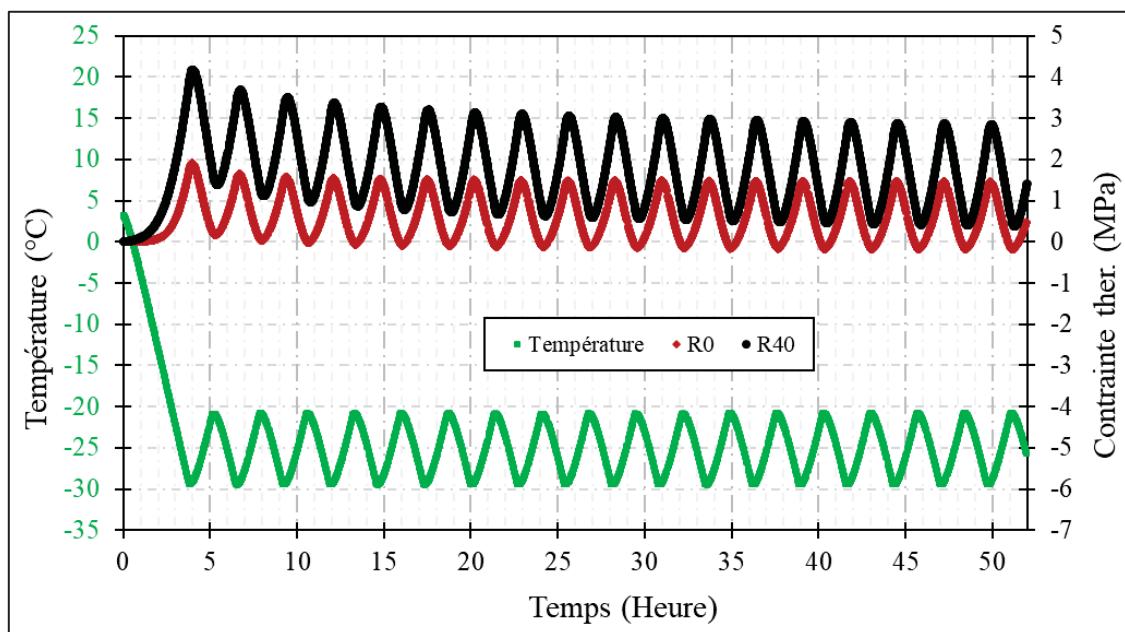


Figure 3.15 Exemple de résultats d'essais d'endommagement thermique (ET) des enrobés R0 et R40

L'essai ET est donc un complément pour la caractérisation des performances à basse température. Cet essai pourrait être combiné à l'essai de traction directe pour évaluer l'influence des cycles thermiques sur la résistance en traction. Cette combinaison peut être exploitée pour expliquer l'apparition précoce de la fissuration transversale dans la chaussée. Ainsi, l'essai mis au point dans ce projet va permettre de tester en laboratoire les matériaux utilisés dans les chaussées au Québec.

3.5 Temps de malaxage

La production en laboratoire d'un enrobé contenant une quantité importante de granulats bitumineux récupérés (GBR) nécessite des conditions spécifiques pour garantir une qualité optimale. La littérature recommande généralement une augmentation de la température et de la durée de malaxage pour les enrobés à fort taux de GBR, afin de s'assurer que les matériaux se mélangent correctement et que le bitume recouvre uniformément les granulats.

3.5.1 Normes et Recommandations

Au Québec, la température de malaxage est déterminée par le type de bitume utilisé, mais il n'existe pas de directives claires concernant la durée de malaxage lorsque des GBR sont incorporés dans les enrobés. Par exemple, la méthode d'essai LC 26-003 du MTMD indique une durée de malaxage comprise entre 2 et 3 minutes, quelle que soit la nature du malaxeur utilisé. Cependant, elle précise une durée de malaxage de 40 secondes pour un malaxeur sur pied à crochet lorsque le mélange ne contient pas de GBR, et une durée d'environ 3 minutes pour un malaxeur thermorégulé à hélice.

Au laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB), les durées de malaxage établies pour les enrobés standards du MTMD sont de 90 secondes pour les enrobés sans incorporation de GBR et de 100 secondes pour les enrobés contenant du GBR jusqu'à un taux limite de 20%.

En France, la norme NF EN 12697-35 régit le malaxage à chaud en laboratoire pour les enrobés incorporant du GBR. Selon cette norme, une durée de malaxage de 5 minutes (300 secondes) est requise. Le guide technique de l'IDRRIM (2021) offre plus de détails sur l'application de cette durée de malaxage pour les enrobés recyclés. Le processus se déroule en deux étapes : d'abord, un "malaxage à blanc" où les différentes classes granulaires vierges sont mélangées entre elles, suivi par un malaxage avec le GBR pour une durée totale de 90 secondes. Ensuite, le "malaxage à noir" consiste à mélanger le squelette granulaire avec le bitume d'apport pendant 210 secondes.

3.5.2 Expérimentation et Résultats

Pour les travaux de cette thèse, un programme expérimental a été mis en place afin d'établir une durée de malaxage adéquate pour les enrobés à fort taux de GBR. Ce programme comprenait trois types d'enrobés avec des taux de GBR de 0%, 30%, et 40%, un bitume d'apport de type PG 52S-34, des essais de module complexe, et des essais de retrait thermique empêché (TSRST). Cinq durées de malaxage différentes ont été testées.

L'analyse des résultats de cette étude n'a pas permis de dégager de conclusions définitives quant à la durée de malaxage optimale pour les enrobés à fort taux de GBR. Cependant, en se basant sur les données de la littérature et les observations expérimentales, une durée de malaxage de 220 secondes a été retenue pour les enrobés incorporant un taux de GBR supérieur à 20%. Les détails complets de cette étude sont présentés en annexe III de ce document.

Le choix de cette durée de malaxage vise à s'assurer que l'enrobé à fort taux de GBR produit en laboratoire est un mélange homogène et que les particules ont un enrobage uniforme de bitume tel que le recommande la norme du MTMD. Ce qui est crucial pour la performance mécanique et la durabilité à long terme des enrobés recyclés.

3.6 Préparation des matériaux

Cette section présente les différentes étapes qui permettent d'obtenir les différents types d'éprouvettes utilisées dans les travaux de cette thèse.

3.6.1 Séchage, tamisage et prise de masse des matériaux granulaires

Les matériaux granulaires présentés au Tableau 3-2 ont suivi un processus strict et rigoureux de séchage, tamisage et lavage avant de servir pour la production des enrobés du projet. Les granulats vierges ont été séchés par classe granulaire à 110 °C jusqu'à masse constante. Après séchage, chaque classe est tamisée. Les retenus par tamis sont récupérés séparément jusqu'au

tamis 0,080 mm, lavés puis séchés à nouveau. Le filler utilisé dans le projet est récupéré du tamisage des classes 0 – 2,5 mm et 0 – 5 mm des granulats vierges. Aucun filler d’apport, autre que celui récupéré des tamisages n’a été utilisé.

Le GBR est traité différemment. Il est séché à 40 °C durant trois jours. Au cours du séchage, une homogénéisation manuelle (répété à trois reprises) est faite pour défaire le maximum d’agglomération de particule (encore appelé agrégat bitumineux ou cluster) présent dans le GBR. Lorsque le GBR de classe 0 – 10 mm est utilisé dans le mélange, la quantité de GBR nécessaire est prise par quartage dans le GBR séché. En revanche, lorsque le mélange nécessite les classes de GBR 0 – 5 mm et 5 – 10 mm, le GBR 0 – 10 mm est séparé en deux classes au tamis 5 mm. Cette séparation est faite manuellement de sorte à défaire les clusters qui sont visibles à l’œil nu. À la suite de cette séparation, la quantité nécessaire à chaque classe de GBR est prise par séparation à l’aide du séparateur mécanique.

En résumé, la granulométrie de chaque enrobé est reconstituée par la prise de masse nécessaire sur chaque tamis pour les granulats vierges et la prise de masse par classe granulaire pour les GBR.

3.6.2 Composition, malaxage et compactage des enrobés

Les différents enrobés ESG10 caractérisés dans cette étude seront nommés en fonction de leur taux de GBR, suivant la nomenclature R+taux de GBR. Par exemple, l’enrobé de référence ESG10 sans GBR sera nommé R0. L’enrobé ESG10 avec 20% de GBR sera nommé R20. Finalement, l’enrobé contenant 100% de GBR, bien qu’il ne réponde pas aux exigences granulométriques d’un ESG10, conserve la même nomenclature que celle des enrobés ESG10 avec GBR et est ainsi nommé R100.

3.6.2.1 Composition des enrobés

Six enrobés, dont cinq de type ESG10 et un composé à 100% de GBR, sont utilisés pour les travaux de cette thèse. Les feuilles de mélange détaillant la composition de chaque enrobé sont

présentées à l'annexe 1 de ce document. Le Tableau 3.4 indique la proportion de GBR, la quantité de bitume de GBR et de bitume d'apport dans chaque enrobé. On y trouve également l'hypothèse de mobilisation du bitume du GBR et le ratio de bitume recyclé (RBR) de chaque enrobé. Les granulométries des enrobés sont illustrées à la Figure 3.16. La nomination des enrobés est effectuée selon le taux de GBR dans l'enrobé, comme indiqué au Tableau 3-4.

Tableau 3.4 Proportion de GBR, quantité de bitume du GBR et de bitume d'apport dans l'ensemble des enrobés ESG10 et 100% GBR de l'étude

Enrobé	R0	R20	R30	R40	R60		R80		R100
Taux de GBR (%)	0	20	30	40	60		80		100
Classe granulaire GBR	-	0-10 mm	0-10 mm	0-10 mm	0-5 mm	5-10 mm	0-5 mm	5-10 mm	0-10 mm
% bitume du GBR	-	5,06	5,06	5,06	5,49	4,3	5,49	4,3	5,06
% mobilisable	-	100	100	100	100	100	100	100	100
% bitume de GBR dans mélange	-	1,01	1,52	2,02	2,76		3,56		5,06
Propriétés bitume d'ajout PG 52S - 34								PG 82 - 22	
Masse volumique 25°C	1,021	1,021	1,021	1,021	1,021		1,021		-
% bitume ajout	5,23	4,37	4,1	3,6	2,86		2,06		-
Total %bitume dans le mélange	5,23	5,17	5,62	5,62	5,62		5,62		5,06
Vbe (%)	12,2	12,2	12,6	12,3	12,8		12,6		9,3
D _{mm}	2,531	2,515	2,524	2,532	2,537		2,548		2,592
Ratio de bitume recyclé (RBR) ⁽¹⁾ (%)	0	16	27	36	49		63		100

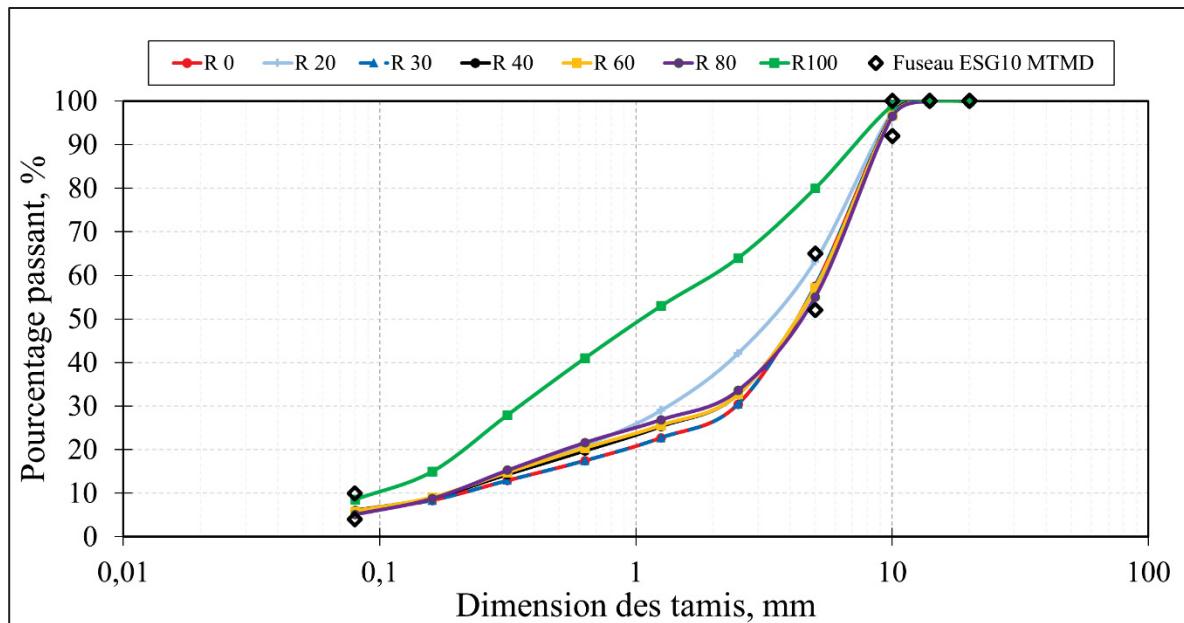


Figure 3.16 Granulométries des enrobés ESG10, 100% GBR et fuseau du ESG10 du MTMD

Après avoir pesé les matériaux granulaires tamis par tamis et recombiné les masses pour obtenir la composition du squelette minéral de chaque mélange, les différents matériaux composants l'enrobé sont conditionnés dans des étuves à la température de malaxage pour une durée de 4h afin de permettre la production en laboratoire.

3.6.2.2 Malaxage et compactage

La production des enrobés en laboratoire constitue une étape cruciale pour ce projet de recherche, car elle permet d'obtenir les échantillons qui seront testés et dont les résultats seront analysés pour aboutir aux différentes conclusions du projet. Une attention particulière est donc portée aux processus de production des enrobés en laboratoire afin d'assurer la qualité et la représentativité des échantillons produits.

Le malaxage des enrobés utilisés dans ce travail a été réalisé à l'aide d'un malaxeur thermorégulé. Le LCMB a établi des temps de malaxage spécifiques lorsque ce type de malaxeur est utilisé pour les enrobés normalisés du MTMD :

- 90 secondes pour les enrobés sans GBR et,

- 100 secondes pour ceux incorporants du GBR pour un taux maximum de 20%.

Les travaux de cette thèse comportent des enrobés avec des taux de GBR supérieurs à 20 %. L'un des objectifs de la thèse a donc été d'établir, sur la base des temps de malaxage existants au LCMB et dans la littérature, une durée de malaxage optimisée pour les enrobés à fort taux de GBR, permettant d'optimiser leurs performances. Le Tableau 3.5 présente les cinq temps de malaxage utilisés dans l'étude d'établissement de la durée de malaxage des enrobés recyclés du projet présenté en annexe de ce document, et l'explication complète de la partie des travaux sur la durée de malaxage se retrouve à l'annexe III.

Tableau 3.5 Durées de malaxage de l'étude

Malaxage	T0	T1	T2	T3	T4
Durée séquence 1(s)	60	60	60	60	60
Durée séquence 2 (s)	30	40	80	160	320
Total (s)	90	100	140	220	380

L'analyse des résultats de cette étude a permis de retenir la durée T3 (220 s) comme étant le temps approprié de malaxage pour les enrobés du projet dont les taux de GBR sont supérieurs à 20 %.

La production d'un enrobé nécessite deux paramètres essentiels : le temps de malaxage et la température de malaxage. Au Québec, la température de malaxage et celle de compactage sont dictées par le type de bitume d'apport. Ainsi, pour un bitume de type PG 52S-34, la température de malaxage est de 140 ± 2 °C et le compactage est effectué à une température de 130 ± 2 °C. Avant le malaxage, tous les matériaux granulaires et le bitume sont chauffés à 140 °C pendant 4 heures.

Le malaxage à l'aide du malaxeur thermorégulé se fait en deux étapes. La première, qualifiée de malaxage à blanc, concerne l'homogénéisation des classes granulaires de l'enrobé sans ajout de bitume. Elle est réalisée de façon automatique par le malaxeur thermorégulé, qui dispose d'une fonction automatique permettant de mélanger les matériaux dès la fermeture du couvercle. Les classes granulaires pesées et portées à température de malaxage sont introduites

par ordre décroissant de taille dans le bol de malaxage. Une fois tous les matériaux granulaires dans le bol, le couvercle est fermé et le malaxage à blanc dure environ une minute, le temps nécessaire à l'opérateur de préparer sa prise de masse de bitume.

La seconde étape, ou malaxage à noir, se fait en deux séquences. Après l'ajout de la quantité de bitume nécessaire dans le bol de malaxage, un premier malaxage des granulats avec le bitume d'une durée de 60 secondes est réalisé. Au terme de cette séquence, on ouvre le couvercle et, à l'aide d'une cuillère préchauffée, le mélange est homogénéisé manuellement. Cette opération permet de décoller les fines du fond et des bords des parois du bol de malaxage. Après cette opération, la deuxième séquence est lancée et en fonction du taux de GBR, dure 30, 40 ou 160 secondes. Le malaxage à noir peut ainsi avoir ainsi une durée totale de 90, 100 ou 220 secondes dans ce projet.

Le malaxage de l'enrobé composé à 100 % de GBR (R100) est réalisé sans ajout de bitume d'apport. La masse de GBR10 nécessaire est portée à la température de malaxage puis introduite dans le malaxeur. Les deux séquences de malaxage à noir décrites plus haut sont appliquées et R100 devient un enrobé avec toutes les particules bien enrobées de bitume. Une fois le malaxage complété et l'enrobé conditionné à la température de compactage, le compactage est réalisé selon la norme LC 26-400, en visant une compacité de 95%, à l'aide du compacteur MLPC.

Après la fabrication des plaques d'enrobé au compacteur, une cure minimale de deux jours est requise. À l'issue de cette période de cure, des éprouvettes d'essai sont prélevées par carottage des différentes plaques confectionnées.

3.6.3 Prélèvement des éprouvettes et collage des casques

Les enrobés produits en laboratoire servent à la confection de plaques à l'aide du compacteur MLPC. La réalisation des essais prévus dans le plan expérimental nécessite des échantillons

de taille normalisée. Ces échantillons sont donc prélevés des différentes plaques confectionnées en laboratoire.

Deux types de plaques dont les dimensions sont de 500 mm x 180 mm x 100 mm et 600 mm x 400 mm x 150 mm ont été fabriquées. Après le compactage et la période de cure de deux jours minima, des éprouvettes d'essai ont été prélevées de ces différentes plaques. Les Figures 3-16 à 3-19 montrent les deux types de plaques confectionnées et le plan de carottage associé à chaque type de plaque.

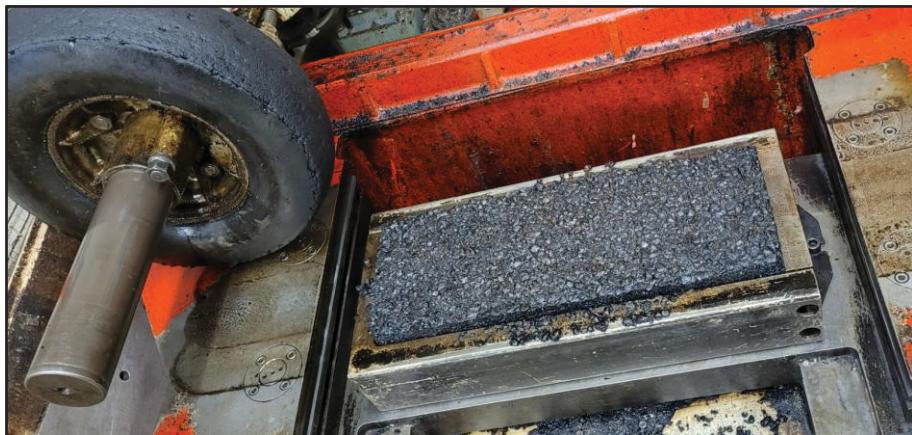


Figure 3.17 Photo d'une plaque 500 mm x 180 mm x 100 mm

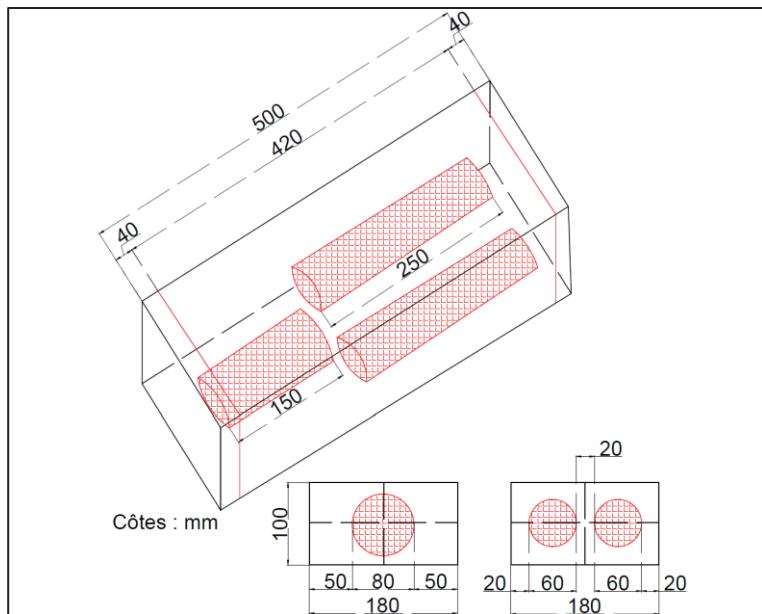


Figure 3.18 Plan de carottage d'une plaque 500 mm x 180 mm x 100 mm



Figure 3.19 Photo d'une plaque 500 mm x 180 mm x 150 mm

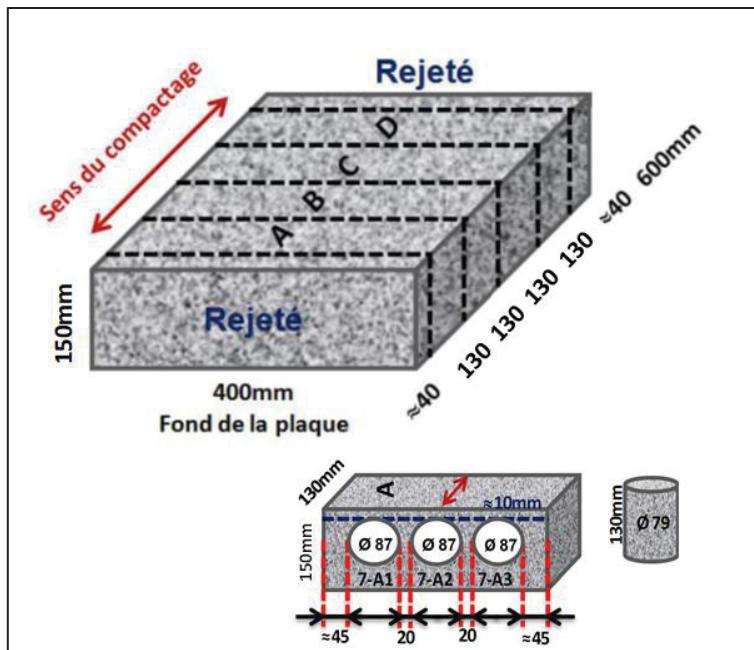


Figure 3.20 Plan de carottage d'une plaque 600 mm x 400 mm x 150 mm
Tirée des procédures du LCMB

Les éprouvettes prélevées des plaques sont conservées dans un bac à sable pour une période de cure de deux semaines. Après la cure, des casques métalliques sont collés sur les faces extrêmes des éprouvettes. Ces casques servent de point d'attache des éprouvettes dans la presse hydraulique pour les essais.

Le collage des casques sur les éprouvettes peut se faire de deux manières. La première consiste à coller les deux casques avec de l'époxy sur chaque face de l'éprouvette à l'aide d'un banc d'alignement prévu à cet effet, comme montré à la Figure 3-20. La seconde option consiste à coller un casque sur le banc et le deuxième casque sur l'autre face de l'éprouvette directement dans la presse hydraulique. Le collage dans la presse a l'avantage d'assurer un alignement parfait de l'éprouvette avec l'axe du vérin, limitant ainsi les torsions à la tête de l'éprouvette lors du serrage du casque sur le vérin de la presse hydraulique.

Les quantités de colle nécessaires pour l'opération de collage sont définies en fonction du diamètre des éprouvettes et de la méthode de collage (sur le banc ou dans la presse hydraulique).



Figure 3.21 Photo de collage d'un casque sur l'éprouvette à l'aide du banc

3.7 Formulation des enrobés R60 et R80

Les enrobés R60 et R80 n'ont pas été formulés dans la première partie du projet. Pour s'assurer de caractériser des enrobés conformes aux exigences minimales du point de vue granulométrique du MTMD, une étape de formulation avant caractérisation était nécessaire pour ces deux mélanges. Pour rencontrer les exigences granulométriques d'un enrobé ESG10, le GBR 0-10 mm a été séparé en deux classes granulaires : 0-5 mm et 5-10 mm, tel que décrit dans la section 3.3.1.

Après cette séparation, la teneur en bitume de la classe de GBR 5-10 mm a été déterminée à l'aide du four à ignition. La granulométrie de cette classe de GBR a également été établie après l'essai au four. La teneur en bitume et la granulométrie du GBR 0-5 mm ont été établies par calcul à partir des résultats du GBR 0-10 mm, du GBR 5-10 mm, et des proportions des deux classes concernées dans le GBR initial.

Après cette phase, les deux mélanges ont été fabriqués et la densité maximale du mélange (Dmm) a été mesurée pour chaque enrobé suivant la méthode LC 26-045. Les valeurs de Dmm mesurées sont de 2,537 pour le R60 et 2,548 pour le R80. La formulation a été complétée au niveau 1 uniquement à l'aide de l'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) selon la méthode LC 26-003, permettant de valider l'aptitude au compactage de l'enrobé. Un essai PCG a été réalisé pour chaque mélange, car la production de ces deux enrobés demande une étape de tamisage de quantité importante de GBR.

La composition de chaque enrobé est donnée dans leur feuille de mélange à l'annexe I et dans le Tableau 3-4. Les résultats des essais à la PCG sont présentés à la Figure 3-21. Cette figure montre que les deux mélanges sont conformes aux exigences de vides à la PCG pour un enrobé de type ESG10.

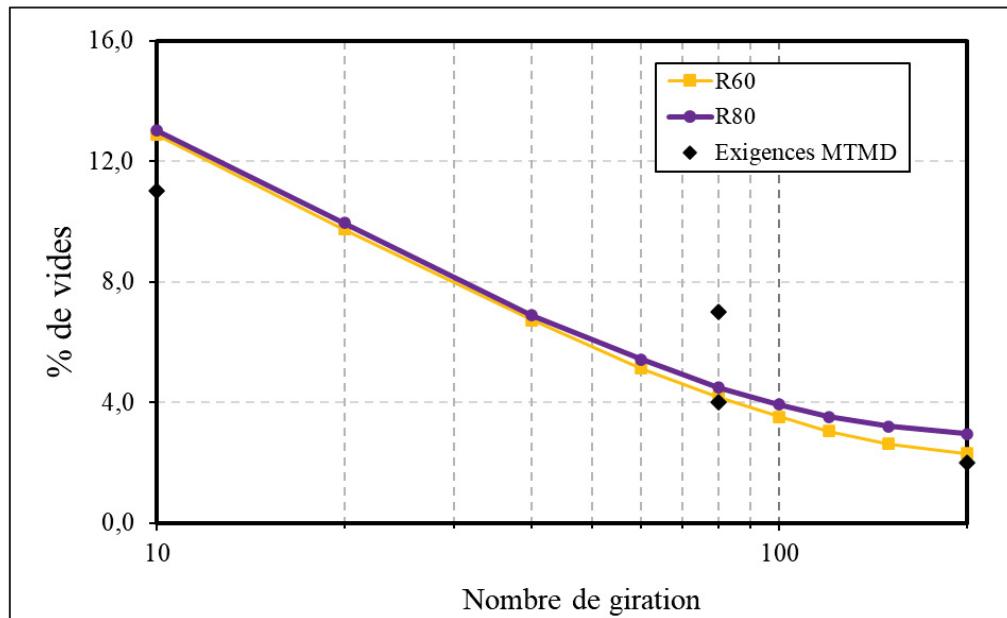


Figure 3.22 Résultats de l'essai à la PCG des enrobés ESG10 à 60 et 80% de GBR

3.8 Sommaire

Ce chapitre a présenté la démarche expérimentale mise en place pour l'atteinte des objectifs de la thèse. On y retrouve la description détaillée des différents essais et la précision des normes

relatives à chaque essai le cas échéant. Les caractéristiques des mélanges bitumineux utilisés sont données ainsi que celles des matériaux ayant servi à la production de ces mélanges en laboratoire. Finalement, les procédures de compactage des plaques, de prélèvement des éprouvettes et de préparation des éprouvettes ont été présentées.

CHAPITRE 4

COMPORTEMENT VISCOÉLASTIQUE LINÉAIRE, PROPRIÉTÉS THERMIQUES ET COMPORTEMENT AU RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ

4.1 Introduction

L'utilisation du GBR dans les enrobés a une incidence sur le comportement, les propriétés et les performances des enrobés. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'influence de l'ajout du GBR sur le module complexe, le coefficient de dilatation-contraction thermique (DCT) et les performances au retrait thermique empêché des enrobés. Ce chapitre vise à répondre aux questions suivantes :

- Comment les composantes du module complexe sont-elles influencées par l'ajout du GBR?
- Quelle est l'incidence du GBR sur le coefficient de dilatation-contraction thermique (DCT)?
- À partir de quel taux de GBR le retrait thermique est-il influencé de façon significative?

La description du programme expérimental de même que des matériaux utilisés est présentée dans les prochaines sections. Les résultats obtenus sont ensuite analysés pour déterminer l'impact du GBR sur ces différents aspects des enrobés.

4.2 Programme expérimental et matériaux

4.2.1 Programme expérimental

Le comportement et les performances d'un enrobé évoluent avec l'ajout de granulats bitumineux recyclés (GBR). Pour évaluer l'influence de l'augmentation de la quantité de GBR sur le comportement rhéologique, les propriétés thermiques et les performances à basse température, un programme expérimental a été mis en place dans le cadre de cette étude. Celle-ci est réalisée avec un enrobé de surface de type ESG10 comprenant divers taux de GBR (0,

20, 30, 40, 60 et 80 %), ainsi qu'un enrobé 0-10 mm composé à 100 % de GBR. Ces différents mélanges ont été produits sur la base de la norme 4202 du MTMD avec des ajustements au niveau de certaines exigences et avec des durées de malaxage variant en fonction du taux de GBR de 90 s à 220 s comme le montre le diagramme de la Figure 4.1. Par la suite, les essais de module complexe, de mesure du coefficient de dilatation/contraction thermique et de TSRST ont été réalisés sur chaque enrobé.

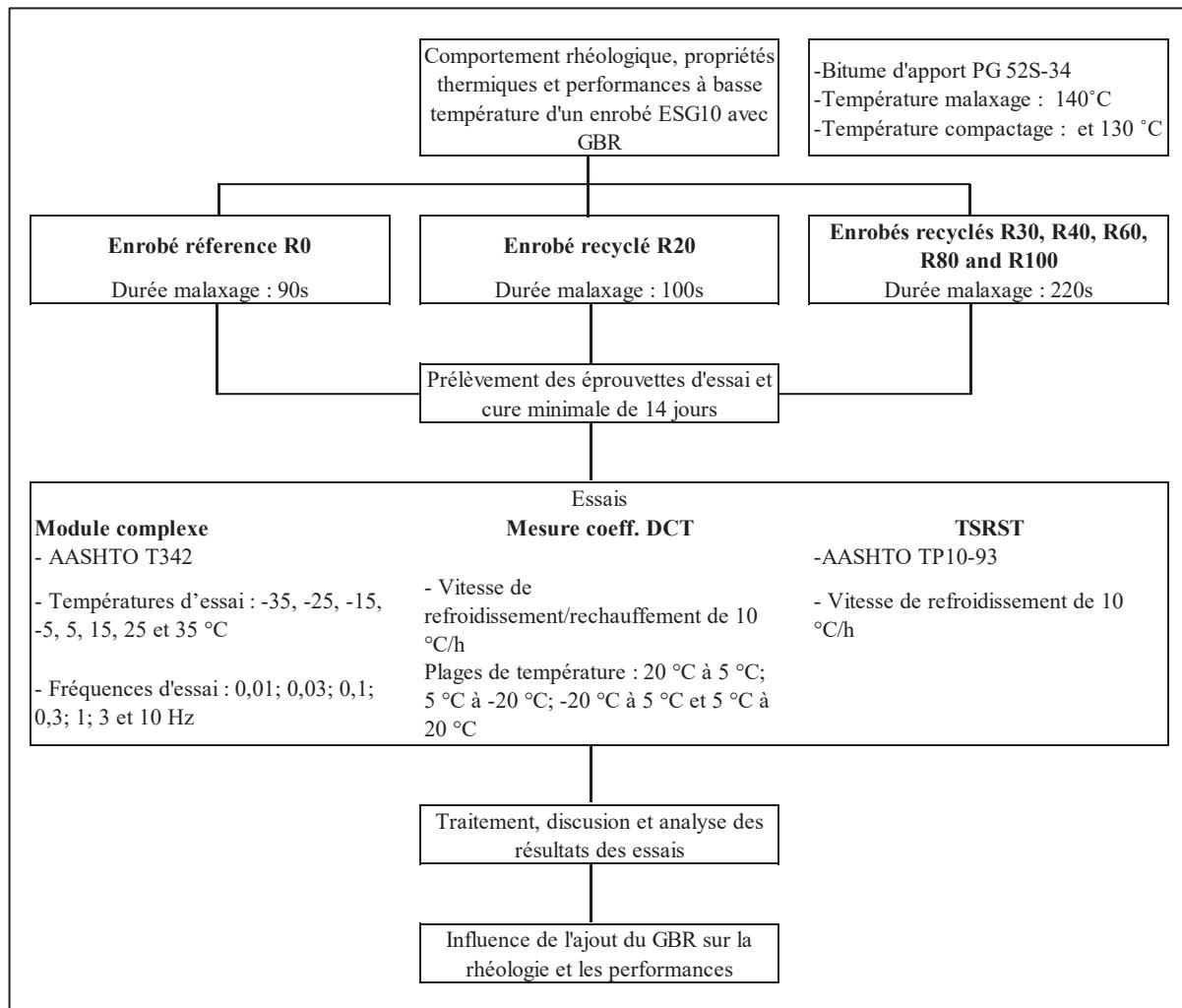


Figure 4.1 Diagramme de la démarche expérimentale pour l'évaluation du comportement VEL, les propriétés thermiques et les performances à basse température des enrobés à l'étude

4.2.2 Matériaux

Les matériaux utilisés pour cette étude ont été décrits en détail dans le chapitre 3. Les granulats vierges sont d'origine naturelle et de type granitique. Le GBR provient de la région métropolitaine de Montréal et un bitume d'apport de type PG 52S-34 est utilisé. La composition des mélanges et les caractéristiques des différents matériaux sont détaillées dans le Tableau 3.4. Les courbes granulométriques des enrobés sont illustrées à la Figure 3.14.

4.2.3 Préparation des matériaux, des mélanges et prélèvement des éprouvettes

Les enrobés ont été produits et compactés en laboratoire selon les conditions de temps de malaxage, de température de malaxage et de compactage décrites dans le diagramme de la Figure 4-1 et dont les détails sont fournis au chapitre 3. Après production, compactage, cure minimale de deux jours des plaques à la température de la pièce, prélèvement des éprouvettes et une cure minimale de quatorze jours pour les éprouvettes, les différents essais de module complexe, de mesure du coefficient de dilatation/contraction et retrait thermique empêché ont été réalisés. Les résultats de ces essais sont présentés et analysés.

4.3 Résultats des essais

Les résultats des essais de module complexe (MC) sont d'abord présentés, suivit des résultats de la mesure du coefficient DCT et finalement des résultats des essais de retrait thermique empêché (TSRST).

4.3.1 Module complexe

Douze essais de module complexe ont été réalisés pour cette partie de l'étude. Les résultats sont présentés, discutés et analysés dans cette section.

4.3.1.1 Résultats et discussions

Les résultats expérimentaux ont été calibrés en utilisant le modèle rhéologique 2S2P1D. Les paramètres de calibration 2S2P1D ainsi que les teneurs en vides des éprouvettes d'essai sont présentés dans le Tableau 4-2. La teneur en vides des éprouvettes varie d'un enrobé à l'autre, avec des valeurs comprises entre 3 et 6 %. La teneur en vides ciblée lors du compactage des plaques était de $5\% \pm 2\%$. Il a été observé que, pour la même énergie de compactage, l'ajout de GBR entraîne une diminution des vides lors du compactage des plaques.

Au niveau des paramètres 2S2P1D, on observe une variation de ces paramètres d'un enrobé à l'autre. L'ajout de GBR impact les paramètres 2S2P1D.

Tableau 4.1 Paramètres 2S2P1D à T_{ref} de 15 °C des enrobés de l'étude

Enrobé	R0	R20		R30		R40		R60		R80		R100
# Éch.	Ep 01	Ep 01	Ep 02	Ep 01								
E00 (MPa)	15	30	17	22	15	25	22	20	50	50	60	300
E0 (MPa)	33 500	21 200	19 500	36 000	31 500	34 000	33 300	39 000	38 500	41 000	43 000	35 600
h	0.72	0.70	0.70	0.62	0.62	0.60	0.60	0.64	0.60	0.60	0.56	0.50
k	0.24	0.22	0.22	0.21	0.21	0.19	0.19	0.20	0.20	0.19	0.18	0.15
δ	2.50	2.60	2.80	2.50	2.50	2.20	2.30	2.60	2.60	2.60	2.60	2.40
τ _E	0.0006	0.0010	0.0010	0.0022	0.0010	0.0035	0.0035	0.0070	0.008	0.0320	0.0320	0.3000
β	90	120	120	120	120	150	150	200	200	200	200	200
C1	26.5	26.2	29.4	31.8	27.1	21.1	41.5	43.7	42.8	44.7	42.0	122.6
C2	210.6	208.2	208.9	248.3	209.7	172.0	313.0	321.4	320.1	319.9	318.5	818.2
Vides (%)	6.0	5.1	4.8	5.7	6.4	5.5	6.1	3.5	4.3	3.2	3.0	5.2

Le Tableau 4-2 présente les paramètres de calibration 2S2P1D les enrobés étudiés. La calibration des résultats expérimentaux au modèle 2S2P1D se fait en observant le calage en simultané dans les divers plans de présentation des résultats de l'essai de module complexe. Ce qui peut parfois conduire à une mauvaise superposition dans un des plans en particulier. Le calage du R100 en est un exemple. Pour ce mélange, on obtient un décalage dans l'espace de Black entre les résultats expérimentaux et le modèle rhéologique.

En analysant les paramètres 2S2P1D obtenus en fonction du taux de GBR, plusieurs tendances et observations se dégagent.

L'ajout du GBR dans le ESG10 entraîne une diminution quasi linéaire des éléments paraboliques h et k , comme illustré aux Figures 4-3 (a) et (b). Ces éléments paraboliques sont associés à la viscoélasticité du matériau et leur diminution pourrait suggérer une réduction de la composante visqueuse avec l'augmentation du taux de GBR. L'enrobé devient ainsi plus élastique et plus rigide avec l'ajout de GBR.

L'élément de forme δ ne présente pas de tendance claire avec l'ajout de GBR, comme montré à la Figure 4-3 (c). Cela suggère que cet élément n'est pas significativement influencé par la présence de GBR dans le mélange. L'élément de forme δ est peut-être plus dépendant d'autres facteurs tels que la granulométrie ou les vides dans l'éprouvette d'essai.

Bien que l'évolution du temps caractéristique τ_E ne soit pas représentée graphiquement, les valeurs inscrites au Tableau 4-2 montrent une augmentation de τ_E avec l'ajout de GBR. Une augmentation de τ_E pourrait signifier que la viscosité du mélange définie par $\eta = (E_0 - E_{00})\beta\tau$ augmente. Ainsi, la rigidité du mélange augmenterait avec l'ajout de GBR.

Pour la constante β , l'ajout de GBR entraîne une augmentation linéaire jusqu'à un taux de 60% de GBR, après quoi elle se stabilise. La constante β est liée à la viscosité newtonienne tout comme le temps caractéristique τ_E . L'augmentation de β jusqu'à 60% de GBR suggère une contribution croissante du bitume du GBR. Elle se stabilise par la suite, en raison de la prédominance du bitume du GBR dans le mélange.

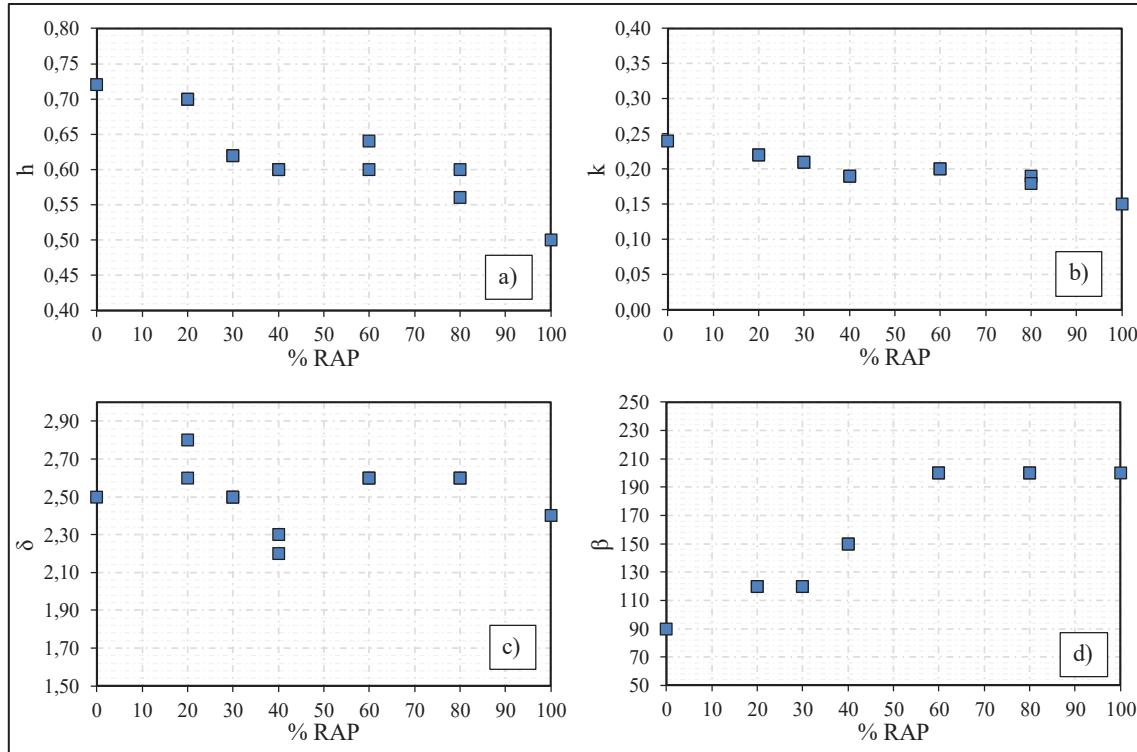


Figure 4.2 Évolution des paramètres h , k , δ et β du modèle 2S2P1D des enrobés de l'étude

Les paramètres 2S2P1D varient d'un enrobé à l'autre, montrant que l'ajout de GBR a un impact significatif sur ces paramètres. La Figure 4-4 présente les coefficients de translation a_T de l'ensemble des enrobés ainsi que celui du modèle WLF (Williams-Landel-Ferry) de l'enrobé R0. Il n'existe pas d'écart majeur entre les différents coefficients a_T des enrobés. Cependant, une observation importante est que l'enrobé R0 ne respecte pas le principe d'équivalence temps-température (PETT) à haute température, car son coefficient à cette température (35°C) se décale de la courbe du coefficient WLF-R0. Cette déviation pourrait être attribuée au bitume PG 52S-34 utilisé. L'écart à cette température du R100 s'explique par le fait que cet enrobé soit différent en tout point de vue des enrobés ESG10. L'ajout de GBR n'a pas un impact significatif sur les coefficients a_T . Cependant, il permet à l'enrobé ESG10 de respecter le PETT à haute température.

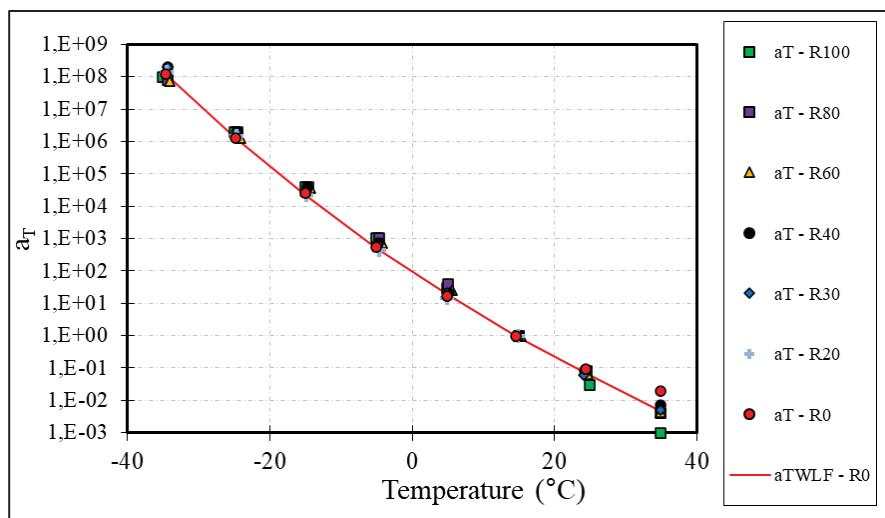


Figure 4.3 Coefficients de translation a_T à $T_{ref} = 15$ °C des enrobés ESG10, de l'enrobé 100% GBR et le modèle WLF de l'enrobé R0

Les Figures 4-5 à 4-7 présentent les résultats des essais de module complexe dans le plan Cole-Cole, l'espace de Black, et les courbes maîtresses 2S2P1D pour l'ensemble des enrobés. L'utilisation des courbes maîtresses 2S2P1D, plutôt que des points expérimentaux, permet de mieux visualiser les différences entre les mélanges.

Dans le plan Cole-Cole, des écarts marqués sont observés entre les comportements des enrobés ESG10. Notamment, le comportement de l'enrobé R20 diffère significativement de celui des autres enrobés. Cette différence marquée est attribuée à la granulométrie plus fine de l'enrobé R20, comme indiqué à la Figure 4-2. Pour les autres enrobés ESG10, les différences sont principalement observées au niveau du module vitreux E_0 , qui semble augmenter avec l'ajout du GBR. Cependant, sans considérer les différences de teneurs en vides des éprouvettes, aucune conclusion définitive ne peut être tirée, car le module vitreux est influencé par les vides dans les éprouvettes d'enrobé.

Dans l'espace de Black, l'ajout du GBR semble influencer l'angle de phase. La valeur maximale de l'angle de phase diminue avec l'ajout du GBR dans l'enrobé ESG10. Cette observation indique que l'ajout du GBR modifie le comportement viscoélastique des enrobés, en rendant le mélange plus rigide.

Les courbes maîtresses montrent que l'ajout du GBR dans l'enrobé ESG10 entraîne une augmentation du module de rigidité, représentée par un déplacement de la courbe maîtresse vers le haut. Cette observation est cohérente pour tous les enrobés sauf l'enrobé R20. L'enrobé R20 déroge à cette tendance, particulièrement dans les hautes fréquences équivalentes, en raison de sa granulométrie plus fine, comme mentionné précédemment.

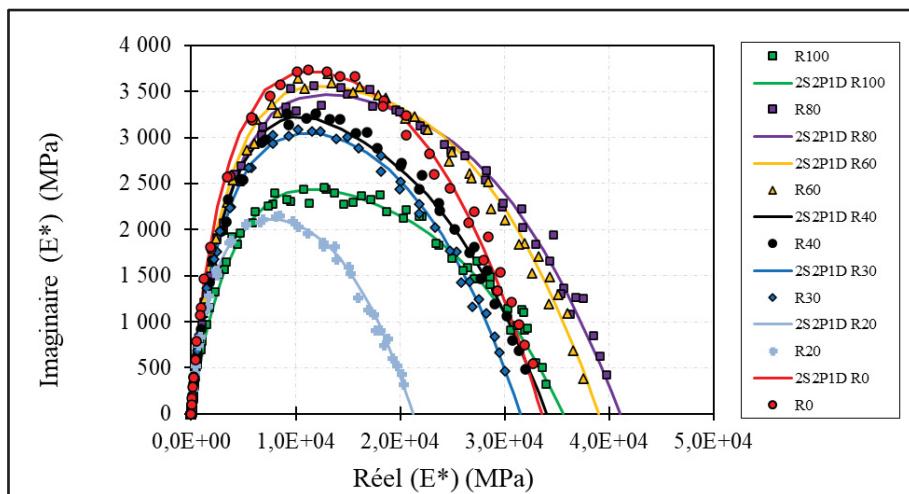


Figure 4.4 Résultats dans le plan Cole-Cole des enrobés à l'étude

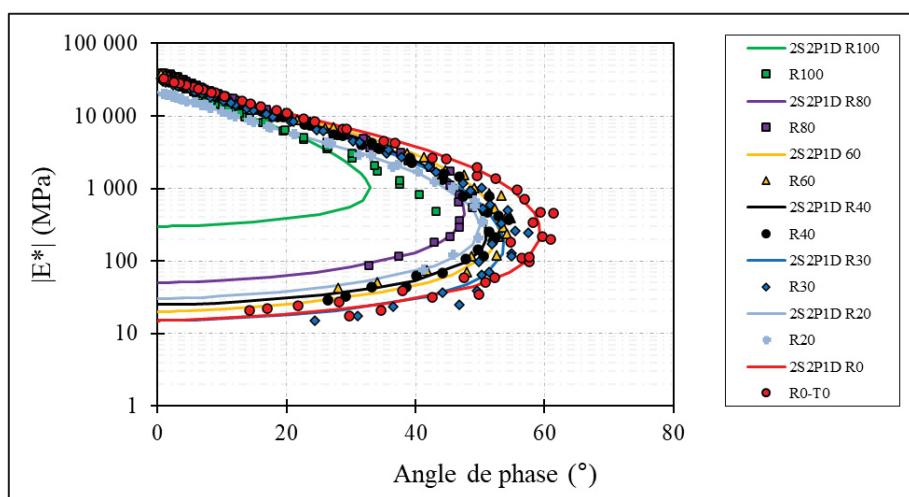


Figure 4.5 Résultats dans l'espace de Black des enrobés à l'étude

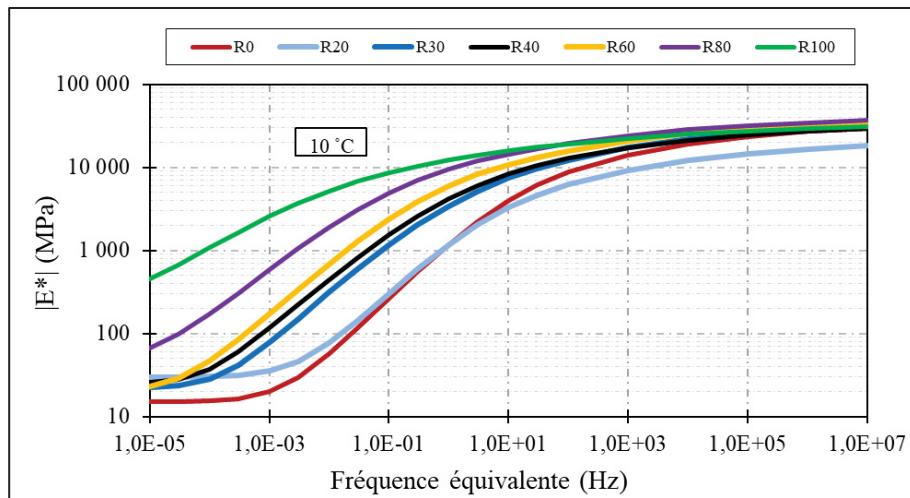


Figure 4.6 Courbes maîtresses 2S2P1D des enrobés à l'étude

L'ajout de GBR influence le comportement rhéologique et la rigidité de l'enrobé. Pour prédire l'évolution du module de rigidité avec l'ajout de GBR, le modèle de Witczak et Fonseca (1996) a été utilisé et comparé aux modules de rigidité obtenus à partir des résultats du module complexe pour chaque enrobé. Ce modèle de prédiction est défini par l'équation (4-1) :

$$\begin{aligned} \text{Log } E = & -0.261 + 0.008225p_{200} - 0.00000101(p_{200})^2 + 0.00196p_4 - \\ & 0.03157V_a - 0.415 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \\ & \frac{(1.87 + 0.002808p_4 + 0.0000404p_{38} - 0.0001786(p_{38})^2 + 0.0164p_{34})}{1 + e^{(-0.716 \log f - 0.7425 \log \eta)}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Où

E = module dynamique de l'enrobé bitumineux, en 10^5 psi;

η = viscosité du bitume, en 10^6 psi (à n'importe quelle température, degré de vieillissement);

f = fréquence de sollicitation, en Hz;

V_a = vides dans le mélange, en pourcentage;

V_{beff} = volume de bitume effectif, en pourcentage;

p_{34} = pourcentage retenu sur le tamis de 3/4 pouces, par poids total des agrégats (cumulatif) ;

p_{38} = pourcentage retenu sur le tamis de 3/8 pouces, par poids total des agrégats (cumulatif) ;

p_4 = pourcentage retenu sur le tamis n° 4, par poids total des agrégats (cumulatif) ; et
 p_{200} = pourcentage passant au tamis n° 200, par poids total de l'agrégat.

La Figure 4.7 montre les modules mesurés et les valeurs du modèle prédictif. Les modules mesurés et prédits sont proches pour les mélanges R0 et R20. Pour les enrobés avec des taux de GBR supérieurs à 20 %, les différences entre les valeurs mesurées et prédictes sont très importantes. Le modèle de prédiction n'est pas adapté à la prédiction du module des enrobés recyclés à fort taux de GBR. Cela peut être dû au fait que le modèle ne prend pas en compte les tamis de 2,5 et 5,0 mm. En effet, les tamis 2,5 et 5,0 mm peuvent exercer une influence majeure sur les caractéristiques et les performances d'un enrobé de type ESG10 (MTMD, 2005).

La figure 9 montre que l'ajout de 20% de GBR dans l'enrobé n'a pas eu d'influence sur le module de rigidité dans cette étude. L'influence de l'ajout de GBR devient apparente à partir de 30 %, avec une augmentation significative observée entre les mélanges R20 et R30. À partir de 20 %, l'augmentation du module de rigidité suit une tendance linéaire.

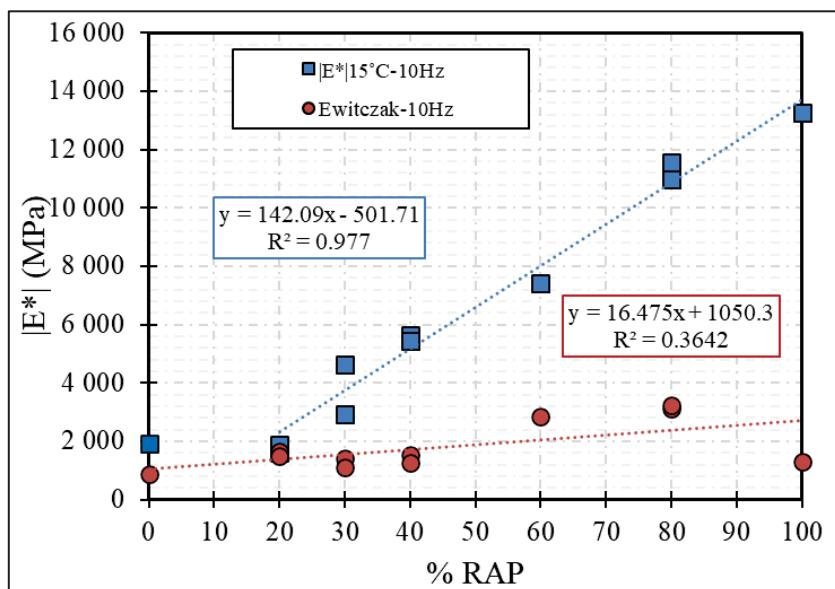


Figure 4.7 Évolution de la norme du module complexe expérimental à 15 °C-10 Hz et module prédit à 10 Hz en fonction du taux de GBR

Les résultats dans le plan Cole-Cole, l'espace de Black, les courbes maîtresses 2S2P1D et les modules de rigidité révèlent plusieurs influences de l'ajout du GBR dans l'enrobé ESG10. Ces observations fournissent des indications de l'influence du GBR sur les propriétés rhéologiques des enrobés, mais une analyse plus approfondie, en tenant compte des variations de teneurs en vides et de la granulométrie, est nécessaire pour tirer des conclusions définitives.

4.3.1.2 Analyse du plan Cole-Cole

Les différentes formes de présentation des résultats des essais de module complexe (MC) et les paramètres 2S2P1D, permettant d'établir le comportement viscoélastique linéaire (VEL), ont révélé une influence de l'ajout du GBR. Cependant, cette conclusion est jugée limitée en raison de l'influence des vides et de la granulométrie sur les résultats de l'essai de module complexe.

La Figure 4-9 présente les vides mesurés dans les éprouvettes d'essai MC, montrant la nécessité de les prendre en compte dans l'analyse de cette étude. Pour éliminer l'influence des vides et de la granulométrie sur l'analyse du comportement VEL, les résultats de MC peuvent être normalisés. L'analyse présentée dans cette section se concentre uniquement sur le plan Cole-Cole, jugé plus pertinent pour l'étude de l'influence de l'ajout du GBR sur le comportement VEL.

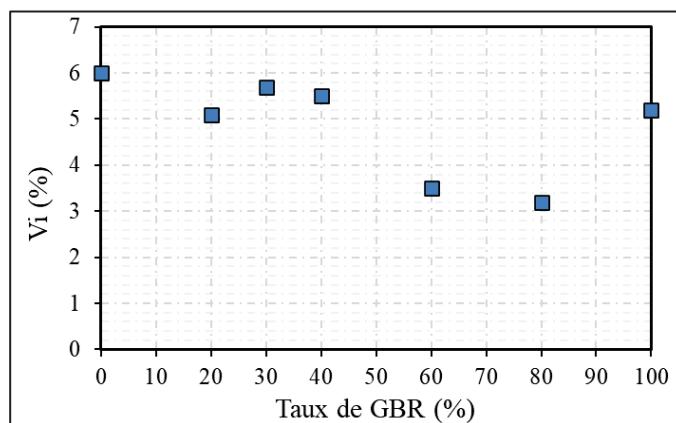


Figure 4.8 Évolution des vides des éprouvettes d'essai MC en fonction du taux de GBR

Le plan Cole-Cole ainsi normalisé est présenté à la Figure 4-10. Les courbes obtenues permettent de délimiter trois zones de comportement. Ces zones sont définies arbitrairement en plage de température de la façon suivante :

- Zone 1 : $T^{\circ}\text{C} \geq 25^{\circ}\text{C}$, représente les très basses fréquences équivalentes.
- Zone 2 : $25^{\circ}\text{C} < T^{\circ}\text{C} < -15^{\circ}\text{C}$, inclut les basses, moyennes et hautes fréquences équivalentes.
- Zone 3 : $\leq -15^{\circ}\text{C}$, correspond aux très hautes fréquences équivalentes.

À la vue de la Figure 4.9, les zones 1 et 3 ne présentent pas d'intérêt pour l'analyse, car les points se confondent dans ces deux zones. Dans la zone 1, les hautes températures et faibles fréquences, suggère des conditions favorisant l'orniérage. Le comportement des enrobés est similaire selon la Figure 4.9. Les légères différences observées peuvent être attribuées à la granulométrie et à l'ajout du GBR qui entraîne une augmentation de rigidité comme montré précédemment.

Dans la zone 3, les enrobés sont complètement rigides avec un comportement à prédominance élastique, ce qui ne permet pas d'observer de véritables écarts entre les enrobés. Les très basses températures de la zone 3 suggèrent le comportement à la fissuration thermique. Les légères différences observées entre l'enrobé de référence R0 et les autres enrobés montrent que l'ajout de GBR pourrait exercer une influence sur les performances au retrait thermique empêché.

Dans la zone 2, les enrobés ont un comportement viscoélastique linéaire. Des écarts et des différences intéressantes sont observés. L'effet de l'ajout du GBR est bien mis en avant dans la zone 2. En effet, l'ajout du GBR dans le ESG10 entraîne une augmentation de la viscosité. L'ajout du GBR combine deux bitumes aux caractéristiques différentes, formant un bitume recyclé ou alliage dont les caractéristiques se situent entre celles du bitume d'apport et du bitume du GBR. La zone 2 est particulièrement intéressante, car les modules de rigidité à $10^{\circ}\text{C} - 10\text{ Hz}$ et $15^{\circ}\text{C} - 10\text{ Hz}$, habituellement utilisés pour le dimensionnement des chaussées, se situent dans cette zone. Dans cette zone, l'ajout du GBR a entraîné une diminution de la partie imaginaire (visqueuse) du module complexe du ESG10. Cette diminution de la composante

visqueuse peut être considérée comme une perte de la capacité de relaxation des contraintes de l'enrobé ESG10. Le comportement à la fatigue est mesuré dans cette zone. La diminution de la partie visqueuse pourrait impacter les performances en fatigue de l'enrobé recyclé.

Pour mieux comprendre l'évolution de la diminution du E^* imaginaire dans ce plan Cole-Cole normalisé, l'écart entre la valeur maximale de la courbe du R0 et celle de chacun des enrobés avec GBR a été déterminé à l'aide de l'équation (4-2). Les résultats obtenus sont inscrits au Tableau 4-3.

$$\text{Perte } E^*_{\text{Imaginaire}} = \frac{E^*_{\text{max}}_{\text{Im.R0}} - E^*_{\text{max}}_{\text{Im.Ri}}}{E^*_{\text{max}}_{\text{Im.R0}}} \times 100 \quad (4.2)$$

Cet écart représente la perte de module imaginaire liée à l'ajout du GBR. Ainsi, l'ajout du GBR dans le ESG10 a entraîné une perte du E^* imaginaire entre 11 et 27 %. Cette perte cause une augmentation de la rigidité, une diminution de la capacité de relaxation des contraintes pour ces enrobés et, par conséquent, pourrait exercer une influence négative sur les performances à la fissuration thermique.

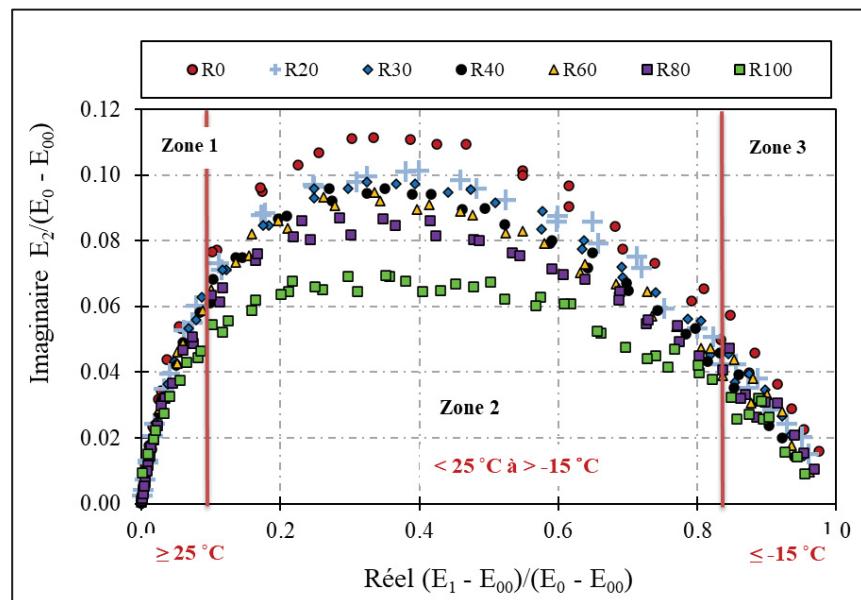


Figure 4.9 Plan Cole-Cole normalisé des enrobés ESG10 et 100% GBR

Tableau 4.2 Perte du module E* imaginaire entre l'enrobé R0 et les enrobés avec GBR

Enrobé	RBR (%)	Perte E* imaginaire (%)
R0	0	0
R20	16	11
R30	27	13
R40	36	14
R60	49	15
R80	63	27
R100	100	38

4.3.1.3 Analyse des zones (1, 2 et 3) de comportement du MC

La normalisation du plan Cole-Cole a révélé trois zones distinctes dans l'analyse de l'influence de l'ajout de GBR sur le comportement viscoélastique linéaire (VEL) des enrobés de cette étude. Ces zones de comportement ont été définies en fonction de plages de températures spécifiques pour simplifier leur interprétation. Cependant, étant donné que le module complexe est dépendant à la fois de la température et de la fréquence, une analyse plus détaillée de l'impact du GBR dans ces zones est nécessaire. De plus, des performances spécifiques peuvent être attribuées à chaque zone de comportement identifiée.

Pour l'analyse du comportement des enrobés, un ratio entre les composantes visqueuse (E2) et élastique (E1) a été calculé pour chaque enrobé. Ce ratio permet une analyse comparative entre les différents enrobés. Il pourrait également exister une relation entre ce ratio et les performances à l'orniérage ainsi qu'à la fissuration des enrobés recyclés.

Les critères des spécifications des performances des enrobés, à travers le monde, sont souvent basés sur les caractéristiques des bitumes, nécessitant de multiples essais tels que le DSR (*Dynamic Shear Rheometer*), le BBR (*Bending Beam Rheometer*), l'essai MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) et l'essai DENT (*Double-Edged Notched Tension*), pour leurs établissements (Booshehrian, Mogawer, & Bonaquist, 2013; Iliuta, Andriescu, Hesp, & Tam, 2004; Leclerc, 2018; Lesueur, 2002). De nombreux essais sur le bitume sont donc nécessaires pour prédire l'ensemble des performances de l'enrobé bitumineux, ce qui montre l'importance du bitume dans ces mélanges.

Dans le cas des enrobés recyclés, la caractérisation du bitume doit être réalisée après extraction du bitume de l'enrobé recyclé. Ce processus pourrait, d'une part, favoriser le mélange entre les deux bitumes présents dans l'enrobé recyclé. D'autre part, le solvant utilisé lors de l'extraction peut, dans une certaine mesure, altérer les caractéristiques du bitume, affectant ainsi la prédition des performances de l'enrobé recyclé.

Pour les enrobés à fort taux de GBR, il est essentiel de concentrer les efforts non seulement sur la caractérisation du bitume, mais également sur celle de l'enrobé lui-même. La mesure du module complexe doit être une exigence pour ces enrobés, car une analyse plus détaillée de cet essai permettrait de prédire une large gamme de performances des enrobés recyclés.

■ **Zone 1 : Analyse des composantes visqueuse et élastique**

La Figure 4.10 illustre l'évolution des composantes E1 (élastique), E2 (visqueuse) et de l'angle de phase du module complexe en fonction du taux de GBR à la température de 25 °C et à une fréquence de 0,3 Hz. L'évolution de ces composantes pour cette même température et pour les fréquences 3 Hz, 10 Hz, et 20 Hz sont disponible en annexe de ce document. Un ratio E2/E1 a été calculé pour chaque enrobé à partir des données de la Figure 4.10 et des autres figures en annexe. L'évolution de ce ratio en fonction du taux de GBR à 25 °C et aux fréquences 0,3 Hz, 3 Hz, 10 Hz et 20 Hz est illustrée à la Figure 4.12. Ce ratio est une correspondance de l'angle de phase. L'analyse menée ici se concentre principalement sur ce ratio, car nous estimons qu'il simplifie la compréhension de l'équilibre entre la composante visqueuse et la composante élastique, tel que proposé dans cette étude. Lorsque le ratio E2/E1 est égal à 1, l'angle de phase a une valeur de 45°. Ce qui indique une égalité totale entre les deux composantes suggérant un équilibre parfait entre les comportements visqueux et élastiques pour la fréquence ou ce ratio est obtenu.

Dans cette zone, indépendamment de la fréquence, l'ajout du GBR tend à augmenter les composantes E1 et E2 du module complexe, l'angle de phase subit une diminution avec l'ajout

du GBR. Cependant, l'ampleur de cette augmentation ou diminution varie selon la fréquence considérée :

À 0,3 Hz : Le ratio E2/E1 (Figure 4.11), qui représente la relation entre les comportements visqueux et élastiques, reste très proche de 1 jusqu'à un taux de 80 % de GBR. On observe que pour les valeurs d'angle de phase supérieures ou égales 40°, le ratio E2/E1 tend vers 1. On s'attend pour la suite que l'augmentation de la fréquence et/ou la baisse de température entraîne une diminution de ce ratio.

À 3 Hz et 10 Hz : Le ratio E2/E1 se maintient proche de 1 jusqu'à 60 % de GBR. Au-delà de ce taux, l'équilibre entre les comportements visqueux et élastiques commence à se déséquilibrer, indiquant une influence croissante du GBR sur le comportement viscoélastique.

À 20 Hz : Bien que cette fréquence ne fasse pas partie des fréquences expérimentales de ce projet, l'analyse montre que le ratio E2/E1 tend vers 1 jusqu'à un taux de GBR de 40 %. Cela suggère que l'effet de l'ajout de GBR sur l'équilibre entre les comportements visqueux et élastiques est plus marqué à des fréquences plus élevées.

En établissant un parallèle entre ce ratio et la performance à l'orniérage, par exemple, on pourrait se focaliser sur le ratio à 0,3 Hz. En supposant que la condition 25 °C-0,3 Hz correspondrait à la condition d'un essai d'orniérage de 58 °C-1 Hz, on s'attendrait à obtenir des performances similaires jusqu'à 60 % d'ajout de GBR, avec une amélioration au-delà de ce taux. Ainsi, une diminution de ce ratio indiquerait une amélioration des performances à l'orniérage.

En revanche, en ce qui concerne la fatigue ou la fissuration thermique, l'effet serait inverse : une diminution du ratio E2/E1 signalerait une dégradation des performances. Car les performances en fatigue tout comme à la fissuration thermique sont en grande partie attribuées à la composante visqueuse E2. Par conséquent, un ratio égal à 1 pourrait garantir des performances similaires à tout moment pour différents mélanges recyclés. Les essais

d'ornierage et de fatigue n'étant pas réalisés dans cette étude, par manque de matériaux des sources identiques que les sources initiales, les hypothèses énoncées n'ont pas pu être vérifiées.

L'analyse des Figures 4.11 et 4.12 montre que, bien que l'ajout de GBR exerce une influence sur les composantes visqueuse et élastique du module complexe, cet impact reste relativement modéré dans la zone 1. Le ratio E2/E1 indique que l'effet du GBR sur le comportement viscoélastique est principalement significatif à des fréquences plus élevées, mais qu'il reste limité à des fréquences plus basses. Ainsi, dans la zone 1, l'ajout de GBR n'a pas un impact significatif sur le comportement VEL global, surtout aux fréquences les plus basses.

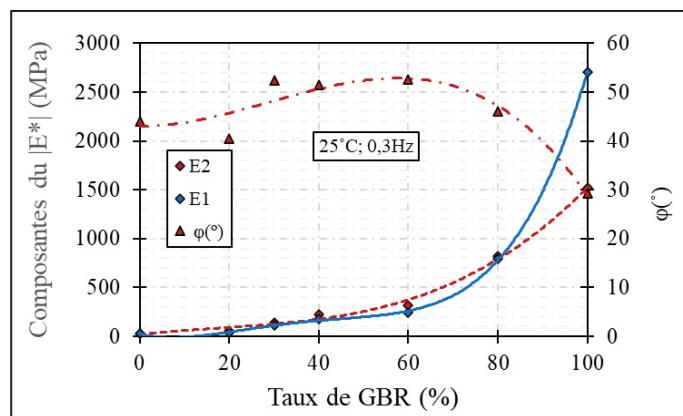


Figure 4.10 Évolution des composantes visqueuse, élastique et angle de phase du module complexe en fonction du taux de GBR à 25° - 0,3 Hz dans la zone 1

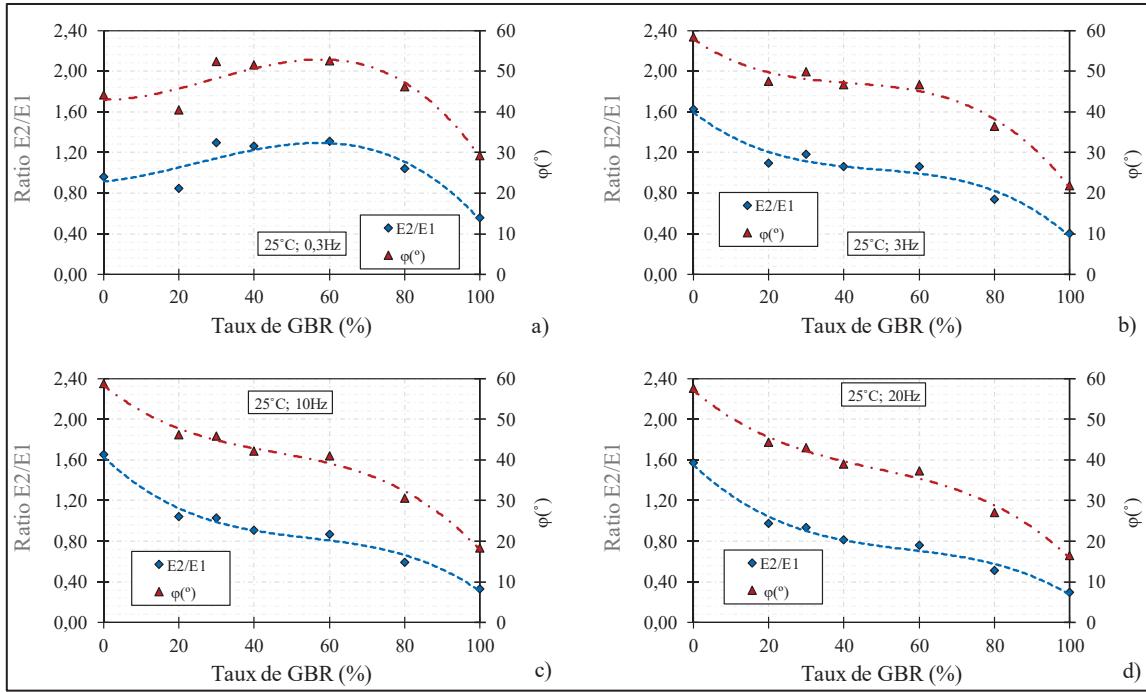


Figure 4.11 Évolution du ratio E2/E1 et angle de phase du module complexe en fonction du taux de GBR dans la zone 1
 a) 25° - 0,3 Hz b) 25° - 3 Hz c) 25° - 10 Hz d) 25° - 20 Hz

■ Zone 2 : Analyse des composantes visqueuse et élastique

Dans la zone 2 du plan Cole-Cole, l'évolution des ratios E2/E1 obtenus et des angles de phase sont illustrés à la Figure 4.12. Comme observé précédemment dans la zone 1, l'ajout de GBR entraînant une augmentation des composantes E1 et E2, s'observe également dans la zone 2, avec quelques nuances selon la fréquence considérée. Les figures illustrant cette augmentation sont présentées en annexe.

À 0,3 Hz : Le ratio E2/E1 reste proche de 1 jusqu'à un taux de 60 % de GBR, suggérant un équilibre relatif entre les comportements visqueux et élastiques. Cela indique que, à basse fréquence, l'ajout de GBR ne modifie pas significativement l'équilibre entre ces deux composantes jusqu'à ce seuil.

À 3, 10, et 20 Hz : Le ratio E2/E1 commence à baisser avec l'augmentation de la fréquence. L'augmentation de la fréquence révèle une prédominance progressive de la composante

élastique (E1) dès que le taux de GBR dépasse 20 %. Cette prédominance de l'élasticité dans le comportement de l'enrobé devient plus marquée avec l'augmentation du taux de GBR, et la relation entre E1 et le taux de GBR, à partir de 20%, suit une tendance quasi linéaire. Cela montre que, dans cette plage de fréquences, l'ajout de GBR exerce une influence notable sur le module complexe, avec une augmentation significative de la rigidité élastique du matériau lorsque l'ajout de GBR est supérieur à 20%.

Dans la zone 2, l'ajout de GBR exerce une influence plus marquée sur le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé par rapport à la zone 1. À des fréquences plus élevées (3, 10 et 20 Hz), le GBR favorise une augmentation de la composante élastique (E1), indiquant une rigidification du matériau. Ce phénomène est particulièrement visible dès que le taux de GBR dépasse 20 %, avec une tendance linéaire claire qui montre que l'ajout de GBR contribue de manière significative à l'augmentation du module élastique dans cette zone de températures.

Ainsi, l'influence du GBR dans la zone 2, et particulièrement à des fréquences élevées, suggère que les enrobés recyclés contenant des taux importants de GBR pourraient offrir une meilleure résistance mécanique dans des conditions de service impliquant des sollicitations fréquentes et des températures intermédiaires. Il serait très intéressant qu'une étude sur la fatigue soit réalisée pour ces matériaux pour identifier le type de relation qui existerait entre le ratio E2/E1 et la performance en fatigue des enrobés recyclés. Au regard de la Figure 4.12(c), on pourrait supposer que la résistance en fatigue à 15 °C et 10 Hz démunirait avec l'ajout de GBR dans l'enrobé. Une étude sur la résistance en fatigue s'avère être nécessaire pour cette hypothèse pour les enrobés de cette thèse.

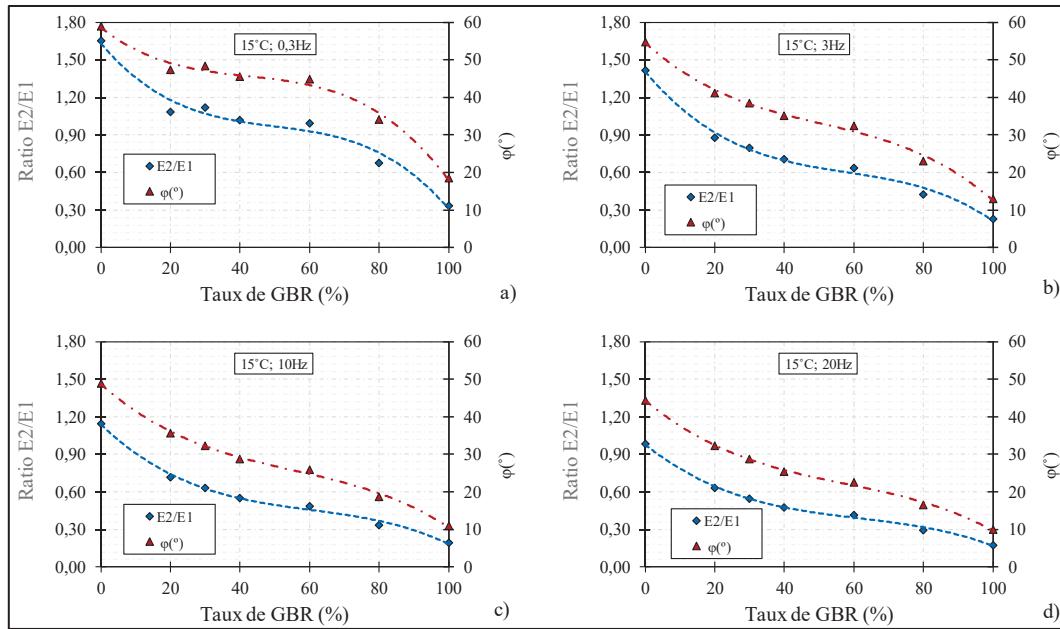


Figure 4.12 Évolution du ratio E2/E1 et angle de phase du module complexe en fonction du taux de GBR

a) $15^\circ - 0,3 \text{ Hz}$ b) $15^\circ - 3 \text{ Hz}$ c) $15^\circ - 10 \text{ Hz}$ d) $15^\circ - 20 \text{ Hz}$

■ Zone 3 : Analyse des composantes visqueuse et élastique

L'évolution des ratios E2/E1 et des angles de phase dans la zone 3 sont illustrés à la Figure 4.13. Dans la zone 3, le ratio E2/E1 est quasiment nul pour tous les enrobés, quelle que soit la fréquence. Cela indique que, dans ces conditions de très basses températures, l'enrobé bitumineux devient presque entièrement rigide, se comportant essentiellement comme un matériau élastique. Le comportement visqueux est donc négligeable comme en témoignent les très faibles valeurs d'angle de phase dans cette zone. Ce qui est cohérent avec les caractéristiques mécaniques attendues à ces températures extrêmes.

La composante visqueuse tend à disparaître avec l'augmentation de la fréquence, et l'ajout de GBR n'a pas d'effet significatif sur cette composante. Cette absence d'impact du GBR sur E2 dans cette zone suggère que, sous ces conditions, la nature visqueuse de l'enrobé est déjà extrêmement réduite, indépendamment de la présence de matériaux recyclés.

Bien que l'ajout de GBR n'exerce pas une influence notable sur E1, il est observé que la composante élastique augmente légèrement avec la fréquence. Ce comportement montre que

l'enrobé conserve une certaine élasticité qui est accentuée par des sollicitations fréquentes, même à des températures très basses.

Dans la zone 3, où les températures sont extrêmement basses, l'enrobé bitumineux se comporte principalement comme un matériau élastique rigide, avec un ratio E1/E2 pratiquement nul et des angles de phase dont les valeurs tendent vers 1° . L'ajout de GBR ne semble pas affecter de manière significative ni la composante visqueuse, qui tend à s'annuler, ni la composante élastique, qui reste relativement stable. Cependant, l'effet de la granulométrie devient plus apparent sur le module élastique, indiquant que la structure granulaire du mélange joue un rôle plus important que l'ajout de GBR dans le comportement mécanique à ces températures. En considérant la Figure 4.13, on s'attendrait à ce que les performances au retrait thermique soient similaires pour des enrobés incorporant jusqu'à 30% de GBR, car jusqu'à 30% d'ajout de GBR dans l'enrobé, le ratio E2/E1 est quasiment identique. Des essais de retrait thermique devraient permettre de confirmer cette hypothèse.

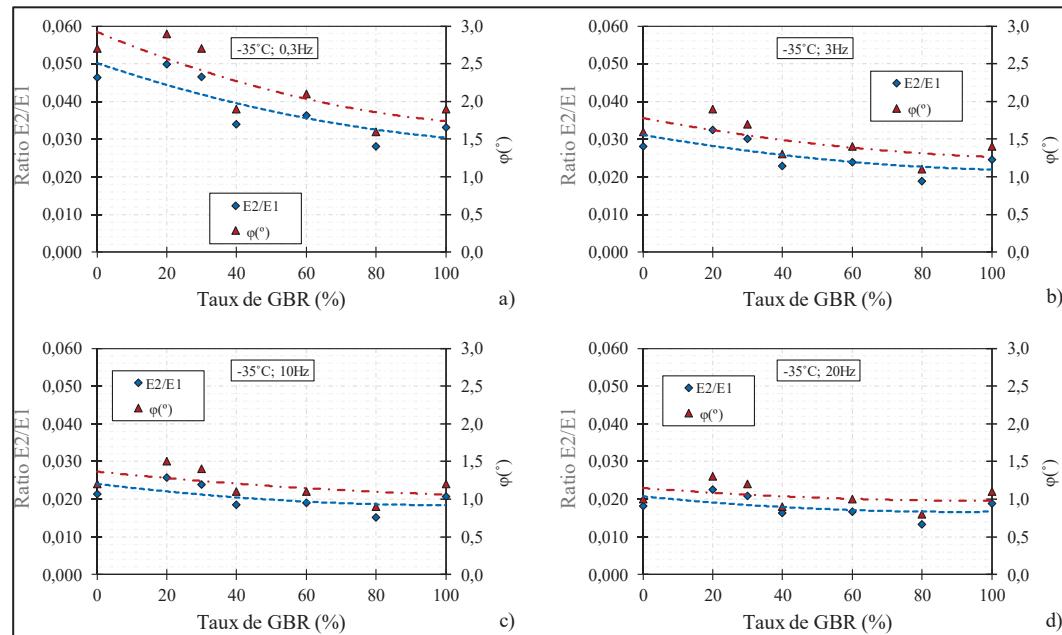


Figure 4.13 Évolution du ratio E2/E1 et angle de phase du module complexe en fonction du taux de GBR

a) $-35^\circ - 0,3 \text{ Hz}$ b) $-35^\circ - 3 \text{ Hz}$ c) $-35^\circ - 10 \text{ Hz}$ d) $-35^\circ - 20 \text{ Hz}$

4.3.1.4 Sommaire des résultats des essais de MC

En conclusion, les différentes formes de présentation des résultats des essais de module complexe (MC) et les paramètres 2S2P1D ont montré que l'ajout de GBR influence le comportement viscoélastique linéaire (VEL) des enrobés. Cependant, l'analyse de cette influence est limitée par la présence de vides et la granulométrie des échantillons, nécessitant une normalisation des résultats dans le plan Cole-Cole pour une analyse plus précise.

L'étude du plan Cole-Cole normalisé a permis d'identifier trois zones de comportement distinctes selon les températures. Les zones 1 et 3, correspondant aux très hautes et très basses températures, n'ont pas révélé d'impact significatif de l'ajout du GBR. En revanche, la zone 2, couvrant les températures moyennes, a montré des écarts intéressants. L'ajout du GBR dans l'enrobé ESG10 augmente la rigidité et modifie les propriétés viscoélastiques, notamment en augmentant la composante élastique du module complexe, créant ainsi un déséquilibre entre le comportement visqueux et élastique. Ce qui peut entraîner une diminution de la capacité de relaxation des contraintes de l'enrobé.

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la normalisation des résultats d'essais MC pour éliminer les effets des vides et de la granulométrie pour une évaluation précise de l'influence de l'ajout de GBR. L'analyse de la zone 2 est particulièrement pertinente, car les modules de rigidité utilisés dans le dimensionnement des chaussées se situent quelque part dans cette zone.

L'influence de l'ajout du GBR dans les enrobés ne se limite pas uniquement à leur comportement VEL, d'autres facteurs tels que les propriétés thermiques peuvent être influencées et doivent être prises en compte pour une meilleure compréhension des enrobés à fort taux de GBR.

4.3.2 Mesure des coefficients de dilatation-contraction thermique (DCT) des enrobés de l'étude

Le coefficient de dilatation/contraction thermique (DCT) a été mesuré avec une répétition de la mesure pour chaque enrobé de cette étude. Les résultats obtenus sont présentés, discutés et analysés dans cette section.

4.3.2.1 Résultats et discussions

Les résultats de mesure du coefficient de dilatation-contraction thermique (DCT) pour l'ensemble des mélanges sont présentés dans le Tableau 4.4. Deux essais ont été réalisés pour chaque mélange, et les résultats moyens des deux essais sont présentés à la Figure 4.14.

De manière globale, l'ajout de GBR dans le mélange ESG10 entraîne une augmentation du coefficient DCT dans chaque palier de température testé comme le révèle le Tableau 4-4. Cette observation indique que la sensibilité aux variations de température augmente avec l'ajout de GBR.

Pour les enrobés ESG10, le coefficient DCT évolue de façon convexe à travers les paliers de température. Cette évolution signifie que l'influence de la température sur la dilatation et la contraction thermique est plus prononcée dans certains intervalles de température.

Contrairement aux enrobés ESG10, l'enrobé R100 (composé à 100 % de GBR) présente une évolution concave du coefficient DCT à travers les paliers de température comme le montre la Figure 4.14. Ce comportement particulier pourrait être attribué à la granulométrie et/ou au bitume du GBR. L'un ou l'autre ou encore les deux paramètres modifient significativement la réponse de l'enrobé à la sollicitation thermique. Cependant, tel qu'il est mentionné dans la littérature, la granulométrie et la teneur en vides n'ont pas d'impact sur les valeurs de coefficient DCT. En revanche, la nature des granulats et la teneur en bitume influencent le coefficient DCT.

La nature minéralogique des granulats composant le GBR n'est pas connue et serait probablement différente de celle des granulats vierges utilisés dans les enrobés ESG10. La teneur en bitume du R100 est inférieure à celles des enrobés ESG10. Ainsi, l'évolution concave du coefficient DCT en fonction des paliers de température pourrait être liée à ces deux paramètres.

Tableau 4.3 Résultats des coefficients DCT des enrobés de l'étude

Enrobés	$\tau_{DL} (\mu def / ^\circ C)$			
	+21 à +5 ($^\circ C$)	+5 à -20 ($^\circ C$)	-20 à +5 ($^\circ C$)	+5 à +21 ($^\circ C$)
R0	0,3	17	14	6
	1,7	18	14	6
R20	8,3	20	15	7
	3,6	20	16	8
R30	11	21	18	7
	11	25	21	7
R40	11	22	21	10
	15	25	22	9
R60	14	23	23	11
	18	24	24	14
R80	19	24	23	22
	19	23	21	19
R100	22	21	20	24
	22	21	20	27

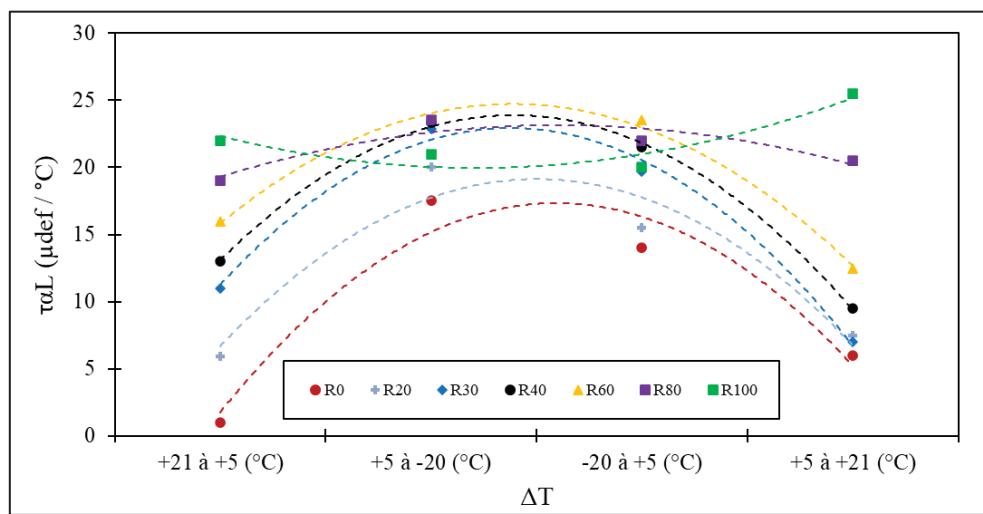


Figure 4.14 Évolution des coefficients DCT en fonction des paliers de température

Les résultats de mesure du coefficient DCT révèlent que l'ajout de GBR dans les enrobés ESG10 augmentent leur sensibilité thermique, avec une évolution convexe du coefficient DCT pour la plupart des mélanges. L'enrobé R100 présente un comportement atypique avec une évolution concave, soulignant l'importance d'étudier plus en détail les effets de l'ajout de GBR sur les propriétés thermiques des enrobés.

4.3.2.2 Analyse des résultats

L'analyse du coefficient DCT (Coefficient de Dilatation et Contraction Thermique) a été effectuée en fonction du ratio de bitume recyclé (RBR), car ce coefficient est directement influencé par la teneur en bitume dans l'enrobé. En considérant le RBR, l'étude se concentre spécifiquement sur les effets du bitume provenant des granulats bitumineux récupérés (GBR) sur le comportement thermique de l'enrobé.

Les Figures 4.16 et 4.17 montrent l'évolution du coefficient DCT avec l'évolution du RBR dans l'enrobé pour les différents paliers de température. Pour un palier de température donné, lorsque le sens d'évolution de la température est inversé, le coefficient mesuré change. Les écarts entre les valeurs du coefficient thermique en dilatation et en contraction pour un même mélange témoignent ainsi de l'anisotropie de l'enrobé (Di Benedetto & Corté, 2005).

Dans la plage de températures plus chaude, illustrée par la Figure 4.15, les essais montrent les tendances suivantes :

- Dilatation (de +5 à +21 °C) : On observe une augmentation quasi linéaire du coefficient DCT avec l'augmentation du RBR, les coefficients de dilatation moyens variant de 6 à 25,5 $\mu\text{def}/^\circ\text{C}$.
- Contraction (de +21 à +5 °C) : Les coefficients varient de manière linéaire également, de 1 à 22 $\mu\text{def}/^\circ\text{C}$.

Cette linéarité dans l'évolution du coefficient DCT est conforme aux attentes, car selon la littérature (Teguedi, 2017), le coefficient DCT est plus élevé pour un enrobé 100% GBR. Ainsi,

avec l'ajout de GBR, on s'attend à des coefficients DCT situés entre les deux extrêmes. Cette linéarité indique une relation proportionnelle entre la quantité de bitume recyclé et la sensibilité thermique de l'enrobé dans cette plage de températures.

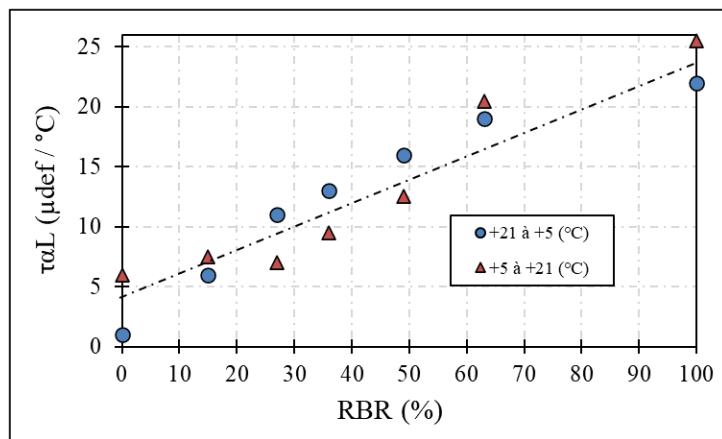


Figure 4.15 Évolution du coefficient DCT en fonction du RBR dans les paliers de température +21 à +5 °C et +5 à +21 °C

La Figure 4.16 présente les résultats pour les températures plus basses. Contrairement aux températures modérées, l'évolution du coefficient DCT avec l'augmentation du RBR suit une tendance convexe :

- Dilatation (de -20 à +5 °C) : Les valeurs moyennes du coefficient DCT varient entre 14 à 23,5 $\mu\text{def}/^\circ\text{C}$.
- Contraction (de +5 à -20 °C) : Les valeurs moyennes sont comprises entre 17,5 à 23,5 $\mu\text{def}/^\circ\text{C}$

Cette tendance convexe, inattendue, indique des phases distinctes dans l'évolution du coefficient DCT :

- De 0 à 36% de RBR : Augmentation linéaire du coefficient DCT.
- De 36 à 63% de RBR : Stabilisation du coefficient DCT.
- De 63 à 100% de RBR : Légère diminution du coefficient DCT.

L'évolution convexe à basse température suggère que, au-delà d'un certain point, l'ajout de bitume recyclé n'augmente plus la sensibilité thermique de l'enrobé, voire la réduit légèrement.

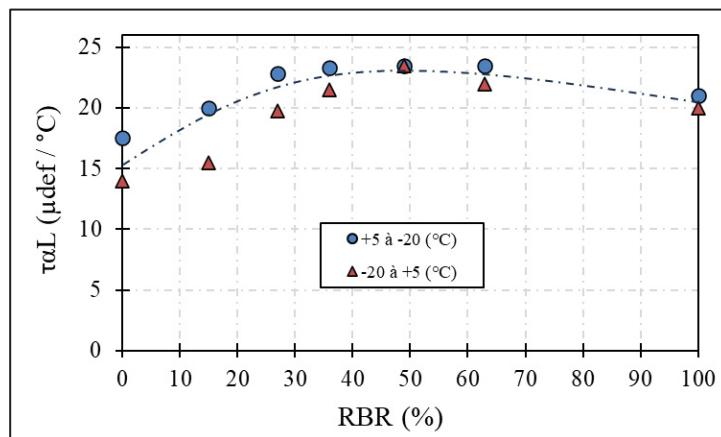


Figure 4.16 Évolution du coefficient DCT en fonction du RBR dans les paliers de température +5 à -20 °C et -20 à +5 °C

L'influence de l'ajout de GBR sur le coefficient DCT est plus prononcée à des températures plus chaudes. Les écarts observés entre les coefficients de dilatation et de contraction pour des RBR différents indiquent une anisotropie thermique de l'enrobé. Plus précisément :

- À des températures chaudes (+21 à +5 °C) : Les écarts entre 0 et 63% de RBR sont de 19,5 $\mu\text{def}/^\circ\text{C}$ en dilatation et de 21,0 $\mu\text{def}/^\circ\text{C}$ en contraction.
- À des températures froides (+5 à -20 °C) : Les écarts sont plus faibles, soit 9,5 $\mu\text{def}/^\circ\text{C}$ en dilatation et 6,0 $\mu\text{def}/^\circ\text{C}$ en contraction.

Ces écarts plus importants à des températures plus chaudes montrent que l'enrobé bitumineux est plus susceptible d'accumuler des contraintes thermiques à des températures moins froides. En effet, contrairement aux attentes, l'enrobé ne relaxe pas efficacement les contraintes induites, ce qui augmente son potentiel de déformation thermique.

L'ajout de GBR augmente le potentiel de déformation thermique de l'enrobé bitumineux, en particulier à des températures plus chaudes. Cette augmentation signifie également que les

enrobés avec un fort taux de GBR sont plus susceptibles de développer des contraintes thermiques importantes lors de l'essai de retrait thermique empêché (TSRST). En conséquence, ces enrobés pourraient être plus vulnérables aux fissurations induites par les variations thermiques par rapport aux enrobés sans GBR.

4.3.3 Essais TSRST

La performance au retrait thermique empêché a été mesurée à l'aide de l'essai TSRST dans cette étude avec une répétition d'essai pour chaque enrobé. Les résultats obtenus sont présentés, discutés et analysés dans cette section.

4.3.3.1 Résultats et discussions

À la suite des essais DCT, des essais TSRST ont été réalisés pour l'ensemble des mélanges. Deux éprouvettes ont été testées par mélange. Les résultats de ces essais TSRST, montrant l'évolution des contraintes en fonction de la température, sont présentés à la Figure 4.17. Les températures de rupture et de transition vitreuse bissectrice (Tg) obtenues à l'aide de l'analyse illustrée à la Figure 3.6 au chapitre 3, sont synthétisées au Tableau 5.5. Les teneurs en vides des éprouvettes d'essai sont aussi fournies dans ce tableau. Les vides et la granulométrie des enrobés n'affectent pas les températures de rupture et Tg, mais ils influencent le niveau de contrainte.

Au niveau des températures de rupture obtenues, elles augmentent avec l'ajout du GBR dans l'enrobé. La température de performance basse Tb inscrit sur le certificat de conformité du bitume d'apport est de -34,5 °C. Les données du Tableau 5-5 montrent que jusqu'à 30% de GBR, on se retrouve très proche de cette température avec un écart moyen de 0,56 °C, ce qui représente une très faible perte sur la température Tb pour le R30. Les pertes de température de rupture au niveau des autres ESG10 sont 3,09 °C, 4,85 °C et 7,6 °C pour respectivement le R40, R60 et R80.

Pour l'évolution des contraintes thermiques induites, la Figure 4.17 montre un déplacement de la courbe d'évolution des contraintes en fonction de la température de la droite vers la gauche au fur et à mesure que la quantité de GBR augmente dans l'enrobé ESG10. Ce mouvement signifie que l'ajout du GBR entraîne une perte de la capacité de relaxation des contraintes de l'enrobé ESG10, entraînant ainsi une augmentation des contraintes thermiques induites. Cette observation confirme l'hypothèse formulée à partir de l'analyse des résultats des essais de mesure du coefficient DCT, selon lesquels les enrobés à fort taux de GBR pourraient développer des contraintes thermiques élevées. Cette perte de capacité de relaxation conduit à une rupture prématuée de l'éprouvette d'essai et donc à une augmentation de la température de rupture.

Les essais TSRST montrent que l'ajout de GBR dans l'enrobé ESG10 affecte la performance de l'enrobé à basse température. Jusqu'à 30 % de GBR, l'impact sur la température de rupture est minimal, mais au-delà de ce taux, les pertes deviennent significatives. La diminution de la capacité de relaxation des contraintes avec l'augmentation de la quantité de GBR est un facteur clé expliquant l'augmentation des températures de rupture.

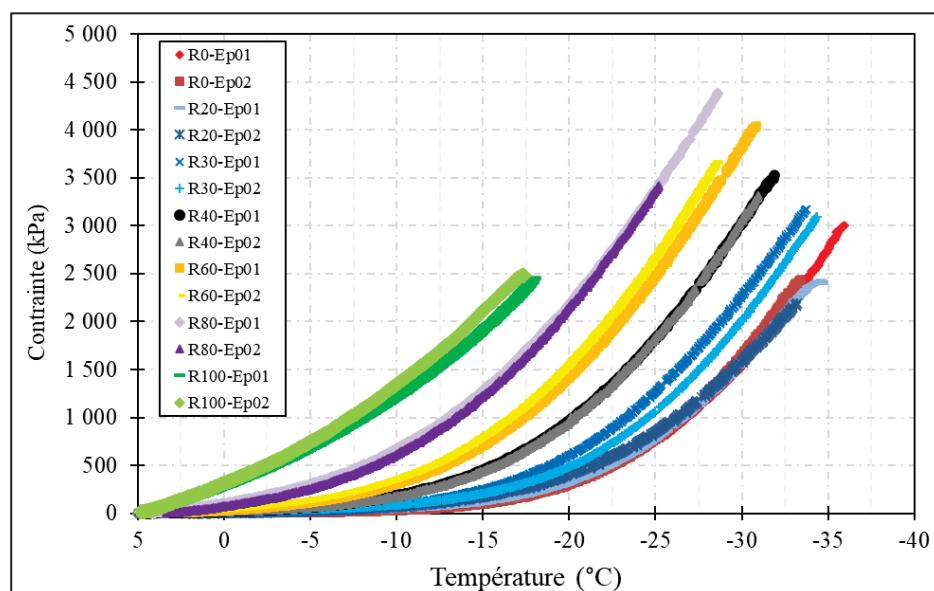


Figure 4.17 Évolution des contraintes induites en fonction de la température des essais TSRST des enrobés de l'étude

Tableau 4.4 Résultats des contraintes de rupture, températures de rupture et Tg des enrobés de l'étude

Enr.	# Épr.	Contr. Rup. (MPa)	Contr. moy. Rup. (MPa)	Temp. Rup. (°C)	Temp. Rup. moy. (°C)	Temp. Tg (°C)	Temp. Tg moy. (°C)	RBR (%)	Vi (%)
R0	Ep01	3,00		-35,62		-24,10			6,1
	Ep02	2,44	2,72	-33,20	-34,41	-22,90	-23,50	0	6,1
R20	Ep01	2,43		-34,56		-22,50			8,4
	Ep02	2,15	2,29	-33,19	-33,94	-22,50	-22,50	16	7,3
R30	Ep01	3,18		-33,55		-21,00			6,6
	Ep02	3,10	3,14	-34,32	-33,94	-22,40	-21,70	27	6,1
R40	Ep01	3,53		-31,91		-18,50			5,1
	Ep02	3,32	3,43	-30,90	-31,41	-18,30	-18,40	36	5,7
R60	Ep01	4,05		-30,90		-17,50			4,0
	Ep02	3,66	3,86	-28,40	-29,65	-16,30	-16,90	49	4,2
R80	Ep01	4,40		-28,60		-15,50			2,4
	Ep02	3,42	3,91	-25,20	-26,90	-13,80	-14,65	63	2,6
R100	Ep01	2,46		-17,88		-8,50			6,9
	Ep02	2,48	2,47	-17,40	-17,64	-8,00	-8,25	100	6,8

4.3.3.2 Analyse des résultats

L'analyse des résultats des essais TSRST effectués dans cette section est concentrée uniquement sur les températures de rupture et de transition vitreuse (Tg), permettant d'annuler les effets de la granulométrie et des vides sur les résultats. Ainsi, le taux de GBR est remplacé par le RBR dans l'analyse de ces résultats.

Les résultats des essais TSRST ont ainsi permis d'établir l'évolution des températures de rupture et Tg en fonction du RBR, comme montré à la Figure 4.18. La limite de -28 °C montrée à la Figure 4.18 représente l'exigence du MTMD pour la zone climatique 1 et la limite de -34 °C est la température basse de performance du bitume d'apport. Les principales observations de cette figure sont :

- Au niveau températures de rupture :

La relation entre la température de rupture et le RBR est linéaire avec un changement de pente lorsque le RBR dépasse 27 %. Ce changement de pente indique que l'ajout de GBR commence à influencer significativement la température de rupture de l'enrobé ESG10 au-delà de ce seuil.

- Température de Transition Vitreuse (Tg) :

La relation entre la température Tg et le RBR est également linéaire. L'influence de l'ajout de GBR sur la température Tg commence dès un RBR de 16 %, mais cette influence reste peu significative jusqu'à 27 % de RBR tel que le montre la Figure 4.18.

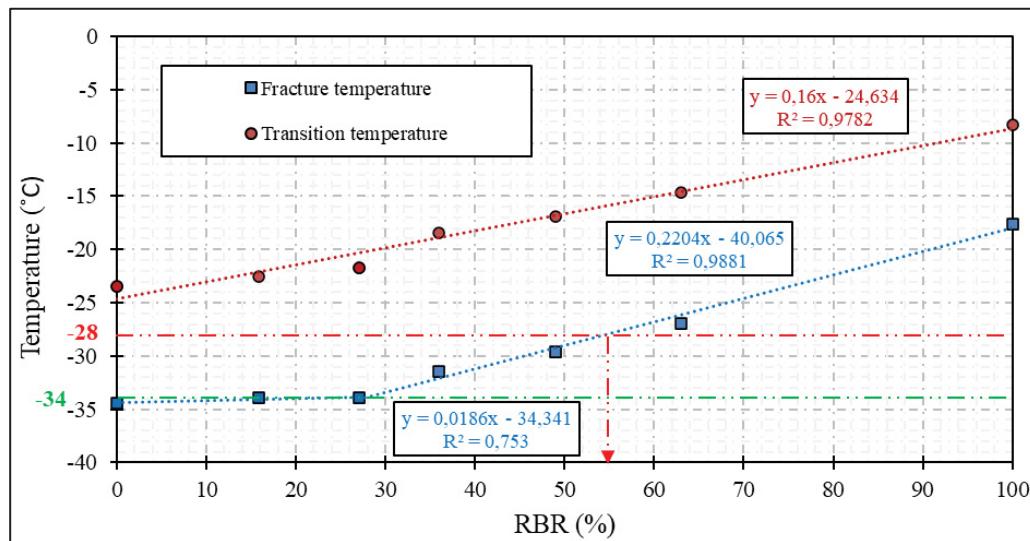


Figure 4.18 Évolution des températures de rupture et Tg en fonction du RBR

En considérant les enrobés ESG10 (R0 à R80) pour vérifier l'hypothèse de l'existence d'une relation entre le ratio E2/E1 établi à l'aide des résultats de MC et les performances au retrait thermique, les Figure 4.19 et Figure 4.20 ont été obtenues. La Figure 4.19 illustre l'évolution de la température de rupture moyenne au TSRST ainsi que le ratio E2/E1 à -35 °C et 0,03 Hz en fonction du taux de GBR. Le choix de la température -35 °C pour cette relation est lié au fait que la température basse critique du bitume d'apport soit proche de cette valeur. Une diminution de ce ratio entraîne une augmentation de la température de rupture au TSRST pour les enrobés considérés.

La Figure 4.20 montre la relation entre la température de rupture TSRST et le ratio E2/E1 des essais MC. On obtient une tendance linéaire avec un indice de qualité R^2 de 0,869. Cet indice pourrait peut-être améliorer en déterminant le ratio E2/E1 avec la température basse critique exacte du bitume d'apport. Néanmoins, cette tendance confirme en partie l'hypothèse émise sur l'existence d'une relation entre le ratio E2/E1 et la performance des enrobés recyclés. Toutefois, d'autres essais impliquant d'autres types de bitume seront nécessaires pour la validation de cette relation. Si la relation venait à être confirmée pour plusieurs autres bitumes, on pourrait, connaissant le rapport E2/E1 et le bitume d'apport d'un enrobé recyclé prédire sa température de rupture à l'essai TSRST.

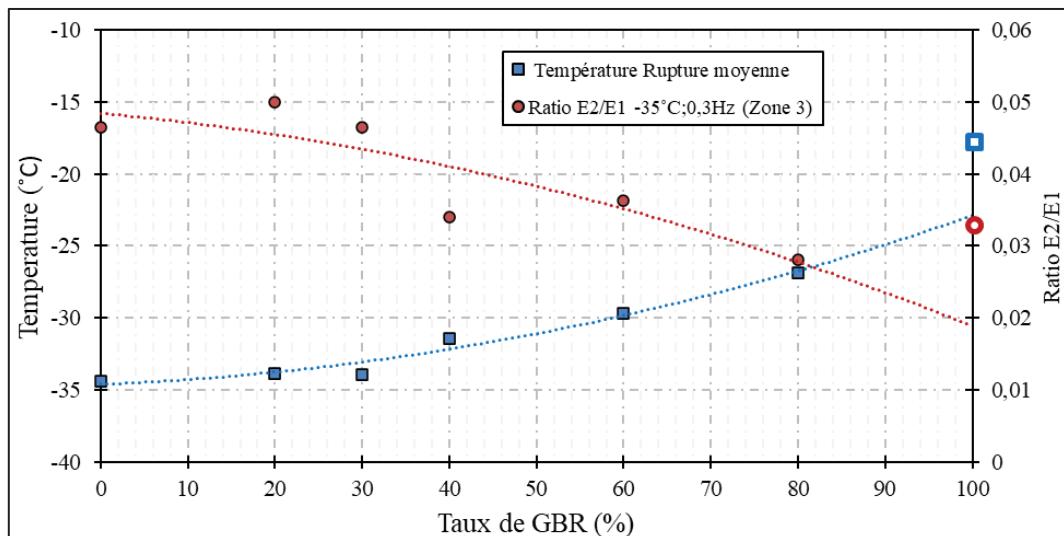


Figure 4.19 Évolution de la température de rupture au TSRST et du ratio E2/E1 en fonction du taux de GBR

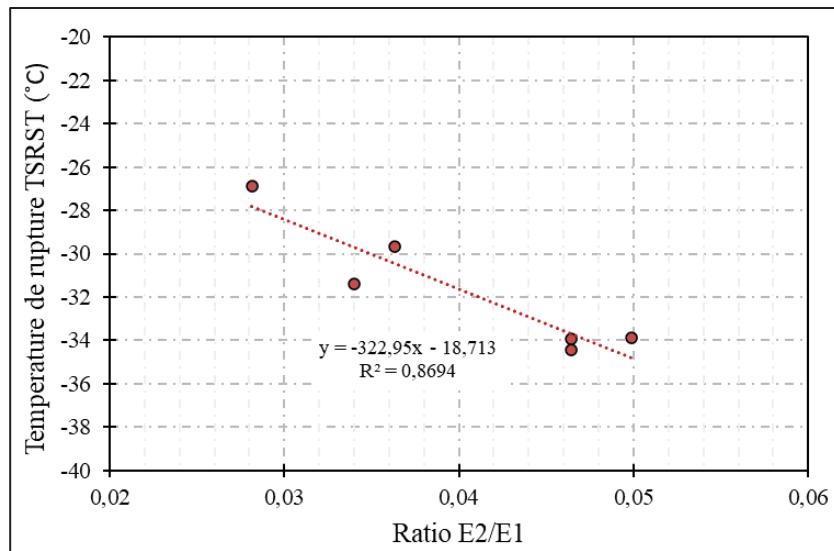


Figure 4.20 Relation entre la température de rupture au TSRST et le ratio E2/E1 à -35 °C – 0,3 Hz (zone 3)

4.3.3.3 Perte de performance au retrait thermique

L’analyse des températures de rupture obtenues lors de l’essai de retrait thermique (TSRST) en fonction de l’ajout de GBR révèle des impacts significatifs sur la performance des enrobés à basse température. Le calcul de la perte de température de rupture a été effectué en utilisant la température de performance basse du bitume d’apport (PG 52S-34), qui est de -34,9 °C. La relation utilisée est la suivante :

$$\text{Perte temp. Rupt. (°C)} = \text{Tb}_{\text{TSRST}} - \text{Tb}_{\text{PG 52S-34}} \quad (4.3)$$

Où

Tb_{TSRST} est la température moyenne de rupture à l’essai TSRST et $\text{Tb}_{\text{PG 52S-34}}$ est la température basse de performance de l’attestation de conformité du bitume d’apport.

L’évolution de la perte de température de rupture, illustrée à la Figure 4.21, montre que l’effet de l’ajout de GBR devient plus significatif à des taux élevés de GBR.

- Jusqu'à 30% de GBR, la perte de température de rupture est de 1 °C. L'ajout de GBR jusqu'à ce taux n'a pas d'impact significatif sur la température de rupture à basse température.
- À 40% de GBR, la perte est de 3,5 °C. La perte devient notable, mais reste en dessous du seuil nécessitant un changement de grade de performance du bitume (± 6 °C). En effet, le changement de grade de performance haute ou basse se fait avec un écart de ± 6 °C. Cela signifie que même avec 40% de GBR, le bitume d'apport PG 52S-34 reste adapté pour les performances souhaitées dans une zone climatique où l'exigence est un PG Xn-28.
- À 60% d'ajout de GBR, on a une perte de 5,3 °C. Cette perte est proche du seuil de ± 6 °C, indiquant qu'à ce taux de GBR, il pourrait être nécessaire de changer le grade de performance basse du bitume. La performance à basse température de l'enrobé correspondrait à celle d'un enrobé sans GBR avec un bitume de type PG Xn-28.
- À 80% d'ajout de GBR, la perte est de 8 °C. À ce niveau, l'ajout de GBR a un impact significatif sur la température de rupture. L'enrobé se comporterait comme un enrobé sans GBR utilisant un bitume de PG Xn-22, nécessitant un ajustement du grade de bitume pour maintenir la performance.

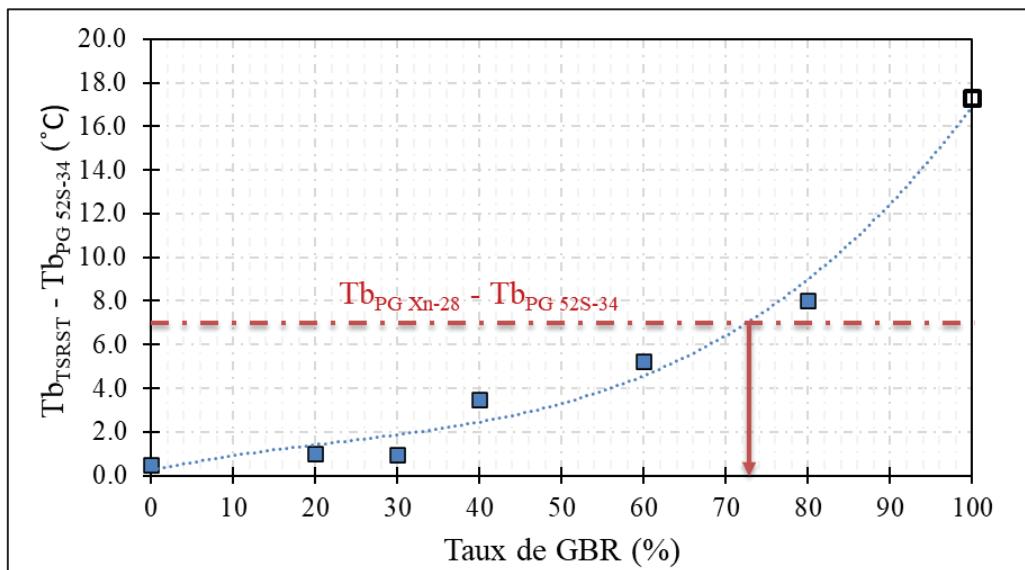


Figure 4.21 Évolution de la perte de température de rupture à basse température en fonction du taux de GBR

4.3.3.4 Implications au niveau des exigences du MTMD

Les résultats du TSRST montrent que l'ajout de GBR, jusqu'à un certain seuil, peut être toléré sans ajustement de la performance basse du bitume d'apport. En fonction de ces résultats, les enrobés contenant jusqu'à 55% de RBR (60% de GBR) peuvent être utilisés avec le bitume PG 52S-34 tout en atteignant les performances souhaitées au retrait thermique par le MTMD pour la zone climatique 1 du Québec, où la température de rupture maximale exigée est de -28 °C, comme l'illustre la Figure 4.18.

Une observation importante est que certains enrobés contenant du GBR ne respectent pas les exigences en termes de Vbe. Cela remet en question l'utilisation du Vbe comme critère absolu de performance pour les enrobés à fort taux de GBR. Dans ce contexte, il serait pertinent de réviser ce critère et d'envisager des approches basées sur des critères de performance démontrés, tels que la résistance à la fissuration thermique ou la température de rupture au TSRST.

L'ajout de GBR dans les enrobés impacte la température de rupture, en particulier à partir de 40% de GBR, avec des conséquences plus marquées au-delà de 60%. Ces résultats soulignent la nécessité d'ajuster le grade de performance basse du bitume d'apport pour maintenir la performance à basse température lorsque des taux élevés de GBR sont utilisés. En parallèle, l'adoption de critères de performance adaptés, au lieu de s'appuyer uniquement sur le Vbe, pourrait améliorer la gestion des enrobés à fort taux de GBR dans les conditions climatiques québécoises.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les enrobés R0, R20, R30, R40, R60, R80 et R100 ont été utilisés pour évaluer l'impact de l'ajout de GBR sur le comportement VEL, les propriétés thermiques et le comportement au retrait thermique empêché. Les essais de module complexe, de mesure des coefficients DCT et de TSRST ont été réalisés pour l'atteinte de cet objectif. Les principales conclusions de ce chapitre sont :

- L'ajout de GBR influence le comportement VEL en entraînant une augmentation du module complexe en créant un déséquilibre marqué entre la composante élastique et visqueuse aux températures hautes et modérées. Dans les très basses températures, l'effet de l'ajout n'est pas démontré, mais la granulométrie exerce une influence conséquente sur la rigidité de l'enrobé bitumineux.
- L'ajout de GBR entraîne une augmentation de la capacité de déformation thermique, présageant que les contraintes thermiques induites devraient être plus importantes dans l'enrobé bitumineux recyclé et confirmé à l'essai TSRST par une augmentation des contraintes avec l'ajout de GBR.
- L'ajout de GBR n'exerce pas d'influence significative sur le comportement et la température de rupture au retrait thermique empêché juste qu'à un seuil de 30%. Au-delà, il entraîne une diminution de la capacité de relaxation et une augmentation linéaire de la température de rupture.
- L'hypothèse émise sur l'existence d'une corrélation entre le ratio E2/E1 et les performances des enrobés recyclés est confirmée en partie pour le retrait thermique. Mais plus de recherche sera nécessaire pour soutenir cette hypothèse.

Cette étude ouvre la voie à une utilisation plus flexible des enrobés à fort taux de GBR dans les zones à climat sévère comme le Québec. Toutefois, d'autres études du comportement et des performances à basse température sont nécessaires pour les enrobés à fort taux de GBR à cause de l'augmentation des contraintes induites observée au TSRST. Cette augmentation de contraintes induites pourrait avoir un impact sur la réserve de résistance en traction de l'enrobé ESG10. La réserve de résistance en traction représente la capacité de l'enrobé à supporter le trafic dans les basses températures sans rompre. Cette réserve de résistance en traction doit être évaluée pour l'ensemble des enrobés afin de déterminer comment l'ajout du GBR agit sur elle.

CHAPITRE 5

INFLUENCE DE L'AJOUT DE GBR SUR LA RÉSERVE DE RÉSISTANCE EN TRACTION DE LA COUCHE DE SURFACE D'UNE CHAUSSÉE

5.1 Introduction

La maîtrise du comportement et des performances des enrobés bitumineux à basse température est essentielle pour favoriser l'utilisation d'une quantité significative de granulats bitumineux récupérés (GBR) dans les nouveaux enrobés. Cela devrait également garantir des chaussées à la fois performantes et durables. Les enrobés formulés par la méthode du MTMD du Québec sont conçus selon des critères volumétriques avec une exigence de performance en matière d'orniérage. Cependant, ils ne reposent pas sur des performances démontrées, et pour ce qui est de la performance à basse température, le MTMD s'appuie entièrement sur sa méthode de sélection du type de bitume, qui est fondée sur la définition des zones climatiques.

Actuellement, on observe une évolution significative des matériaux utilisés dans les chaussées, y compris dans la classification des bitumes routiers. Parallèlement, le climat évolue également. Les changements climatiques s'accélèrent, et bien que l'on constate principalement un réchauffement de la planète et des catastrophes naturelles, des événements de froid extrême se produisent également. Dans les chaussées, la fissuration transversale (fissuration thermique) constitue le principal mode de dégradation dans les climats nordique (Al-Qadi et al., 2005; Zhang, 2015), et il arrive parfois qu'elle se manifeste sans que la température basse de performance du bitume ait été atteinte sur site (Yee et al., 2006). Il est donc essentiel de saisir les causes de ce phénomène, d'autant plus que les recherches menées dans le cadre de cette thèse révèlent que l'ajout de GBR, dans les proportions importantes, a un impact sur le comportement VEL, les propriétés thermiques et le retrait thermique empêché.

L'objectif de cette étude est de déterminer la réserve de résistance en traction des enrobés analysés et d'évaluer l'impact de l'ajout de GBR sur la capacité de la couche de surface des chaussées à supporter le trafic à basse température. La performance des enrobés en hiver

dépend principalement du bitume présent dans le mélange. Dans une optique de normalisation des taux élevés de GBR, la méthode de sélection du bitume d'apport, telle que définie par le MTMD, pourrait présenter certaines limites. Par conséquent, les exigences de formulation doivent évoluer pour se concentrer davantage sur les performances. Si l'on souhaite utiliser une quantité importante de GBR, il sera nécessaire de mieux connaître les paramètres responsables de la fissuration transversale des chaussées et d'optimiser la sélection du type de bitume d'apport lors de la formulation. Ainsi, il est également essentiel de mieux comprendre et évaluer, à l'aide d'outils appropriés, le comportement des enrobés à basse température.

5.2 Concept de la réserve de résistance et du reste de réserve de résistance en traction

La réserve de résistance en traction (RRT) des enrobés est un concept qui découle des travaux de Olard (2003), servant à évaluer la capacité des matériaux bitumineux à résister aux sollicitations du trafic sans se rompre à basse température. Elle représente un outil de performance à basse température et sa détermination s'appuie sur les résultats des essais TSRST et de traction directe (TD). La RRT est calculée à une température donnée en soustrayant la contrainte thermique induite, obtenue lors de l'essai TSRST, de la résistance en traction mesurée à cette température à l'aide de l'essai TD.

En effectuant l'essai TD à différentes températures basses, on peut établir une enveloppe de résistance en traction pour le matériau qui représente sa capacité limite à supporter les sollicitations thermiques et mécaniques à basse température. La Figure 5.1 montre un exemple d'établissement de l'enveloppe de résistance en traction. À l'aide de cette enveloppe et du résultat au TSRST, on peut suivre l'évolution de la RRT en fonction de la température, ce qui permet à identifier la température critique basse du matériau de la chaussée.

Le reste de la réserve de résistance en traction (R_{RRT}) est une notion introduite dans cette étude pour évaluer la capacité résiduelle du matériau à résister aux contraintes de traction après avoir pris en compte les sollicitations thermiques et mécaniques. Pour déterminer le R_{RRT} à une température spécifique, il est nécessaire de connaître la résistance en traction, la contrainte

thermique induite et la contrainte de traction due au trafic. Ainsi, le R_{RRRT} est égal à la résistance en traction du matériau moins les sollicitations. La Figure 5.1 illustre le principe de détermination de ces deux concepts.

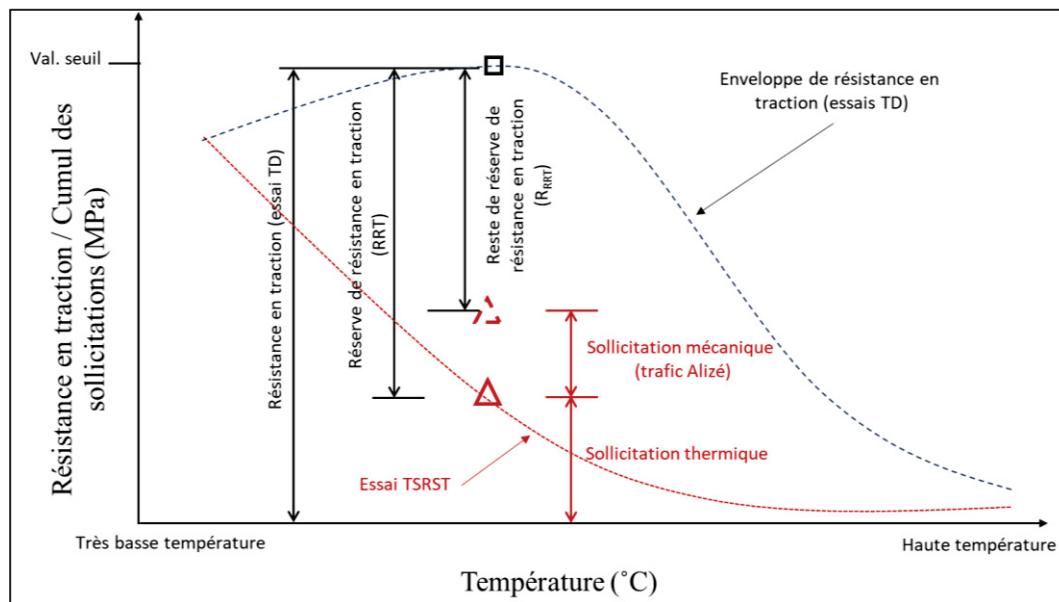


Figure 5.1 Schéma illustrant le concept de la réserve de résistance en traction (RRT) et du reste de réserve de résistance en traction (RRRT)

5.3 Programme expérimental

Le programme expérimental présenté dans ce chapitre a été conçu pour répondre à deux principales préoccupations. La première consiste à évaluer l'influence de l'ajout du GBR ainsi que celle du trafic sur la réserve de résistance en traction d'un enrobé ESG10. La seconde vise à identifier l'implication de ces deux paramètres dans l'apparition précoce de fissures à basse température.

Les mélanges utilisés et les essais réalisés dans l'étude présentée dans ce chapitre sont montrés à la Figure 5.2. Cette figure présente la démarche expérimentale qui a permis l'atteinte de l'objectif de cette étude.

La vitesse de sollicitation utilisée à l'essai TD est identique pour tous les enrobés de l'étude, fixée à 220×10^{-6} m/m/h. Les températures cibles du programme expérimental sont de -35, -27, -20, -5, 5 et 20 °C.

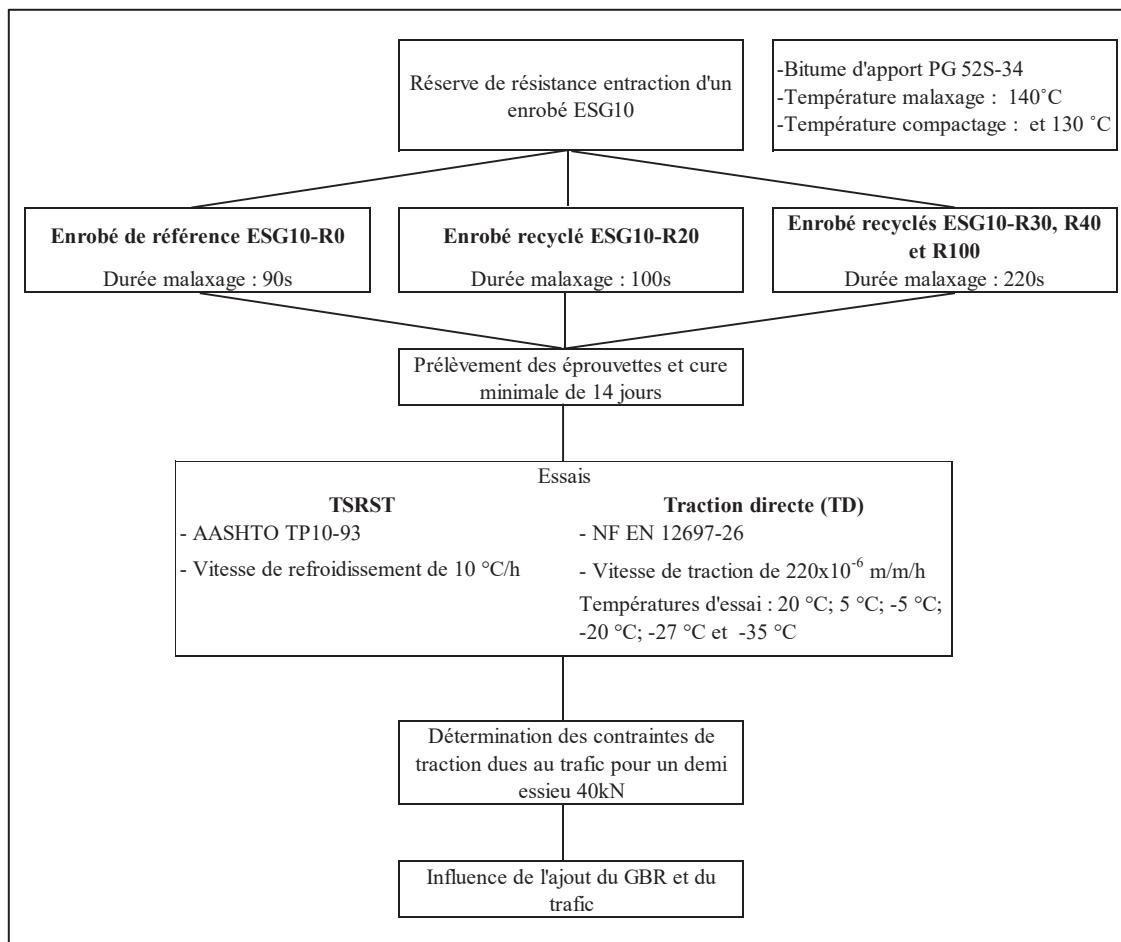


Figure 5.2 Démarche expérimentale pour évaluer l'influence du GBR et du trafic sur la réserve de résistance en traction

Les caractéristiques liées au bitume du GBR, le pourcentage de bitume total dans les mélanges, le volume de bitume effectif (V_{be}) des mélanges et le ratio de bitume recyclé (RBR) des enrobés sont donnés au Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Caractéristiques des matériaux et des mélanges de l'étude

Enrobé	R0	R20	R30	R40
Taux de GBR (%)	0	20	30	40
Classe granulaire GBR	-	0-10 mm	0-10 mm	0-10 mm
% bitume du GBR	-	5,06	5,06	5,06
% mobilisable	-	100	100	100
% bitume de GBR dans mélange	-	1,01	1,52	2,02
Propriétés bitume d'ajout PG 52S - 34				
Masse volumique 25°C	1,021	1,021	1,021	1,021
% bitume ajout	5,23	4,37	4,1	3,6
Total %bitume dans le mélange	5,23	5,17	5,62	5,62
Vbe (%)	12,2	12,2	12,6	12,3
Ratio de bitume recyclé (RBR) ⁽¹⁾ (%)	0	16	27	36
⁽¹⁾ RBR = % bitume du GBR dans le mélange / total % bitume dans le mélange				

Les courbes granulométriques des enrobés de l'étude ainsi que les limites du fuseau granulométrique du ESG10 du MTMD sont illustrées à la Figure 5.3.

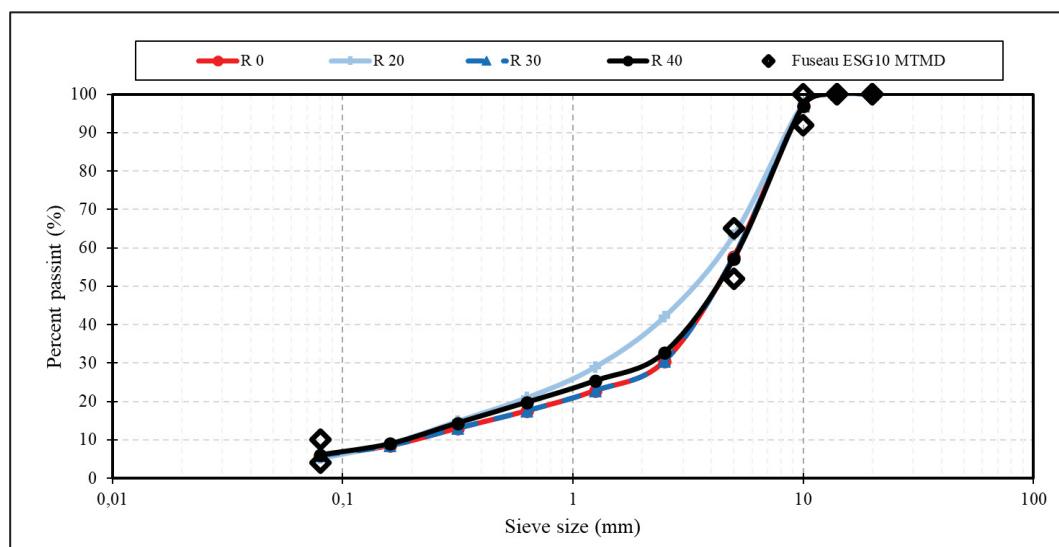


Figure 5.3 Courbes granulométriques des enrobés ESG10 et 100% GBR des enrobés de l'étude et fuseau du ESG10 du MTMD

Les enrobés produits avec ses matériaux ont été utilisés pour simuler le comportement d'une chaussée sous différentes conditions de température à l'aide de l'outil Alizé.

5.4 Déformations et contraintes tangentielles dues au trafic

L'impact du trafic sur la chaussée provoque des déformations et des contraintes au sein des différentes couches qui la composent. L'outil Alizé LCPC permet de simuler le comportement d'une chaussée sous l'effet des charges de trafic. Il s'agit d'un logiciel de dimensionnement des structures de chaussée qui repose sur la méthode rationnelle du LCPC-Sectra (Lcpc-setra, 1994). Cet outil a été utilisé dans ce projet pour simuler le comportement d'une chaussée bitumineuse, dont la couche de surface est constituée d'un enrobé incorporant différents taux de GBR, sous différentes conditions de basse température. Dans la modélisation, on a fait l'hypothèse d'un chargement correspondant à un demi-essieu standard canadien, représentant un poids de 40 kN pour le jumelage. La configuration d'un essieu canadien est illustrée à la Figure 5.4 (Meunier, 2012). La pression verticale appliquée est de 0,59 MPa, le rayon de contact est de 0,104 m et l'entraxe du jumelage est de 0,343 m.

Cinq variantes d'évolution de la rigidité des couches bitumineuses de la structure de chaussée, en fonction de la température, ont été modélisées pour simuler les conditions hivernales. La configuration structurale de la chaussée avec l'enrobé R30 en couche de roulement ainsi que les cas de température étudiés sont présentés au Tableau 5.2. Ce tableau pour les enrobés R0, R20 et R40 sont fournis en annexe VII. Les modules de rigidité de la couche de surface de la chaussée ont été déterminés à l'aide des résultats des essais de module complexe des enrobés de cette thèse aux températures des cas de configuration et à la fréquence de 0,01 Hz. Pour l'enrobé en couche de basse, les rigidités proviennent de données existantes au LCMB.

Tableau 5.2 Configuration de la structure de chaussée et variantes de modélisation Alizé avec une couche de roulement en enrobé R30

Configuration	Cas 1 : 5 °C	Cas 2 : -5 °C	Cas 3 : -20 °C	Cas 4 : -27 °C	Cas 5 : -35 °C	
ESG10	h=0,05 m E=2 000 MPa Collé nu=0,35	h=0,05 m E=5 000 MPa nu=0,35	h=0,05 m E=16 700 MPa nu=0,35	h=0,05 m E=25 000 MPa nu=0,35	h=0,05 m E=29 000 MPa nu=0,35	0,00 m
	h=0,10 m	h=0,10 m	h=0,10 m	h=0,10 m	h=0,10 m	0,05 m
	E=3 000 MPa 1/2 Collé nu=0,35	E=6 000 MPa nu=0,35	E=18 000 MPa nu=0,35	E=28 000 MPa nu=0,35	E=32 000 MPa nu=0,35	0,15 m
Fondation			h=0,05 m E=500 MPa nu=0,35			0,15 m
	1/2 Collé					0,65 m
Sous fondation			h=0,50 m E=250 MPa nu=0,35			0,65 m
	1/2 Collé					1,15 m
Sol infra.			h infini E=100 MPa nu=0,35			1,15 m

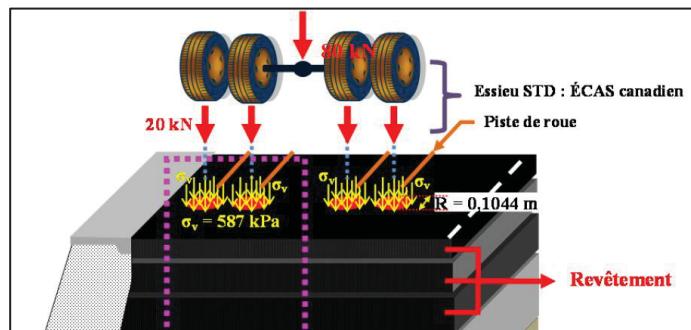


Figure 5.4 Configuration d'un essieu standard canadien (Meunier, 2012)

La simulation donne des résultats de contraintes et déformations directement sous les roues et entre les deux roues du jumelage pour l'ensemble des couches de la chaussée. Les déformations horizontales à la basse de la couche de surface dans les différentes chaussées en fonction de la température sont illustrées à Figure 5.5. Cette figure nous montre que l'ajout de GBR dans la couche de surface pour les températures supérieures à -20 °C entraîne une diminution des déformations à la basse de la couche de roulement. Ce qui signifie que l'ajout de GBR améliore les performances mécaniques de cette couche pour ces températures. Pour le même niveau de chargement (trafic) à 5 °C, les déformations obtenues sont :

- R0 : 792µm/m;
- R20 : 145µm/m;

- R30 : 120 $\mu\text{m}/\text{m}$;
- R40 : 102 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Les déformations à la basse de la couche de surface dans les chaussées aux températures inférieures à -20 °C sont identiques pour les quatre enrobés de l'étude. Ainsi, selon les simulations réalisées dans cette étude, l'ajout de GBR dans la couche de surface entraîne un gain de capacité structurale aux températures supérieures à -20 °C dans la chaussée.

Sur la base des déformations à la base de la couche de surface obtenues à l'aide de cette simulation, on peut émettre l'hypothèse que si on réalisait un essai de fatigue à 5 °C-10 Hz et avec un même niveau de sollicitation pour l'ensemble des enrobés, l'ajout de GBR contribuerait à une amélioration de la résistance en fatigue de cet enrobé. Les essais de fatigue doivent être réalisés en complément des travaux de cette thèse.

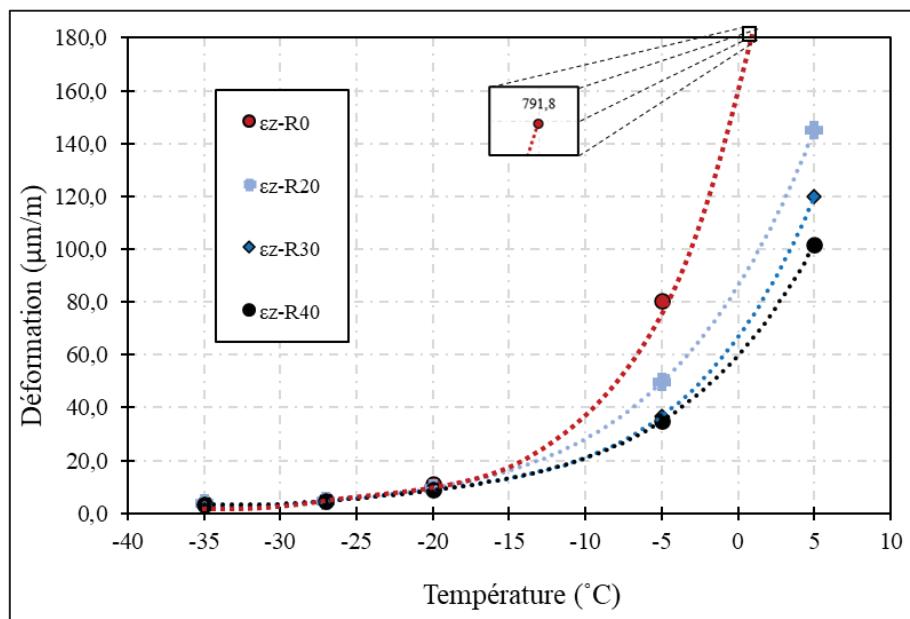


Figure 5.5 Déformations horizontales déterminées avec Alizé à la basse de la couche de surface pour les enrobés de l'étude

La simulation de l'impact des charges de trafic sur les chaussées est généralement réalisée pour évaluer les déformations au niveau des différentes couches de la chaussée. Pour cette étude,

l'intérêt majeur de ces simulations est de déterminer les contraintes de traction ou tangentialles engendrées par le trafic afin qu'elles soient combinées, dans les mêmes conditions de température, aux contraintes thermiques induites résultantes du retrait thermique empêché. Cette combinaison servira à évaluer la capacité résiduelle de résistance de cette couche de la chaussée face aux sollicitations. Les contraintes de traction (tangentialles), calculées avec le logiciel Alizé, sont mesurées au niveau de la couche de roulement, entre les deux roues du jumelage. Le trafic génère, à cet emplacement, des contraintes de traction à la fois à la surface et à la base de la couche de surface.

La Figure 5.6 illustre l'évolution des contraintes de traction en fonction de la température pour les enrobés R0 à R40. On observe que l'ajout du GBR jusqu'à 30% entraîne une augmentation des contraintes de traction à la surface de la couche de roulement pour les températures comprises entre 5 et -27 °C. Les niveaux de contraintes de traction entre le R30 et le R40, quelle que soit la température considérée, sont quasiment identiques.

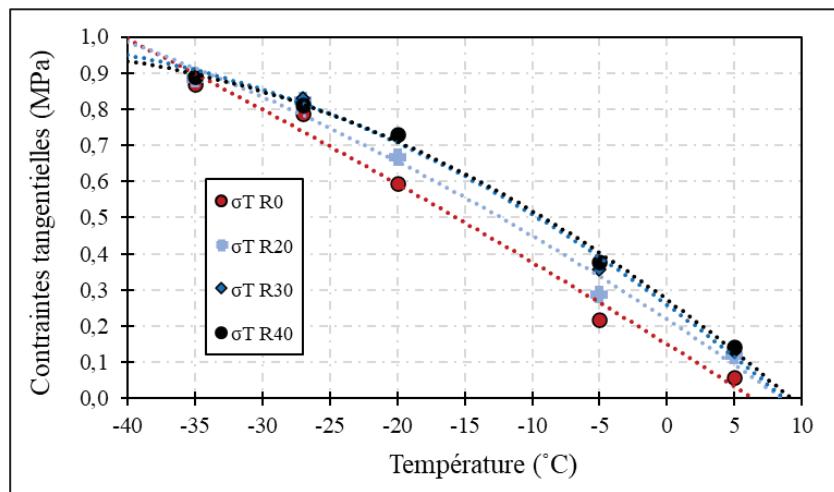


Figure 5.6 Contraintes traction au centre des roues du jumelage déterminées avec Alizé (risque de 5%) à la surface de la chaussée pour les enrobés de l'étude

Pour évaluer la capacité de la couche de surface à supporter ces contraintes tangentialles, en plus des contraintes thermiques induites, les essais de traction directe ont été réalisés pour chaque enrobé. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans les prochains paragraphes.

5.5 Résultats des essais de traction directe (TD)

Cette section présente essentiellement les résultats des essais TD. Pour déterminer la réserve de résistance en traction, les résultats des essais TSRST déjà traités au chapitre 4 ont été repris et combinés à ceux des essais TD.

Deux essais avaient été initialement prévus par température d'essai. Compte tenu des difficultés rencontrées lors de la réalisation des essais, la répétition des essais n'a pas été possible pour tous les enrobés (voir Tableau 5.4).

5.5.1 Évolution des contraintes en cours d'essai

Au cours des essais TD, on mesure l'évolution de la force de traction convertie en contrainte et la déformation de l'éprouvette jusqu'à la rupture pour chaque température. Dans cette section, pour une meilleure visualisation des résultats obtenus, l'accent est mis sur les résultats obtenus à très basse température. Les résultats pour l'ensemble de température sont donnés à l'annexe VI. Ainsi, la Figure 5.7 montre l'évolution des contraintes en fonction de la déformation pour l'ensemble des mélanges aux températures -20 °C, -27 °C et -35 °C.

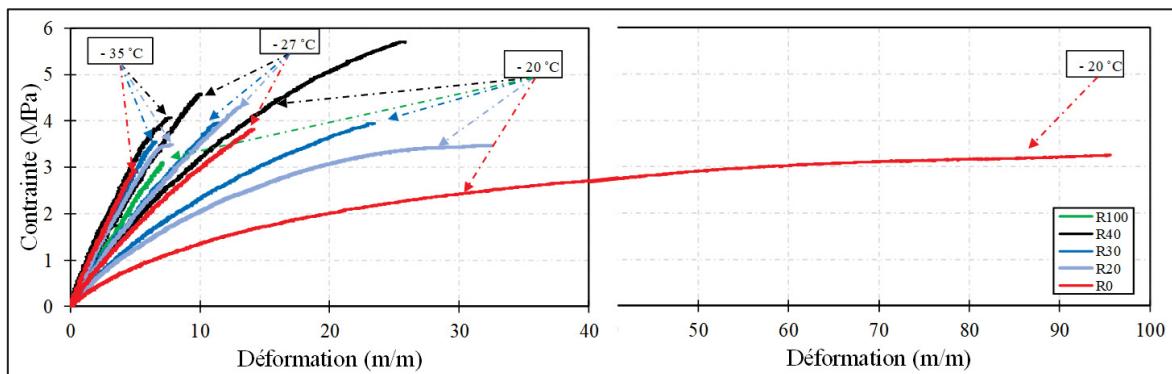


Figure 5.7 Évolution des contraintes de traction en fonction de la déformation lors de l'essai TD

Pour les trois températures discutées dans cette section, on observe que l'ajout du GBR dans le ESG10 conduit à une augmentation de la résistance en traction et une diminution de la déformation. Il en est de même pour les températures plus chaudes dont les résultats ne sont pas montrés à la Figure 5.7. Les contraintes maximales à la rupture représentent la résistance en traction des enrobés.

5.5.2 Évolution de la résistance en traction des enrobés

En représentant graphiquement l'ensemble des résultats obtenus à différentes températures pour un enrobé donné, on obtient l'enveloppe de résistance en traction du matériau. Les enveloppes des enrobés ESG10 (R0, R20, R30, et R40) ainsi que de l'enrobé R100, composé à 100 % de GBR, sont illustrées à la Figure 5.8. Une répétition d'essai est faite pour chaque température et elles sont représentées à la Figure 5.8 par les points évidés (sans remplissage). Toutefois, tous les points d'essai n'ont pas été répétés. Pour le R0 particulièrement, un essai a été réalisé par température. La non-répétition des essais est liée à un manque de matériaux et à la perte d'un très grand nombre d'éprouvettes durant les essais TD. Pour les points ayant une répétition d'essai, lorsque l'écart entre les résultats des deux essais est grand, comme dans le cas du R40 à -20 °C, le point jugé non conforme n'est pas pris en compte dans l'analyse.

On observe un déplacement vers le haut de l'enveloppe de résistance en traction avec l'ajout de GBR dans l'enrobé ESG10, indiquant une augmentation de la résistance en traction.

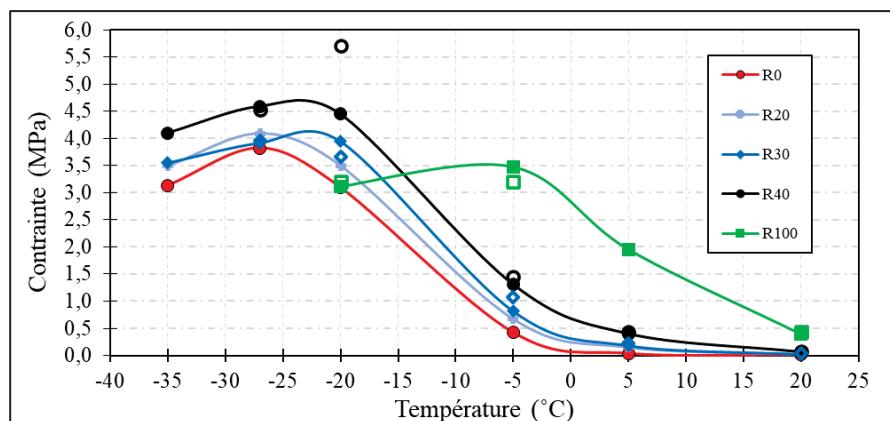


Figure 5.8 Évolution de la résistance en traction des enrobés ESG10 et 100% GBR en fonction de la température

Pour compléter la caractérisation et l'analyse à basse température, les résultats de résistance en traction ont été combinés aux résultats des essais TSRST pour les enrobés à l'étude dans ce chapitre.

5.6 Combinaison des essais TD et TSRST

L'évolution des résistances en traction des enrobés en fonction de température, également illustrée par la Figure 5.8, a été combinée aux résultats des essais TSRST discutés au CHAPITRE 4. L'évolution des contraintes thermiques induites au TSRST ainsi que de la résistance en traction des enrobés sont illustrées à la Figure 5.9. Le comportement des courbes TSRST montre également une augmentation des contraintes thermiques induites avec l'ajout de GBR.

La comparaison des résultats des deux essais permet de déterminer la réserve de résistance en traction du matériau pour lequel cette comparaison est faite. La résistance en traction, étant une caractéristique mécanique, peut être influencée par les vides des éprouvettes d'essai, tout comme les contraintes thermiques induites. Pour effectuer une comparaison objective entre ces deux essais, il est essentiel de s'assurer que la teneur en vides des éprouvettes des différents essais soit similaire. Sinon, il faudra apporter une correction aux résultats de contraintes pour tenir compte de la différence de vides entre les éprouvettes.

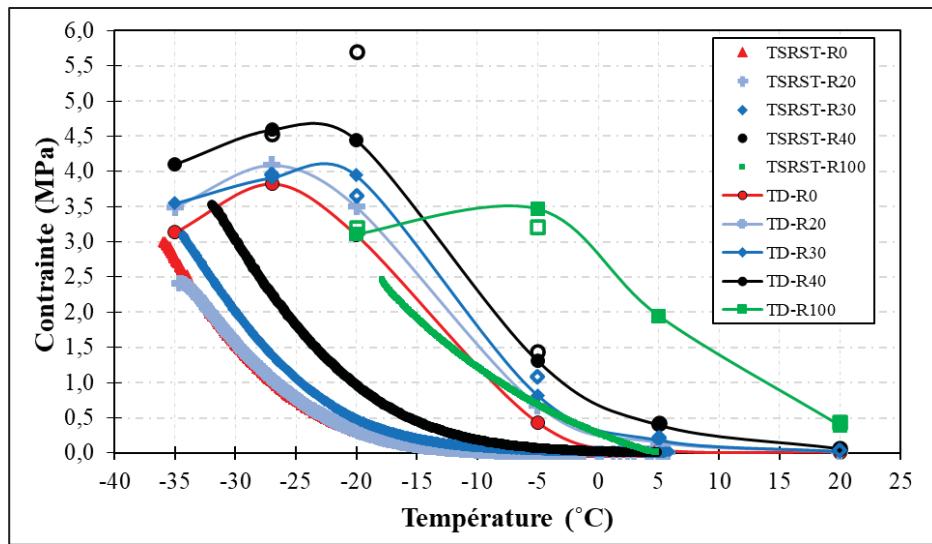


Figure 5.9 Évolution des contraintes d'essai TSRST et la résistance en traction des enrobés ESG10 et 100% GBR en fonction de la température

5.7 Observations lors du compactage des plaques d'enrobé et vides des éprouvettes d'essai TD

Les éprouvettes utilisées pour les essais TD ont été prélevées de plaques compactées en laboratoire à l'aide du compacteur MLPC, suivant la méthode de compactage LC 26-400, en visant une teneur en vides de 5%. Durant le processus de compactage, il a été observé que les mélanges présentaient des comportements différents pour une énergie de compactage identique. Les enrobés R0, R20 et R30 ont présenté une capacité au déplacement plus important dans le moule, rendant la densification nécessaire pour atteindre les vides souhaités plus difficile. Dans certains cas, comme pour les éprouvettes d'essai TD du mélange R20, compacté ultérieurement dans le projet, un ajustement de l'énergie de compactage a été requis pour garantir une meilleure compaction. Cependant, il a également été noté que l'incorporation de GBR améliorait le comportement au compactage.

Les teneurs en vides obtenues pour les différentes éprouvettes utilisées dans la série d'essais TD sont données au Tableau 5.4 et elles sont différentes d'une éprouvette à l'autre. Nous avons observé une répartition ou distribution non homogène des vides dans certaines éprouvettes et qui semble exercer une influence sur les résultats des essais TD. Conduisant à l'émission de

l'hypothèse qu'une concentration de vides influencerait l'essai TD à basse température. Celle-ci est corroborée par les résultats de l'essai TD du mélange R30 à -27 °C. Comme illustré à la Figure 5.8, l'ajout de GBR dans l'enrobé ESG10 entraîne une augmentation de la résistance en traction de l'enrobé. Seulement, le point du mélange R30 à -27 °C ne suit pas cette tendance.

Pour s'assurer de la conformité du résultat du R30 à cette température, une attention particulière a été portée aux éprouvettes R30, et trois reprises de l'essai ont été effectuées. Les résultats des quatre essais à -27 °C pour le R30 ont montré une cohérence. Par la suite, Il a été observé que les vides étaient distribués de manière inégale à l'intérieur des éprouvettes R30 utilisées pour cet essai en ce moment-là par rapport aux autres mélanges. En effet, comme le montre la photo à la Figure 5.10, des concentrations de vides sont visibles par endroits dans ces éprouvettes, représentant ainsi des zones de faiblesse pouvant affecter les résultats à basse température.



Figure 5.10 Photos des éprouvettes d'essai TD des enrobés R30 et R40

5.8 Influence des vides air sur les caractéristiques des enrobés bitumineux

Les vides d'air dans les enrobés bitumineux jouent un rôle crucial dans le comportement mécanique et sur la durabilité des matériaux bitumineux. Leur influence sur les caractéristiques

mécaniques a fait l'objet de plusieurs études, démontrant que les vides d'air affectent directement la rigidité, la résistance à la fissuration, ainsi que la susceptibilité à l'ornierage et à d'autres modes de dégradation. Ces vides influencent également la densité, l'homogénéité et la résistance globale des enrobés (Doucet & Auger, 2010a; Hofko et al., 2012; Li & Youtcheff, 2018; Moutier, 1991; Moutier et al., 1988; Seo, El-Haggan, King, Joon Lee, & Richard Kim, 2007; Steiner et al., 2016; Witczak & Fonseca, 1996).

5.8.1 Influence des vides sur la rigidité des enrobés

Les vides peuvent significativement diminuer la rigidité des enrobés. Un enrobé avec un pourcentage élevé de vides tend à avoir une structure plus poreuse, ce qui peut réduire son module de rigidité (Caro, Masad, Bhasin, Little, & Sanchez-Silva, 2010; Hofko et al., 2012). Di Benedetto & Corté (2005) ont observé que la rigidité des enrobés augmente avec la diminution des vides. De plus, des travaux réalisés par divers auteurs (Doucet & Auger, 2010a; G. M. Rowe, Khoe, Blankenship, & Mahboub, 2009; Seo et al., 2007; Steiner et al., 2016) ont montré que les résultats du module complexe sont significativement influencés par la teneur en vides, surtout à des fréquences élevées. Diverses tendances sont observées entre les modules de rigidité des enrobés et les teneurs en vides, ce qui a conduit à la création de divers modèles prédictifs selon le type de mélange utilisé.

5.8.2 Modèles prédictifs

Plusieurs modèles ont été développés pour prédire le module de rigidité des enrobés bitumineux, généralement basés sur des résultats expérimentaux spécifiques aux matériaux utilisés lors des essais.

- Modèles de Moutier (1991) : Ce modèle est l'un des plus connus pour prédire le module de rigidité à une température et une fréquence données. Par exemple, à 15 °C et 10 Hz, le modèle est :

$$|E^*|_{15^\circ C-10\text{ Hz}} = (-3,36 + 1,79 TL - 0,184 TL^2 + 0,097 + (\Delta C(0,078+0,63/TL)))*10000 \quad (5.1)$$

Où

ΔC = écart de compacité mesurant la différence entre la compacité obtenue ou espérée par le matériau sur chantier (C) et celle qu'il obtient avec le compacteur de plaques pour le compactage "moyen" (C_m) ou avec la presse à cisaillement giratoire pour 80 girations (C_{80}).
 $\Delta C = C - C_m$ (ou C_{80}).

TL = Teneur en bitume du mélange.

- Modèle de Seo et al. (2007) : Ce modèle est basé sur une fonction sigmoïdale exprimée comme suit :

$$\text{Log } |E^*| = a(\%AV) + \frac{b(\%AV)}{1 + \frac{1}{\exp^{d(\%AV) + e(\%AV) \log[f.a_T(T)]}}} \quad (5.2)$$

Avec,

a, b, d et e = coefficients de régression fonction de la teneur en vides d'air (%AV);

f = fréquence;

a_T = facteur de translation.

- Modèle de Rowe et al. (2009) : Ce modèle propose quatre équations, pour quatre méthodes d'analyse, obtenues par régression linéaire pour prédire le module vitreux en fonction des résultats expérimentaux. Ces équations sont présentées à la Figure 5-11.

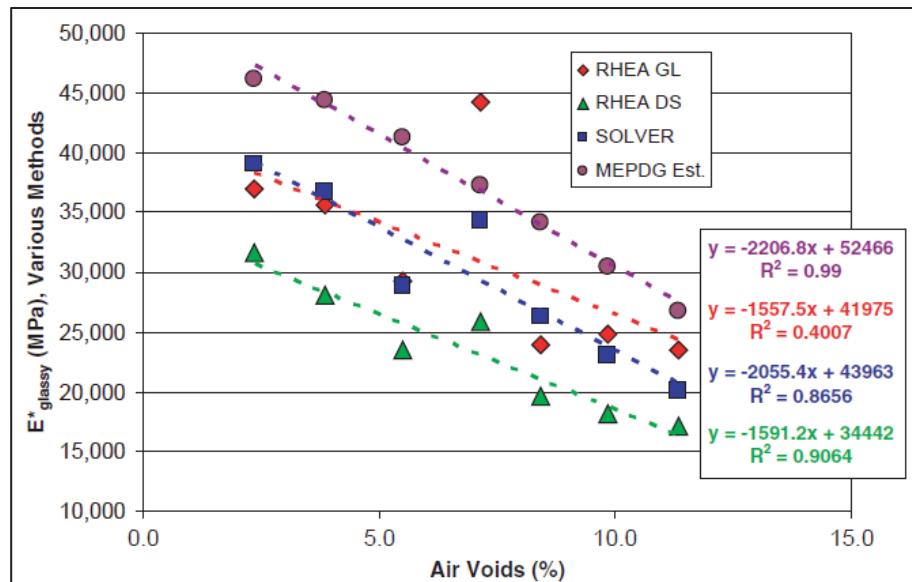


Figure 5.11 Évolution du module vitreux en fonction des vides d'air et modèles de régression linéaires des différentes méthodes d'analyse (Rowe et al., 2009)

Il existe d'autres modèles prédictifs du module de rigidité dans la littérature, tel que le modèle de Witczak et Fonseca (1996) ou pour prédire d'autres caractéristiques comme le ε_6 en fatigue (Moutier, 1991). Cependant, nous ne sommes pas parvenus à identifier, pour les matériaux bitumineux, un modèle permettant de prédire directement l'évolution de contraintes en fonction des vides.

Les modèles, bien que divers, montrent que la nécessité d'établir un modèle prédictif spécifique pour ce projet est impérative, car les modèles existants ne sont pas toujours adaptés.

5.9 Étude exploratoire de l'impact des vides sur le module complexe des enrobés de ce projet

L'objectif de cette étude était d'explorer l'impact des vides d'air sur les propriétés mécaniques et rhéologiques des enrobés utilisés dans la présente recherche, en se basant sur un projet de maîtrise complété par Tayeb Boussouar en 2023. Ce projet visait à étudier deux enrobés, R30 et R40, avec des teneurs en vides ciblées de 3%, 6%, et 9% pour les éprouvettes d'essai. Les enrobés ont été produits en laboratoire et compactés à l'aide d'un compacteur MLPC. Les

essais effectués sur ces mélanges ont révélé des résultats variés, bien que certaines tendances aient été observées.

5.9.1 Résultats expérimentaux et observations

Les vides mesurés dans les éprouvettes d'essai pour chaque enrobé étaient les suivants :

- R30 : 5,7%, 6,9%, et 9,0%.
- R40 : 3,2%, 6,1%, et 6,8%.

Un essai de module complexe a été réalisé pour chaque teneur en vides, soit trois essais par enrobé. Toutefois, en raison du nombre limité d'essais et de la proximité des valeurs de vides, les résultats ne permettent pas de dégager de tendances nettes entre les caractéristiques rhéologiques et la variation des vides. Cependant, certaines observations importantes ont été faites :

- Angle de phase : Dans les plages de vides obtenues pour les deux mélanges, l'angle de phase n'a pas été affecté par la variation des vides.
- Relation linéaire : Pour l'enrobé R30, une relation linéaire a été observée entre les vides et les modules (statique, vitreux, composante élastique, composante visqueuse, norme du module complexe), bien que la qualité de la régression soit faible (indice de qualité pour la norme du module complexe à 15 °C-10 Hz, R^2 de 0,573). Pour l'enrobé R40, la tendance linéaire était également présente, avec une meilleure qualité de régression (R^2 de 0,894).

5.9.2 Application de la contrainte effective.

L'aspect clé de cette étude est l'application de la notion de contrainte effective, introduite par Perraton, Baaj, Benedetto, et Paradis (2003) dans leurs travaux sur la résistance en fatigue des matériaux bitumineux, à l'analyse des résultats des essais de module complexe du projet. Cette notion a été adaptée à l'analyse des essais de module complexe pour les enrobés étudiés. La contrainte effective est calculée à l'aide de la force mesurée lors de l'essai de module complexe et de la section effective de l'éprouvette, qui tient compte des vides d'air. Un module corrigé

Ec est ensuite déterminé en fonction de la contrainte effective et de la déformation ε . Les équations utilisées pour ces calculs sont les suivantes :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{\text{effective}} = \frac{F}{A_{\text{effective}}} \quad (5.4)$$

$$A_{\text{effective}} = A - A * \frac{V_i(\%)}{100} \quad (5.5)$$

$$E_c = \frac{\sigma_{\text{effective}}}{\varepsilon} \quad (5.6)$$

Où

F : Force mesurée lors de l'essai.

A : Section transversale de l'éprouvette.

$A_{\text{effective}}$: Section effective de l'éprouvette.

V_i : Teneur en vides d'air.

ε : Déformation mesurée.

5.9.3 Amélioration de la précision des modèles

Les résultats de l'étude d'exploration de l'impact de la variation de la teneur en vides sur les caractéristiques du module complexe sont disponible dans le rapport de maîtrise de Boussouar (2023). L'évolution de la norme du module complexe des enrobés R30 et R40 en fonction des vides à 15 °C et 10 Hz est présentée à la Figure 5.12.

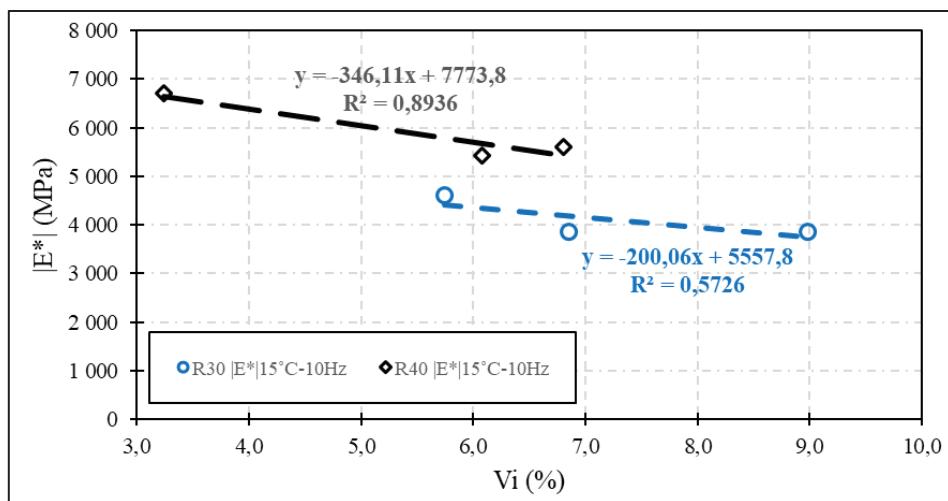


Figure 5.12 Évolution de la norme du module complexe des enrobés R30 et R40 en fonction de la teneur en vides à 15 °C-10 Hz

L’application de la contrainte effective a permis d’améliorer significativement la précision des modèles établis pour la relation entre le module complexe et les vides. Pour les modules corrigés dont l’évolution en fonction des vides est montrée à la Figure 5.13 pour les deux enrobés, les résultats montrent une amélioration des indices de qualité (R^2) pour les deux enrobés :

- R30 : Le R^2 passe de 0,573 à 0,897.
- R40 : Le R^2 passe de 0,894 à 0,954.

Cette nette amélioration confirme que l’utilisation de la contrainte effective permet de mieux représenter les caractéristiques mécaniques réelles des matériaux bitumineux. Cela indique que la correction par contrainte effective est une approche pertinente pour tenir compte des effets des vides dans les études sur le module complexe des enrobés.

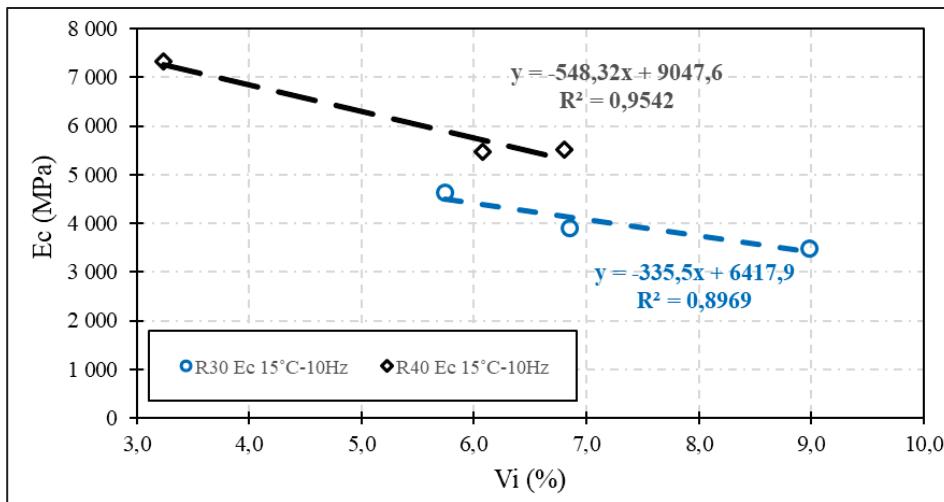


Figure 5.13 Évolution du module corrigé des enrobés R30 et R40 en fonction de la teneur en vides à 15 °C-10 Hz

Cette méthode de correction présente toutefois une limitation : elle suppose une répartition homogène des vides, ce qui n'est pas toujours le cas. Des concentrations de vides peuvent exister au sein de l'éprouvette et peuvent créer des points de faiblesse.

Bien que cette étude exploratoire n'ait pas permis de dégager des tendances claires en raison du nombre limité d'essais et des vides relativement proches, elle a permis de démontrer l'importance de la contrainte effective dans la modélisation des propriétés mécaniques des enrobés. En utilisant cette méthode, une meilleure correspondance entre la teneur en vides et les propriétés du module complexe a été obtenue, améliorant ainsi la compréhension des interactions entre ces paramètres. Cette méthode pourrait être utile pour des études futures nécessitant une correction des propriétés mécaniques des enrobés en fonction des vides.

5.10 Correction des résultats des essais TSRST et TD par la méthode des contraintes effectives

Les résultats des essais de contrainte TSRST et TD (Traction Directe) sont influencés par la teneur en vides des éprouvettes, une influence qui devient plus marquée à mesure que la température diminue. Pour effectuer une analyse comparative objective de ces deux essais, il est nécessaire de corriger les résultats de contrainte obtenus en tenant compte de la teneur en

vides. L'étude présentée au paragraphe 5.9 a montré que l'utilisation des contraintes effectives permet d'avoir une meilleure corrélation entre la teneur en vides et les caractéristiques mécaniques des enrobés. La méthode de correction des contraintes par l'utilisation de la section effective présentée précédemment a été appliquée aux résultats des essais TSRST et TD. Dans les deux types d'essais, les éprouvettes sont cylindriques, avec un diamètre de 57 mm pour l'essai TSRST et de 75 mm pour l'essai TD. Les contraintes obtenues aux deux essais, les vides des éprouvettes d'essai et les contraintes effectives obtenues après calcul sont présentés aux Tableau 5.3 et Tableau 5.4.

Tableau 5.3 Contraintes mesurées et contraintes effectives de rupture des essais TSRST des enrobés de l'étude

Temp. (°C)	R0		R20		R30		R40		R100	
	Vi (%) = 6,1	σ_{tsrst}	Vi (%) = 8,4	σ_{tsrst}	Vi (%) = 6,6	σ_{tsrst}	Vi (%) = 5,1	σ_{tsrst}	Vi (%) = 6,4	σ_{tsrst}
	(MPa)		(MPa)		(MPa)		(MPa)		(MPa)	
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-5	0,012	0,013	0,004	0,004	0,038	0,041	0,067	0,071	0,731	0,781
-20	0,328	0,349	0,320	0,349	0,555	0,594	0,969	1,021	3,200	3,419
-27	1,069	1,138	1,047	1,143	1,518	1,626	2,272	2,394		
-35	2,847	3,031	3,200	3,493	3,700	3,963	4,500	4,742		

Tableau 5.4 Contraintes mesurées et contraintes effectives de rupture des essais TD des enrobés de l'étude

Temp. (°C)	# Éch.	R0			R20			R30			R40			R100		
		σ_{max} TD	σ_{max} TD	Vi (%)												
		(MPa)			(MPa)			(MPa)			(MPa)			(MPa)		
20	Ep01	0,01	0,01	7,2	0,02	0,02	4,5	0,02	0,02	4,5	0,07	0,07	2,2	0,39	0,42	6,3
	Ep02	0,01	0,01	5,3		N.D.		0,00	0,00	5,3	0,06	0,06	6,3	0,43	0,46	6,8
5	Ep01	0,05	0,05	6,5	0,15	0,16	4,9	0,19	0,20	4,1	0,43	0,44	2,9	1,95	2,08	6,4
	Ep02			N.D.		N.D.		0,22	0,23	5,7	0,4	0,43	6,6			N.D.
-5	Ep01	0,37	0,39	6,2	0,68	0,71	4,7	0,82	0,86	5,1	1,45	1,50	3,2	3,21	3,46	7,1
	Ep02			N.D.		N.D.		1,09	1,14	4,3	1,31	1,38	4,9	3,47	3,71	6,5
-20	Ep01	3,10	3,29	5,9	3,50	3,70	5,3	3,95	4,12	4,2	5,71	5,83	2,1	3,11	3,35	7,2
	Ep02			N.D.	2,30	2,41	4,6	3,50	3,76	7,0	4,448	4,76	6,5	3,20	3,41	6,1
-27	Ep01	3,83	4,07	6,0	4,09	4,26	4,1	3,96	4,19	5,5	4,59	4,69	2,1			
	Ep02			N.D.	4,30	4,49	4,2	3,91	4,13	5,3	4,53	4,80	5,7			
-35	Ep01	3,13	3,34	6,2	3,49	3,67	5,0	3,50	3,68	4,8	4,08	4,17	2,2			
	Ep02	2,94	3,16	6,9		N.D.		4,03	4,21	4,3	3,22	3,38	4,8			

Pour comparer les résultats de contraintes corrigées des essais TSRST et TD à des températures spécifiques, telles que -35, -30 et -15 °C pour les enrobés ESG10, une extrapolation ou une interpolation des données a été effectuée pour les différents mélanges. De même, la contrainte effective TSRST à -20 et -15 °C du mélange R100 a été obtenue par le même procédé. La Figure 5.14 présente l'évolution des contraintes effectives des deux essais pour l'ensemble des enrobés de l'étude.

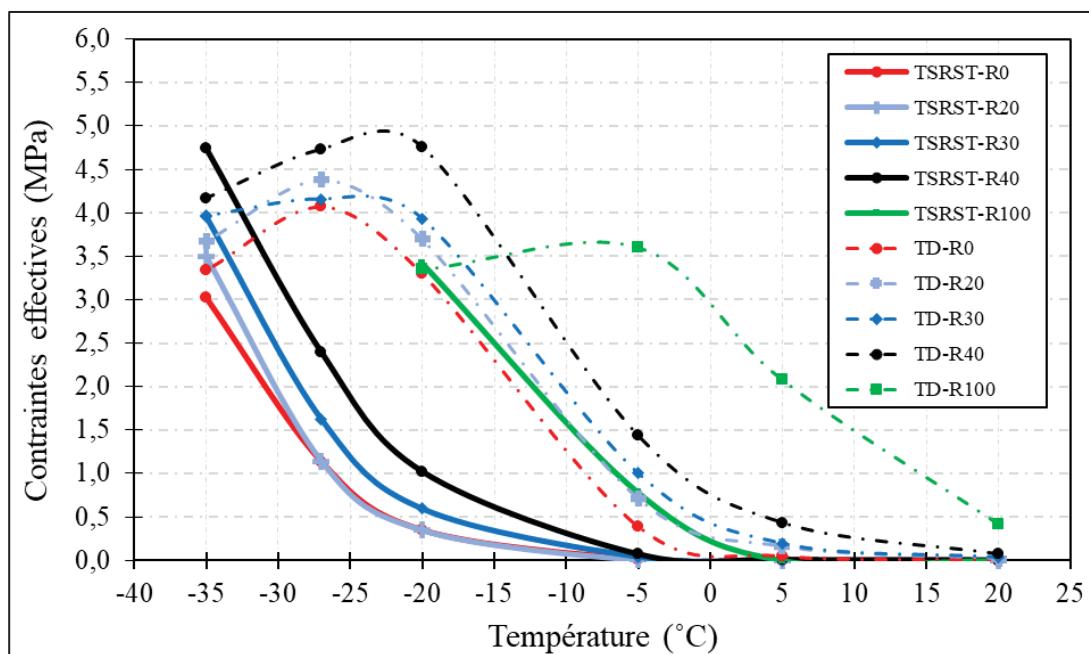


Figure 5.14 Évolution des contraintes effectives TSRST et contraintes maximales effectives TD des enrobés de l'étude

Les contraintes effectives ont par la suite permis de déterminer la réserve de résistance en traction de chaque enrobé.

5.11 Influence de l'ajout du GBR sur les températures de rupture à basse température

Les températures de rupture à basse température sont données au Tableau 5.5. La température de rupture TSRST est une moyenne de deux éprouvettes. La Température de rupture

TSRST+TD est déterminée à l'aide des contraintes effectives présentées à la Figure 5.14. Elle correspond à la température du point où les courbes de ces deux essais se croisent. Pour l'ensemble des mélanges, la rupture au TSRST intervient avant la rupture TSRST+TD.

Tableau 5.5 Températures de rupture à basse température

Enrobés	Temp. rupture TSRST (°C)	Temp. rupture TSRST+TD(°C)
R0	-34,4	-35,5
R20	-33,9	-35,5
R30	-33,9	-35,0
R40	-31,4	-33,6
R100	-17,6	-19,7

À basse température, l'incorporation de GBR dans le ESG10 entraîne une légère augmentation de la température de rupture. On peut conclure que jusqu'à 30% de GBR ajouté dans le ESG10, le GBR n'a pas d'influence significative sur les températures de rupture. Cependant, il est remarquable que la rupture au TSRST survienne avant la rupture TSRST+TD, surtout pour les enrobés ESG10 contenant du GBR et l'enrobé composé à 100% de GBR. Par exemple, l'enrobé ESG10-R0 présente une rupture au TSRST à -35,64 °C (voir Tableau 4.4 au CHAPITRE 4). Cette observation pourrait s'expliquer en partie par la vitesse de sollicitation de l'essai TD, calculée avec un coefficient de contraction thermique de 22 μ def/°C, alors que les coefficients mesurés au CHAPITRE 4 varient d'un enrobé à l'autre. L'ajout de GBR est peut-être responsable d'une rupture précoce au TSRST et pourrait également influencer la réserve de résistance en traction de l'enrobé ESG10. Cette observation pourrait aussi être liée à la vitesse de refroidissement de l'essai TSRST qui devrait peut-être inférieure 10 °C/h pour les enrobés recyclés et ainsi éviter complètement la présence de gradient thermique au sein de l'éprouvette d'essai. Une autre hypothèse serait que cette observation soit liée à la température de conditionnement (5 °C) à l'essai TSRST qui est la même pour l'ensemble des mélanges. Il se pourrait que les enrobés avec GBR aient besoin d'être conditionnés à une température plus chaude (10 °C par exemple) avant la rampe de refroidissement au taux de 10 °C/h. Ce qui pourrait permettre plus de relaxation dans les éprouvettes d'enrobé recyclé. Entrainant de fait,

des températures de rupture plus basses à l'essai TSRST. Ces hypothèses montrent la nécessité de réaliser d'autres études pour mieux cerner le comportement des enrobés à fort taux de GBR.

En somme, la combinaison des résultats des essais TD et TSRST pour l'évaluation de la réserve de résistance en traction pourrait nécessiter, en plus de porter une attention particulière aux vides des éprouvettes, d'apporter des modifications à l'essai TSRST dans le cadre des enrobés à fort taux de GBR.

5.12 Influence du GBR sur la réserve de résistance en traction (RRT) et prise en compte de l'effet du trafic pour l'évaluation de la capacité résiduelle de l'enrobé bitumineux dans la chaussée

5.12.1 Influence du GBR sur la RRT

La réserve de résistance en traction a été calculée pour différentes températures à partir des résultats montrés à la Figure 5.14 à l'aide de l'équation (5.7) et les résultats sont données au Tableau 5.4.

$$\text{RRT} = \sigma_{\text{effective TD}} - \sigma_{\text{effective TSRST}} \quad (5.7)$$

Les résultats obtenus pour les différents mélanges ont été représentés sous forme de courbes et sont présentés à la Figure 5.15. Pour le calcul de la RRT à -30 °C, la résistance en traction est estimée par interpolation entre les points expérimentaux à -27 et -35°C des essais TD. La résistance en traction de chaque type d'enrobé étudié augmente avec la baisse de température jusqu'à atteindre une valeur maximale correspondant à la température de transition ductile-fragile, différente de la température Tg indiquée dans le Tableau 4.4. La température de transition ductile-fragile est définie comme celle correspondant au point de contrainte maximale de l'enveloppe des contraintes de traction (Olard, 2003), et a été déterminée dans cette étude à partir des résultats présentés à la Figure 5.8. Elle est de -27 °C pour les enrobés R0 et R20, et de -22,5 °C pour les enrobés R30 et R40. Ainsi, l'incorporation du GBR entraîne une augmentation de la température de transition ductile-fragile.

L'ajout de GBR augmente également la RRT de l'enrobé pour les températures comprises entre 5 et -27 °C pour un taux maximum de GBR de 20%. Pour les taux de GBR supérieurs à 20%, la RRT augmente entre 5 et -22,5 °C. Aux températures de transition ductile-fragile et en dessous, les enrobés contenant du GBR présentent une RRT suffisante pour faire face aux différentes contraintes de trafic. À partir de -27 °C, les mélanges R30 et R40 montrent une diminution de leur RRT comparativement aux mélanges R0 et R20. À -30 °C, la RRT des enrobés avec GBR est certes inférieure à celle de l'enrobé R0, mais reste non nul. La rupture moyenne au TSRST étant à -33,9 °C pour les enrobés R20 et R30 ainsi qu'à -31,4 °C pour le R40 signifie que les enrobés avec GBR rompent alors qu'ils disposent encore de RRT. Cette observation notable peut être expliquée en partie par les hypothèses émises précédemment.

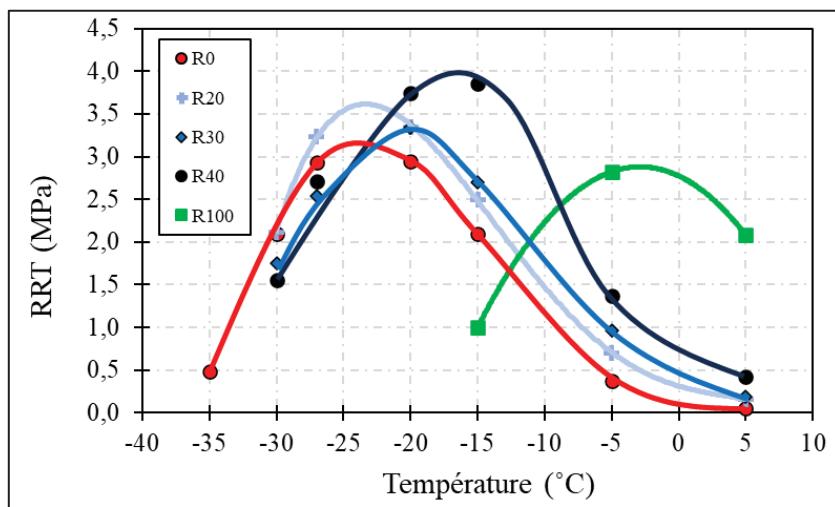


Figure 5.15 Évolution de la RRT des enrobés de l'étude

En résumé, l'ajout de GBR dans les enrobés ESG10 augmente la température de transition ductile-fragile et améliore la réserve de résistance en traction aux températures moins froides. En dessous de la température de transition ductile-fragile, l'ajout de GBR a provoqué une diminution de la RRT. Pour l'enrobé R0, la RRT finit par s'épuiser complètement, entraînant la rupture du matériau lorsque la RRT atteint zéro. Pour les enrobés ESG10 contenant du GBR, ainsi que pour celui composé à 100% de GBR, la RRT présente un comportement similaire, à la différence près que ces matériaux rompent avant que la RRT ne soit nulle. Ce travail a permis

d'observer un phénomène de rupture précoce à basse température des enrobés contenant du GBR, ainsi que de constater que l'ajout de GBR jusqu'à 40% n'influence que légèrement les températures de rupture à basse température, mais est avantageux pour les températures moins froides.

Les conditions climatiques, notamment la baisse de température, jouent un rôle important dans l'apparition de fissures dans la chaussée. Même avec l'incorporation de GBR, l'enrobé ESG10 résiste à cette baisse de température jusqu'aux températures extrêmement froides avant de se rompre. Sur site, dans des conditions extrêmes, le trafic pourrait également contribuer de manière significative à la fissuration de la chaussée. Il est donc essentiel de prendre en compte l'effet du trafic pour évaluer sa contribution à la fissuration à basse température de la chaussée.

5.12.2 Prise en compte du trafic dans l'évaluation de la capacité mécanique de l'enrobé en couche de surface

Pour évaluer l'influence du trafic sur la RRT, les contraintes de traction dues au trafic ont été déterminées à la base et à la surface de la couche de roulement à l'aide du logiciel Alizé. Les contraintes retenues pour cette analyse sont celles à la surface de la couche de roulement.

Les résultats des calculs de RRT pour les différents enrobés, obtenus à partir des essais TSRST et TD, ainsi que les contraintes de traction à la surface de la chaussée dues au trafic sont présentées dans le Tableau 5.6. La Figure 5.16 illustre l'évolution du reste de RRT en fonction de la température après soustraction de la contrainte de traction due au trafic. Le reste de la réserve de résistance en traction (R_{RRT}) représente la différence entre la RRT et la contrainte du trafic à une température donnée. Calculé à l'aide de l'Équation (5.8), le R_{RRT} indique, lorsqu'il est non nul, le surplus de résistance de la chaussée.

$$R_{RRT} = RRT - \sigma_{Trafic} \quad (5.8)$$

Les effets du trafic sur la RRT à 5 °C ne sont pas pris en compte dans l'analyse. À cette température, les enrobés possèdent une grande capacité de relaxation des contraintes, leur permettant de dissiper toutes les contraintes thermiques et mécaniques.

Le RRRT entre -5 et -30 °C est non nul pour l'ensemble des enrobés. Le trafic n'a causé qu'une légère diminution de la RRT dans cette plage de température. Les tendances observées pour le RRRT sont identiques à celles de la RRT. Le GBR utilisé dans cette étude provient de la grande région métropolitaine de Montréal, où la température basse critique Tb exigée par le MTMD est de -28 °C. Le choix du bitume PG 52S-34 pour cette étude, bien que contraire aux exigences du MTMD pour cette zone climatique, permet d'obtenir les performances souhaitées pour des enrobés avec un fort taux de GBR. Le trafic n'a pas d'influence significative sur la RRT, avec une diminution généralement faible de la RRT due au trafic.

En dessous de -30 °C, le RRRT du R0 s'annule à -33,5 °C. Le trafic augmentant ainsi d'environ 2 °C la température correspondant au point où la RRT devient nulle (ou température basse de rupture) pour l'enrobé R0.

Tableau 5.6 Réserve de résistance en traction des enrobés et contraintes tangentielles (σ_T) à la surface des enrobés de l'étude dans la chaussée

Temp. (°C)	Réserve de résistance en traction (MPa)				Contrainte tangentielle σ_T (MPa)			
	R0	R20	R30	R40	R0	R20	R30	R40
5	0,050	0,160	0,194	0,427	0,057	0,118	0,130	0,142
-5	0,377	0,706	0,959	1,366	0,219	0,288	0,358	0,377
-15	2,100	2,500	2,700	3,850	0,516	0,580	0,612	0,620
-20	2,950	3,350	3,340	4,769	0,596	0,666	0,724	0,731
-27	2,930	2,960	2,534	2,710	0,788	0,825	0,829	0,823
-30	2,100	2,000	1,750	1,550	0,830	0,820	0,845	0,841
-35	0,490	-	-	-	0,868	0,885	0,895	0,891

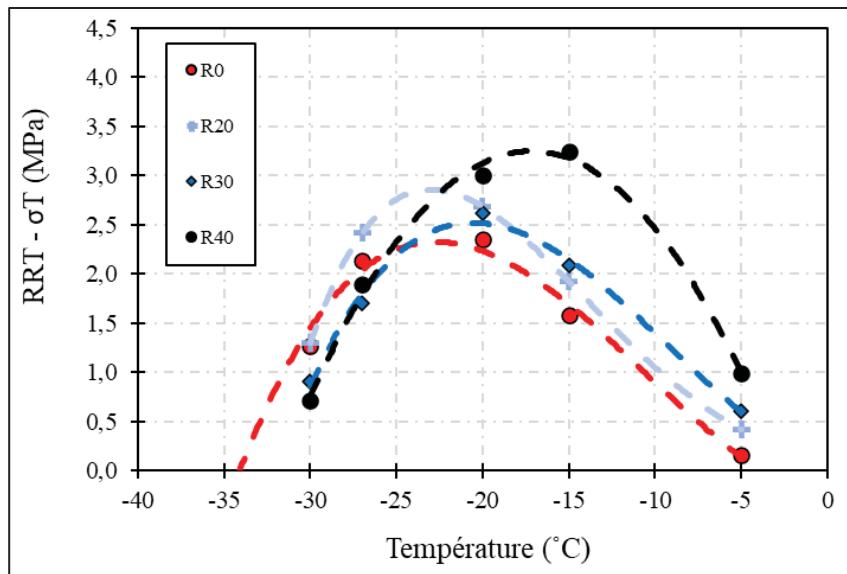


Figure 5.16 Évolution du RRRT des enrobés ESG10

5.13 Conclusion

L'évaluation de la capacité de l'enrobé à supporter les sollicitations (thermiques et mécaniques) dans la chaussée et la détermination de l'influence de l'ajout du GBR dans cet enrobé ont nécessité la réalisation des essais TD, l'utilisation des résultats des essais TSRST et la simulation du comportement sous charge de ces enrobés dans la chaussée. Les essais TD ont montré une augmentation de la résistance en traction avec l'ajout de GBR. L'influence des vides sur les résultats des essais TD est ressortie de l'analyse de ceux-ci, nécessitant une correction des résistances en traction et des contraintes thermiques induites. La détermination de la RRT a été effectuée à l'aide des contraintes corrigées. Son analyse a montré une amélioration avec l'ajout de GBR dans une certaine plage de température basse. La simulation du comportement de la chaussée avec les enrobés de cette étude en couche de surface a montré une amélioration de la capacité mécanique de la couche de surface avec l'ajout de GBR. Malgré une augmentation des contraintes de traction dues au trafic avec l'ajout de GBR, le RRRT a présenté les mêmes tendances que la RRT et l'influence du trafic sur les performances à basse température est minime. Sur une large plage de températures basses, l'ajout du GBR agit donc comme un renfort, offrant un gain significatif en performance à l'enrobé ESG10. En

considérant les températures supérieures et égales à -20°C dans cette partie de l'étude, l'enrobé R40 présente les meilleures performances de résistance en traction.

L'impact du trafic sur la chaussée est peu perceptible à ces températures dans cette étude, mais il entraîne néanmoins une légère augmentation de la température de rupture. L'ajout de GBR et le trafic sont deux facteurs qui peuvent commencer à expliquer l'apparition précoce de fissures transversales dans la chaussée. Cependant, ils ne suffisent pas à expliquer entièrement ce phénomène de fissuration. En revanche, le concept de reste de réserve de résistance en traction (R_{RRT}) peut être un outil intéressant pour évaluer l'apparition prématurée de fissures transversales. Pour une évaluation complète de ce phénomène de fissuration, il est essentiel de déterminer le paramètre R_{RRT} en tenant compte de tous les modes de sollicitation pouvant influencer la résistance en traction. Dans cette étude, les sollicitations thermiques et mécaniques ont été prises en compte. Mais un autre phénomène thermique, les cycles thermiques, pourrait également avoir un impact significatif sur la résistance en traction des matériaux bitumineux et contribuer grandement à l'apparition de la fissuration transversale des chaussées au Québec.

CHAPITRE 6

ENDOMMAGEMENT PAR CYCLES THERMIQUES À BASSE TEMPÉRATURE

6.1 Introduction

La fissuration thermique est l'un des principaux modes de dégradation des chaussées dans les climats tempérés. Ce phénomène est d'autant plus préoccupant que l'on observe de plus en plus de fissures sur les chaussées, même lorsque la température critique basse du bitume n'est pas atteinte. Dans les chapitres précédents, il a été démontré que l'incorporation d'une quantité significative de granulats bitumineux récupérés (GBR) modifie le comportement rhéologique ainsi que les performances à basse température des enrobés recyclés. En particulier, l'ajout de GBR jusqu'à 40 % dans cette étude a conduit à une amélioration notable de la résistance en traction sur une large plage de températures basses. Cela suggère que, dans cette plage de température, les enrobés recyclés avec un taux maximal de 40 % de GBR devraient être plus résistants à la fissuration transversale.

La littérature souligne également que les cycles thermiques, c'est-à-dire les variations répétées de température, impactent les performances des enrobés et peuvent contribuer à la fissuration thermique. En effet, ces cycles peuvent entraîner une diminution de la résistance en traction des enrobés au fil du temps. Pour évaluer l'influence des cycles thermiques sur la réserve de résistance en traction du matériau, un essai d'endommagement thermique (ET) a été mis au point dans le cadre de ce projet.

L'objectif de l'étude présentée dans ce chapitre est de quantifier l'impact des cycles thermiques sur la rigidité des enrobés contenant des taux élevés de GBR. Cette analyse permettra d'approfondir la compréhension du comportement à long terme des enrobés recyclés soumis à des conditions climatiques extrêmes, et de mieux évaluer leur durabilité face à la fissuration thermique.

6.2 Résultats

Les enrobés utilisés pour cette étude sont R0, R30 et R40. Une description détaillée de leur composition, caractéristiques, comportement et performances sont présent dans les précédant chapitres.

L'essai d'endommagement thermique (ET) a été réalisé pour trois enrobés ESG10 : R0, R30, et R40 avec un essai pour chaque enrobé. Les éprouvettes utilisées dans cet essai sont identiques à celles utilisées pour les essais TSRST, garantissant ainsi la cohérence des résultats.

Les contraintes maximales et minimales enregistrées durant les cycles thermiques sont présentées à la Figure 6.1. Les résultats montrent une diminution progressive des contraintes avec les cycles thermiques, ce qui pourrait indiquer une perte de la capacité de résistance en tension du matériau aux sollicitations thermiques.

Les observations sur les contraintes maximales montrent une diminution rapide au début. Les contraintes maximales diminuent rapidement au cours des premiers cycles thermiques. Cette baisse rapide est typique du comportement des matériaux soumis à des sollicitations répétées, où les premiers cycles causent les plus grands dégâts en termes de dégradation structurelle.

Un ralentissement de la diminution à partir du cinquième cycle est observé, la diminution des contraintes maximales devient beaucoup plus lente. Ce comportement suggère que le matériau atteint une phase de stabilisation où les effets des cycles thermiques deviennent moins significatifs en termes de dégradation additionnelle.

Après ces premiers cycles, la courbe des contraintes maximales se stabilise, montrant que le matériau a atteint un certain niveau de résistance résiduelle qui ne se détériore plus de manière significative avec les cycles thermiques subséquents.

Le comportement des contraintes maximales observé dans cet essai est similaire à celui des courbes de diminution du module de rigidité des enrobés observées dans les essais classiques de fatigue. Dans ces essais, le module de rigidité diminue rapidement au début de l'essai, suivi d'une diminution plus lente jusqu'à atteindre une phase de quasi-stabilisation et la diminution devient plus rapide correspondant à l'apparition des macro-fissures causant la rupture (Baaj, 2002). En revanche, l'effet biaisant de réchauffement de l'éprouvette en début d'essai lié au mode de sollicitation dans l'essai classique de fatigue ne devrait pas exister dans cet essai d'endommagement thermique.

En résumé, l'essai d'endommagement thermique montre que bien que les enrobés R0, R30, et R40 subissent une diminution de leurs contraintes maximales sous l'effet des cycles thermiques, cette diminution tend à se stabiliser après quelques cycles, suggérant une capacité résiduelle du matériau à résister aux sollicitations thermiques répétées.

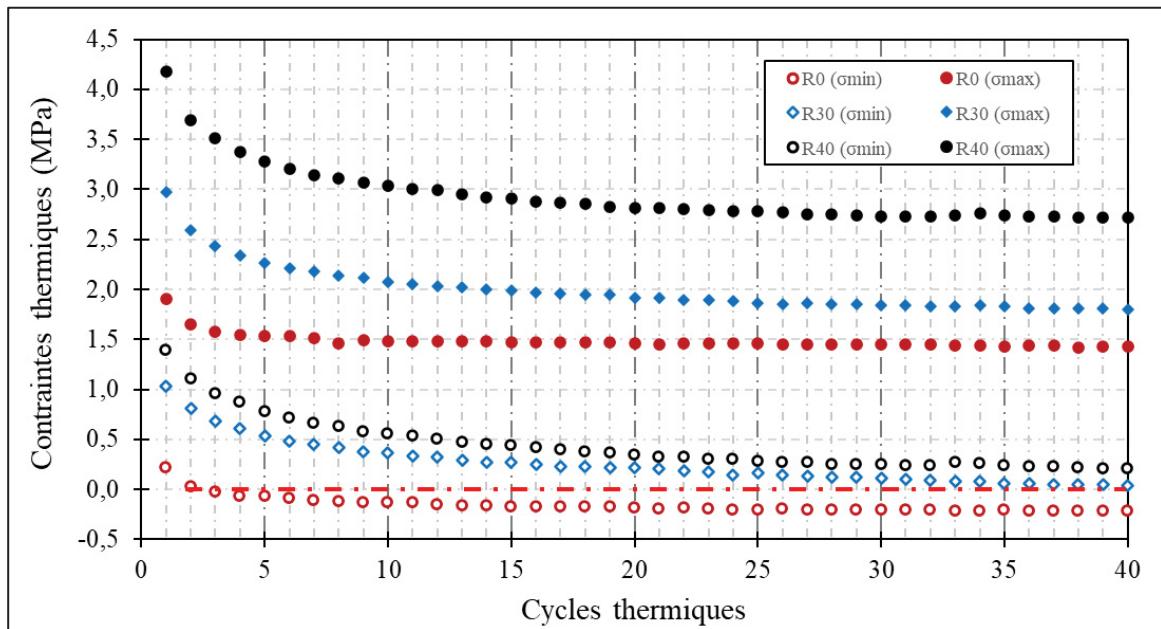


Figure 6.1 Évolution des contraintes thermiques induites maximales et minimales des enrobés ESG10 de l'étude en fonction des cycles thermiques

Le comportement des contraintes minimales observé au cours de l'essai d'endommagement thermique (ET) présente des similitudes avec celui des contraintes maximales, mais il revêt

moins d'importance pour l'analyse des résultats. En effet, pendant la phase de retour du cycle thermique, l'éprouvette subit un déchargement des contraintes induites plutôt qu'une sollicitation active.

L'évolution des contraintes minimales présente une similitude avec les contraintes maximales. Comme pour les contraintes maximales, les contraintes minimales diminuent progressivement au fil des cycles thermiques. Cependant, leur évolution est moins cruciale pour l'analyse puisqu'elles reflètent principalement la relaxation du matériau plutôt que sa résistance active sous contrainte.

À partir du troisième cycle, les contraintes minimales de l'enrobé R0 deviennent négatives, ce qui est une observation notable. Cette inversion indique que l'éprouvette d'enrobé commence à subir une légère compression au cours de la phase de retour, bien qu'aucune rupture physique ne soit observée. La présence de contraintes de compression suggère que le matériau a subi des dommages suffisants lors des cycles précédents, ce qui permet un relâchement plus rapide des contraintes de traction. L'apparition de compression dans des essais thermiques cycliques a été observée pour des conditions d'essai différentes par Olard (2003).

L'essai est conçu pour empêcher toute déformation longitudinale de l'éprouvette, que ce soit en contraction ou en dilatation. En conséquence, la presse hydraulique applique une force pour maintenir l'intégrité de l'éprouvette, ce qui peut provoquer une légère compression et, potentiellement, une réparation des microfissures apparues au cours des cycles thermiques. Cette "réparation" pourrait expliquer pourquoi l'éprouvette est capable de supporter de nouvelles contraintes de traction sans subir de rupture physique.

Contrairement à l'enrobé R0, les enrobés contenant des GBR (R30 et R40) ne présentent pas de contraintes minimales négatives. Les contraintes minimales de ces enrobés tendent à s'annuler progressivement avec les cycles thermiques, mais elles restent positives après 40 cycles. Cela suggère que les enrobés avec GBR ont une meilleure capacité à maintenir une

certaine résistance sans entrer dans un état de compression, même après de multiples cycles thermiques.

Le comportement des contraintes minimales, bien qu'il soit moins central pour l'analyse que celui des contraintes maximales, révèle des différences intéressantes entre les enrobés sans GBR et ceux contenant du GBR. L'observation de contraintes minimales négatives dans l'enrobé R0 après plusieurs cycles indique un possible endommagement suivi d'une légère réparation due à l'action de la presse hydraulique. En revanche, les enrobés avec GBR montrent une tendance à maintenir des contraintes minimales positives, ce qui pourrait indiquer une meilleure stabilité structurelle sous l'effet des cycles thermiques.

6.3 Approche d'analyse de l'essai d'endommagement thermique

6.3.1 Chemin de sollicitation de l'essai ET

Les résultats de l'essai d'endommagement thermique (ET) présentent des similitudes intéressantes avec ceux obtenus lors d'essais de fatigue classiques, bien que les conditions de sollicitation diffèrent notablement. Les essais de fatigue sont réalisés avec des sollicitations mécaniques cycliques imposées pour des milliers de cycles (Perraton et al., 2003). Une analyse approfondie de ces similarités et des critères de rupture appliqués à l'essai ET.

Dans les essais de fatigue classiques, les sollicitations peuvent être imposées sous forme de déformations ou de contraintes, conduisant à différents chemins de dégradation du matériau, comme illustré à la Figure 6-2. De même, dans l'essai ET, le matériau subit des sollicitations cycliques, mais ici, elles sont thermiques, avec des variations de température induisant des contraintes de traction.

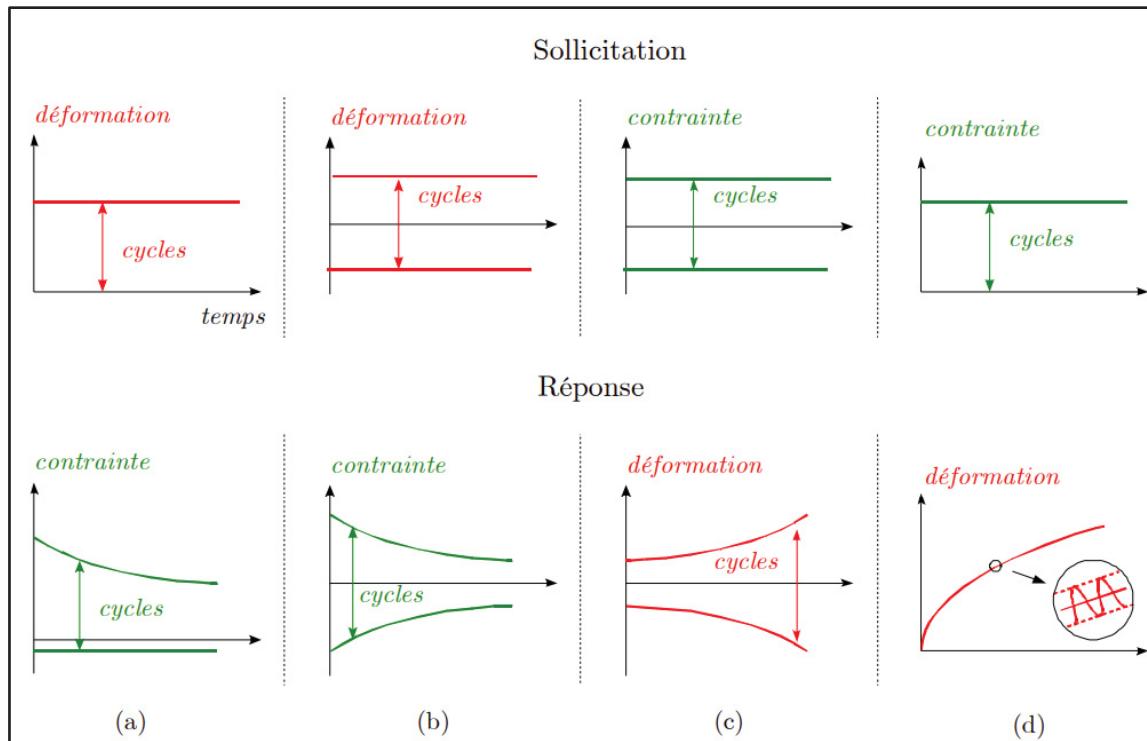


Figure 6.2 Chemins de sollicitation possibles et courbes enveloppes des cycles de réponse obtenus en déformation imposée et contrainte imposée

Tirée de Nguyen (2009, p. 60)

L'essai ET peut être comparé au cas (a) de la Figure 6.2, où un niveau de déformation est imposé et la contrainte est la réponse du matériau. Dans l'essai ET, la variation de température impose une déformation (retrait thermique), et les contraintes de traction observées sont la réponse du matériau à cette déformation. Le cycle thermique, composé de phases de refroidissement et de retour, se traduit par des cycles de sollicitation thermique qui peuvent être assimilés à des cycles de déformation dans un contexte de fatigue.

Dans un essai de fatigue, la durée de vie ou la résistance à la fatigue est établie sur la base de critères de rupture. Il en existe plusieurs, mais deux de ces critères, le critère classique et la quantification de l'endommagement sont pris en considération dans ce chapitre pour l'analyse de l'essai.

6.3.2 Critère classique de rupture

L'application du critère classique de rupture de fatigue à l'essai d'endommagement thermique (ET) exige une adaptation particulière, notamment en ce qui concerne la détermination du module de rigidité initial et l'analyse des cycles thermiques. Un développement détaillé sur ce point est présenté ici.

6.3.2.1 Critère Classique de Rupture en Fatigue

Selon le critère classique, la durée de vie en fatigue d'un matériau est définie par le nombre de cycles de sollicitation nécessaires pour réduire de 50 % le module de rigidité initial de l'éprouvette d'enrobé. Ce critère est couramment utilisé dans les essais de fatigue mécanique, bien qu'il ait été établi de manière arbitraire et présente certaines limitations. Toutefois, en raison de son usage répandu, il reste le plus documenté et sert de référence dans de nombreuses études.

6.3.2.2 Application du Critère Classique à l'Essai d'Endommagement Thermique (ET)

Pour appliquer ce critère à l'essai ET, il est nécessaire de déterminer le module initial de l'éprouvette. Le module de rigidité initial, essentiel pour ce critère, ne peut pas être directement déterminé à partir des cycles thermiques de l'essai ET. En effet, l'essai ET ne permet pas d'obtenir un module initial et comporte seulement 40 cycles thermiques, ce qui est insuffisant pour établir une mesure fiable du module initial en se basant uniquement sur les résultats de cet essai. Pour contourner cette limitation, le module initial est déterminé à partir des résultats de l'essai de module complexe discutés au CHAPITRE 4 à une température de -30°C et une fréquence de 0,01 Hz. En l'absence de données de module complexe, un essai spécifique de mesure du module de rigidité pourrait être effectué avant l'essai ET pour déterminer ce module initial.

6.3.2.3 Calcul du module de rigidité au cycle i

Une fois le module initial déterminé, le module de rigidité E_i au cycle thermique i est calculé en utilisant les contraintes maximales σ_{\max} et minimales σ_{\min} induites au cycle i. Les équations (6.1) et (6.2) sont utilisées pour cette estimation. Elles permettent de relier les contraintes observées lors des cycles thermiques à la rigidité du matériau.

$$E_i = \frac{\sigma_{\max,i} - \sigma_{\min,i}}{\varepsilon_{\text{ther}}} \quad (6.1)$$

Avec

$$\varepsilon_{\text{ther.}} = \tau \alpha_L * \Delta T \quad (6.2)$$

Où

$\varepsilon_{\text{ther}}$ est la déformation thermique ;

$\tau \alpha_L$ est le coefficient de contraction thermique de l'enrobé ; et

ΔT est l'écart de température entre la température maximale et minimale du cycle thermique.

Les valeurs des paramètres utilisés pour le calcul de la déformation thermique ainsi que les modules initiaux de chaque enrobé sont donnés au Tableau 6.1. Les coefficients de contraction thermique utilisés pour les enrobés sont ceux présentés au chapitre 5. Le module initial est établi à l'aide des paramètres 2S2P1D.

Tableau 6.1 Paramètres de calcul de $\varepsilon_{\text{ther.}}$ et modules de rigidité initiaux

Enrobés	ΔT cible ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT réel ($^{\circ}\text{C}$)	$\tau \alpha_L$ ($\mu\text{def}/^{\circ}\text{C}$)	$ E^* _{\text{initial} -30\ ^{\circ}\text{C et } 0,01\text{ Hz 2S2P1D}} (\text{MPa})$
R0	10	8,6	18,0	24 200
R30	10	7,2	23,0	24 400
R40	10	8,6	23,5	24 200

L'application du critère classique de rupture en fatigue à l'essai d'endommagement thermique nécessite des adaptations spécifiques, en particulier pour la détermination du module initial. Le recours aux résultats du module complexe à une température et fréquence spécifique fournit une base solide pour établir ce module initial. En mesurant les contraintes maximales et minimales au cours des cycles thermiques, il devient possible de suivre l'évolution du module de rigidité au fil des cycles, permettant ainsi d'évaluer la durée de vie du matériau selon le critère classique.

Cette approche renforce la robustesse de l'analyse de l'essai ET et permet une meilleure compréhension de la dégradation des enrobés bitumineux, notamment ceux contenant du GBR sous l'effet de cycles thermiques sévères.

6.3.3 Critère de la variable d'endommagement D

Dans l'analyse des essais de fatigue des enrobés, la variable d'endommagement D est une mesure cruciale pour caractériser l'état de fatigue de l'éprouvette d'essai. Cette variable permet de quantifier la progression des dégradations internes du matériau au fil du temps et des sollicitations (Perraton et al., 2003; Perraton, Di Benedetto, & Carter, 2011).

6.3.3.1 Variable d'endommagement D

La variable D est un indicateur qui prend des valeurs comprises entre 0 et 1 (Di Benedetto & Corté, 2005) :

- $D = 0$: Indique que le matériau est dans un état vierge, c'est-à-dire qu'il n'a subi aucune dégradation ou dommage.
- $0 < D < 1$: Le matériau a subi une certaine dégradation, mais n'est pas encore à la rupture.
- $D = 1$: Corresponds à l'état de rupture, où le matériau est complètement dégradé.

La variable D est utilisée pour suivre l'évolution de l'endommagement dans une éprouvette soumise à des sollicitations répétées, comme dans les essais de fatigue. Elle est calculée en comparant le module de rigidité de l'éprouvette au cours de l'essai à son module initial.

6.3.3.2 Calcul de la Variable D

Dans le contexte des essais d'endommagement thermique, la variable D est calculée à partir du module de rigidité correspondant à la contrainte maximale de chaque cycle thermique i et du module initial du matériau. Le module initial est ici représenté par la norme du module complexe mesuré à -30°C et à une fréquence de 0,01 Hz, qui sert de référence pour évaluer l'état initial de l'éprouvette à cette température. L'équation de calcul de la variable D est :

$$D = 1 - \frac{E_i}{|E_{init.}^*|} \quad (6.3)$$

Cette approche permet d'évaluer quantitativement l'état de dégradation du matériau en fonction du nombre de cycles thermiques subis, et donc de caractériser plus finement la dégradation des enrobés bitumineux, en particulier ceux contenant du GBR. L'utilisation de la variable D fournit ainsi un outil précieux pour l'analyse des performances des enrobés dans des conditions de sollicitation thermique répétée.

6.4 Influence de l'ajout du GBR sur l'évolution de la rigidité à l'endommagement thermique

6.4.1 Évolution du module de rigidité E

L'évolution de la rigidité des éprouvettes des trois mélanges au cours de l'essai d'endommagement thermique (ET) est présentée à la Figure 6.3. Si le nombre de cycles thermiques avait été plus important jusqu'à la rupture physique des éprouvettes d'essai, on aurait pu observer une courbe de diminution du module de rigidité similaire à celle d'un essai de fatigue classique, avec les trois phases bien identifiées.

Pour évaluer l'impact des cycles thermiques sur la rigidité des enrobés, l'écart entre les modules initial et au cycle i a été calculé pour i égal à 2, 10, 20, 30, et 40. Les résultats de ces écarts sont présentés dans le Tableau 6.2. Les principales observations sont les suivantes :

- La diminution du module de rigidité est particulièrement marquée lors des 10 premiers cycles thermiques.
- Dès le deuxième cycle, le module de rigidité de l'enrobé de référence (R0) a diminué de 56%. Cet enrobé perd donc presque la moitié de sa rigidité après un seul cycle thermique.
- En revanche, les enrobés contenant du GBR (R30 et R40) montrent une meilleure résistance à la sollicitation thermique, avec une diminution de module de 44% pour le R30 et de 31 % pour le R40 au premier cycle.

Cette observation est significative, car l'hypothèse initiale était que l'ajout de GBR devrait accélérer la diminution du module de l'enrobé ESG10 sous les cycles thermiques à basse température. Cependant, les résultats montrent que les enrobés contenant du GBR résistent mieux aux cycles thermiques que l'enrobé de référence, ce qui constitue un fait marquant de cette étude.

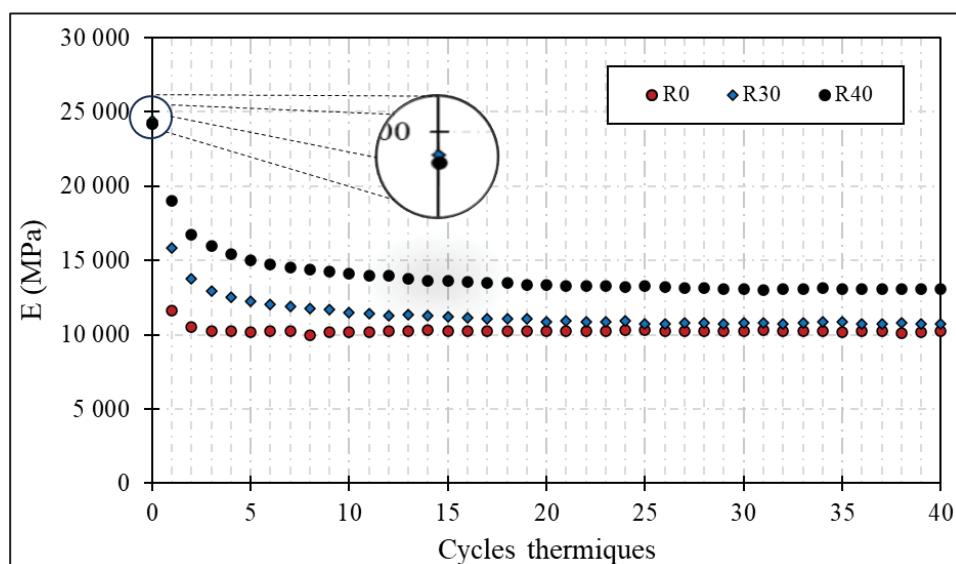


Figure 6.3 Évolution de la rigidité des enrobés ESG10 de l'étude en fonction des cycles thermiques

6.4.2 Évolution de la variable D

La variable d'endommagement D, qui permet de suivre la progression des dégradations de l'éprouvette au cours des cycles thermiques, a été déterminée, et son évolution pour chaque enrobé est illustrée à la Figure 6.4. Les principales conclusions sont les suivantes :

- L'enrobé de référence R0 subit plus de dommages au cours des cycles thermiques que les enrobés contenant du GBR.
- La majorité des dégradations du mélange de référence surviennent dès le deuxième cycle, avec une valeur de D de 0,56.
- Les dégradations continuent jusqu'à la fin de l'essai, mais de manière beaucoup plus modérée, le cumul des dégradations du deuxième au quarantième cycle thermique n'étant que de 0,13.
- Malgré le niveau élevé de dommages observé dans l'enrobé R0, aucune rupture physique n'a été observée après les 40 cycles thermiques.

Un autre point marquant de cette étude est la possible contribution des contraintes de compression observées lors de la phase de retour des cycles thermiques. Ces contraintes pourraient, dans une certaine mesure, contribuer à la réparation partielle des microfissures dans l'éprouvette, ce qui pourrait expliquer la résistance à la rupture continue de l'enrobé R0.

Cependant, une question demeure concernant les enrobés utilisés dans l'étude présentée dans ce chapitre : quel nombre de cycles thermiques aurait permis la rupture physique des éprouvettes lors de l'essai ET ? Cette interrogation met en évidence la nécessité de poursuivre les recherches afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à cet essai d'endommagement.

Tableau 6.2 Écart entre le module initial et le module à N cycle

Enrobés	Einit. (MPa)	Einit. – E ₂ (MPa)	Einit. – E ₁₀ (MPa)	Einit. – E ₂₀ (MPa)	Einit. – E ₃₀ (MPa)	Einit. – E ₄₀ (MPa)	Vi (%)
R0	24 200	13 639	14 605	14 779	14 857	14 952	3,6
R30	24 400	10 656	11 850	12 822	13 252	13 527	3,6
R40	24 200	7 434	9 177	10 272	10 684	10 757	2,6

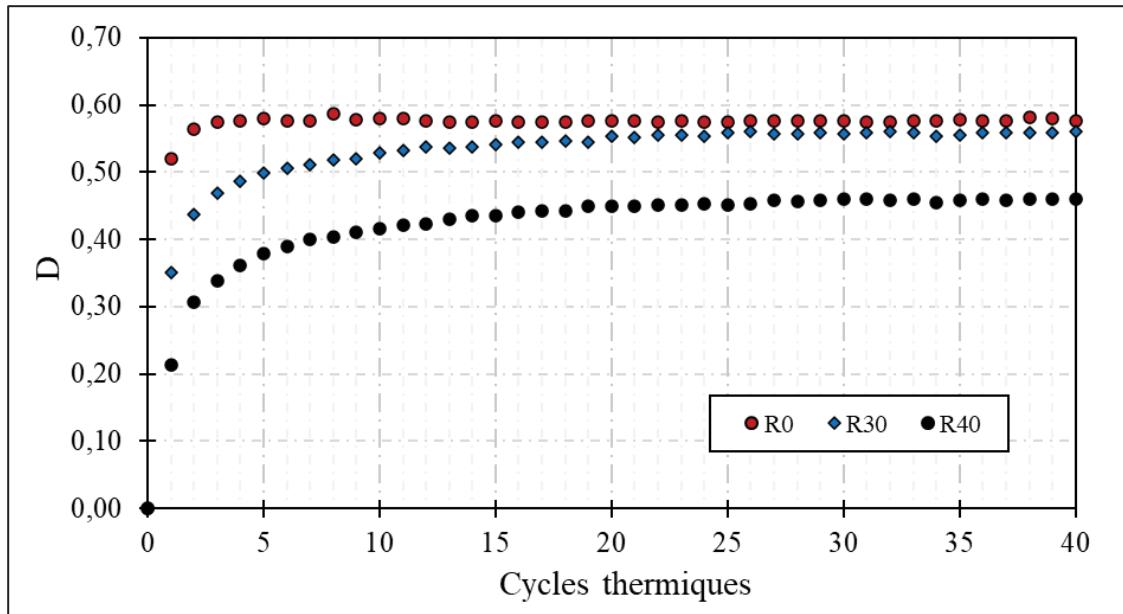


Figure 6.4 Évolution de la variable D des enrobés ESG10 de l'étude en fonction des cycles thermiques

L'ajout du GBR, tel qu'observé au chapitre 6, agit comme un renfort dans l'enrobé ESG10, améliorant ainsi sa résistance à l'endommagement thermique. Les résultats de cette étude montrent que l'augmentation du taux de GBR se traduit par une amélioration de la résistance à l'endommagement thermique. Cette découverte est particulièrement significative pour l'optimisation des formulations d'enrobés dans les régions froides.

La conclusion principale qui émerge de cette étude est que tant que la température de rupture mesurée par l'essai TSRST (Test de Retrait Thermique Simulé) n'est pas atteinte, les enrobés recyclés contenant du GBR continuent de présenter de très bonnes performances à basse température. Ces résultats suggèrent que l'utilisation accrue de GBR dans les enrobés pourrait être une solution viable pour améliorer la durabilité des chaussées en climat froid, tout en répondant aux exigences de performance à basse température.

6.5 Conclusion

Dans cette étude, les enrobés ESG10 ont été soumis à des cycles thermiques pour évaluer l'influence de ces cycles sur leur rigidité, en particulier pour ceux contenant des taux élevés de GBR. Trois enrobés ESG10, avec des taux de GBR de 0%, 30%, et 40%, ont été testés à l'aide de l'essai d'endommagement thermique (ET).

Les résultats montrent un comportement similaire pour les trois mélanges, mais avec des différences notables qui indiquent le bon fonctionnement de l'essai ET, bien que des ajustements soient nécessaires. Notamment, l'apparition de contraintes de compression dans l'un des mélanges indique que des améliorations sont nécessaires pour affiner le protocole d'essai.

Une baisse rapide des contraintes, conduisant à une perte significative du module de rigidité, a été observée au cours des deux premiers cycles thermiques, suivie d'une stabilisation de la rigidité avec la poursuite des cycles. Aucune des éprouvettes n'a subi de rupture physique, ce qui suggère que l'ajout de GBR améliore la résistance des enrobés ESG10 à l'endommagement thermique. L'utilisation d'un bitume PG 52S-34, combinée à l'ajout de GBR, rend le ESG10 plus performant pour résister à des cycles thermiques sévères, où les températures descendent jusqu'à -30 °C. L'enrobé qui présente la meilleure performance face à l'endommagement par cycle thermique est le mélange R40.

L'objectif final de la mise au point de cet essai est qu'il serve à tester des éprouvettes avant leur utilisation pour l'essai de traction-directe (TD), afin d'évaluer l'influence des cycles thermiques sur la résistance en traction des enrobés. Pour finaliser cet essai, d'autres travaux seront nécessaires, incluant des ajustements des éprouvettes pour qu'elles soient adaptées tant pour l'essai ET que pour l'essai TD.

CONCLUSION

L'usage du GBR dans les proportions normalisées est une pratique courante au Québec. Mais l'industrie développe un intérêt de plus en plus grandissant pour l'utilisation des proportions plus importantes. Le but étant de réduire son empreinte environnementale et de contribuer au développement durable des chaussées. L'ajout du GBR dans les enrobés jusqu'à 20% tel que le recommande le MTMD, n'exerce pas une influence significative sur les performances des enrobés, spécifiquement celles à basse température. Dans les régions froides comme le Québec, la prudence observée de la part du MTMD quant à l'utilisation des forts taux de GBR réside dans la crainte que la fissuration transversale apparaisse de façon prématuée dans les chaussées à la suite des hivers. Car il n'y a pas encore une maîtrise complète du comportement et des performances de ces matériaux. Surtout que la méthode de formulation du MTMD ne tient pas compte des performances : les performances à basse température des enrobés du MTMD sont assurées par la méthode de sélection du bitume d'apport basé sur le critère de zone climatique. Pour permettre l'utilisation des forts taux de GBR, il faut accroître la compréhension de leur comportement, mieux cerner leurs performances et s'assurer que la méthode de formulation permet de concevoir des enrobés à fort taux de GBR. Le projet d'optimisation de la formulation d'enrobés à haute teneur en GBR pour régions froides qui a donné lieu à cette thèse est bâti dans ce sens. L'objectif de la thèse était de mesurer les propriétés rhéologiques et les propriétés mécaniques à basse température d'un enrobé de surface incorporant de forts taux de GBR pour enrichir les connaissances sur le comportement et les performances des enrobés à fort taux de recyclage dans les régions froides. Les travaux qui en ont découlé de cet objectif ont conduit aux conclusions suivantes :

Pour produire en laboratoire un enrobé à fort taux de GBR ($> 20\%$) de qualité similaire à celle d'un enrobé standard du MTMD, la durée totale de malaxage (granulats et bitume d'apport) par cette étude est de 220 s.

Au retrait thermique et au niveau des propriétés thermiques :

- L'ajout du GBR dans l'enrobé ESG10 jusqu'à 30% n'exerce pas d'influence sur la température de rupture au TSRST.
- La sélection du bitume PG 52S-34 pour une zone de température basse critique de -28 °C (zone 1), permet d'incorporer selon les résultats au TSRST jusqu'à 60% de GBR dans l'enrobé ESG10.
- L'ajout du GBR entraîne une réduction de la capacité de relaxation et une augmentation de la contrainte thermique induite dans l'enrobé recyclé.
- L'ajout du GBR augmente la capacité de déformation thermique de l'enrobé ESG10 étudié. Spécifiquement, il entraîne une augmentation de façon linéaire du coefficient de contraction thermique de l'enrobé de recyclé. Le coefficient de dilatation thermique augmente aussi avec l'augmentation du taux de GBR jusqu'à 40% et se stabilise pour les taux supérieurs à 40%.

Au niveau du module complexe :

- L'ajout du GBR entraîne une augmentation du module de rigidité de l'enrobé.
- Trois zones de comportement rhéologique, délimitées par des plages de température, ont été établies à l'aide de cette étude. Dans les zones 1 et 3 de la Figure 4.10 l'ajout du GBR n'exerce pas une influence significative sur le comportement rhéologique de l'enrobé.
- Dans la zone 2, l'ajout a conduit à une diminution de la composante imaginaire du module complexe augmentant de fait le comportement élastique de l'enrobé recyclé. Ce qui explique la réduction de la capacité de relaxation observée au retrait thermique.
- L'existence d'une relation entre la température de rupture au TSRST et le ratio E2/E1 a été montré dans cette étude.

Au niveau de la résistance en traction et de la résistance à l'endommagement thermique :

- Les essais de traction directe (TD) et d'endommagement thermique (ET) permettent de faire la différence entre chaque enrobé utilisé dans cette étude. Ces deux essais ont très bien fonctionné et peuvent être utilisés pour la caractérisation des enrobés. Toutefois, l'essai ET comme réalisé dans cette étude a une durée trop longue. Une réduction de la durée de cet essai en diminuant le nombre de cycles thermique sera nécessaire pour permettre une

utilisation courante de l'essai. L'essai TD présente une avenue prometteuse pour expliquer le phénomène d'apparition prématûre de la fissuration transversale. Pour qu'il en soit ainsi, il faudra combiner l'essai TD avec l'essai ET.

- L'ajout du GBR entraîne une augmentation de la résistance en traction de l'enrobé recyclé.
- La réserve de résistance en traction (RRT) augmente dans les températures moins basses et basses avec l'ajout du GBR. Mais dans les très basses températures, l'ajout du GBR entraîne une baisse de la réserve de résistance en traction.
- L'effet du trafic sur la RRT n'est ressenti que dans les très basses températures entraînant une légère augmentation de la température de rupture à basse température.
- L'ajout du GBR jusqu'à 40% a conduit à une amélioration de la résistance à l'endommagement thermique de l'enrobé ESG10.

En somme, la méthode utilisée pour la formulation des enrobés de ce projet permet de concevoir des enrobés contenant jusqu'à 40% de GBR dont le comportement est similaire à celui d'un enrobé standard avec des performances dans les basses températures (jusqu'à -30 °C) proches au retrait thermique empêché, mais meilleures en termes de résistance en traction et à l'endommagement sous cycles thermiques. Pour une température basse critique cible de -28 °C, le taux de GBR peut atteindre 60% dans le ESG10 en considérant uniquement la performance au TSRST. Toutefois, pour être en mesure d'incorporer ce taux important de GBR et respecter les exigences granulométriques dans cette étude, le GBR a été séparé en deux classes granulaires. Cette étude nous a permis de faire le constat que la limite de 20% pour les couches de basse du MTMD peut être largement dépassée dans les couches de surface qui sont-elles limitées à un taux de 10% de GBR en suivant la méthode de formulation utilisée dans le projet.

Le taux de 30% de GBR devrait être la limite permise dans les couches de surface au Québec. L'essai TSRST devrait faire partir des exigences du MTMD pour les forts taux de GBR, en complément de l'exigence d'un seuil minimal pour le V_{be}. L'utilisation d'un ratio de bitume recyclé (RBR) comme exigence pourrait aider à garantir la durabilité à basse température des enrobés à fort taux de GBR.

La méthode de caractérisation utilisée dans cette thèse est assez robuste pour garantir de la bonne performance à basse température de l'enrobé ESG10 à fort taux de GBR. Toutefois, des planches expérimentales et d'autres travaux nécessitant la variation du type de bitume d'apport et potentiellement de la source de GBR ainsi que du type d'enrobé seront nécessaires pour confirmer les tendances observées dans les travaux de cette thèse.

RECOMMANDATIONS

Les travaux de cette thèse ont permis d'émettre un nombre important d'hypothèses sur le comportement, les performances, le type de bitume et sur les méthodes pouvant permettre la validation de ces hypothèses.

La première recommandation qui découle de cette étude concerne l'absence d'un ou deux mélange(s) de référence avec des bitumes usuels de la zone climatique de provenance du GBR. Il faudrait dans les futurs travaux tenir compte de cet aspect.

L'absence d'essai d'orniérage, sur la base qu'il est admis et reconnu que l'ajout du GBR améliore cette performance, n'a pas permis la vérification et la validation de l'hypothèse d'existence d'une relation entre la résistance à l'orniérage et le ratio E2/E1 des enrobés recyclés. Cette étude doit être complétée avec la réalisation des essais d'orniérage pour l'ensemble des enrobés utilisés dans cette thèse. Il en est de même pour les essais de fatigue qui doivent être réalisés pour confirmer les gains de performances mécaniques observés à l'aide de la simulation du comportement dans la chaussée réalisée dans cette étude.

La réalisation de l'essai TD dans les basses températures a révélé plusieurs points sur lesquels il faut porter une attention pour le futur. Pour les températures extrêmement froides, le niveau de contrainte obtenu a été très élevé dans certains cas. Dans ces conditions, deux principaux problèmes ont été observés. Premièrement, lorsque la rupture survenait au centre de l'éprouvette (entre les extensomètres), la presse MTS réagissait à cette rupture soudaine en appliquant immédiatement des contraintes de compression à sa capacité maximale. Ce qui pourrait être dommageable pour la cellule de pression. Bien qu'une limite de contrainte de compression ait été par la suite ajoutée au programme de consigne de l'essai, la contrainte de compression maximale est apparue dans certains cas avant le retour à la limite de la consigne. Pour éviter les ruptures brusques liées au niveau de contraintes trop élevées en cours d'essai pour ces températures, les essais TD pourraient être réalisés avec des éprouvettes de diamètre inférieur à 75 mm. Nous recommandons pour les enrobés de surface, tel qu'un ESG10, des

éprouvettes de diamètre de 60 mm ou dans le cas du LCMB, que les éprouvettes aient le même diamètre que le diamètre des éprouvettes TSRST. Cela permettra de réduire le niveau de force à la rupture. Un essai test à -35 °C a été réalisé avec une éprouvette de diamètre avoisinant 60 mm pour s'assurer de la faisabilité d'utilisation des éprouvettes de ce diamètre comme le montrent les photos de la Figure ci-dessous. Les dimensions exactes de l'éprouvette étaient de 57 mm de diamètre 120 mm de hauteur.

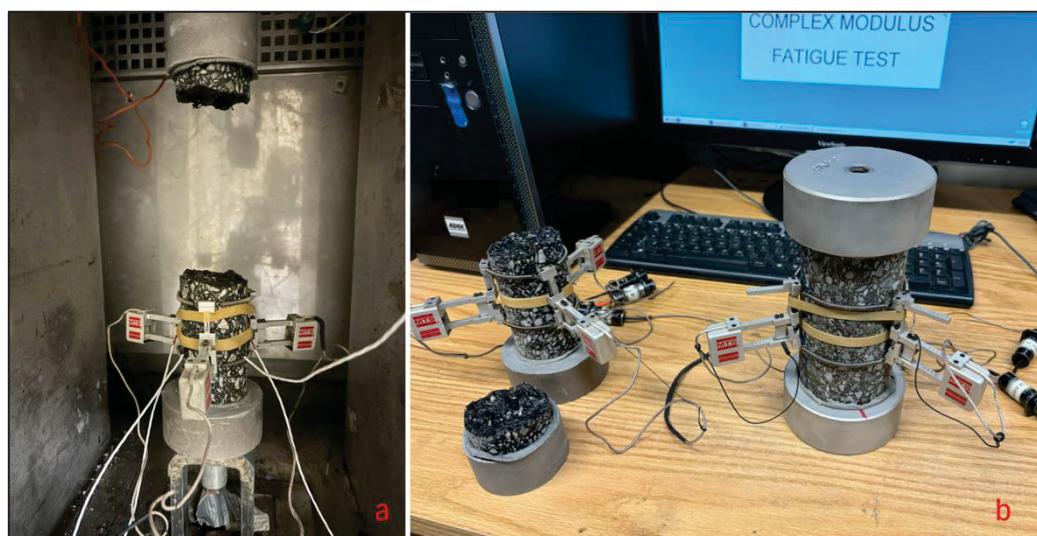


Figure 8.1 Photos a) essai TD avec éprouvette de diamètre 57 mm b) éprouvettes 57 et 75 mm pour essai TD

Deuxièmement, nous avons observé dans quelques rares cas la rupture se produire dans la colle ayant servi pour le collage des casques sur les éprouvettes d'essai. Pour éviter des pertes inutiles d'éprouvette d'essai, il faut s'assurer de bien nettoyer la surface des casques et de bien mélanger les composantes A et B de la colle d'époxy.



Figure 8.2 Photos des éprouvettes après l'essai TD

Un autre problème lié aux casques métalliques collés aux extrémités des éprouvettes est survenu au cours des essais TD pour les températures inférieures et égales à -20 °C et a entraîné la perte de quatre éprouvettes. Lorsque le niveau de contrainte excédait 3 MPa, on observait un arrachement des filets en acier des vis qui permettent de fixer l'éprouvette dans l'enceinte de la presse MTS.

En ce qui a trait aux résultats des essais TD, nous avons observé une variabilité importante des résultats de résistance en traction dans certains cas pour une même température basse d'essais. Cette variabilité est liée aux vides d'air des éprouvettes d'essai. Il faudrait s'assurer dans les futures études d'évaluer l'influence des vides d'air sur la résistance en traction à basse température. Pour cela, je recommande que l'étude se fasse à la température -20 °C. Nous recommandons également, pour un meilleur contrôle des vides, que les éprouvettes soient prélevées de briquettes compactées à la PCG plutôt qu'au compacteur de plaque LCPC.

Les travaux de cette thèse ont été centrés sur le comportement et les performances à basse température. Dans les basses températures, le comportement et les performances des enrobés

sont majoritairement contrôlés par le bitume ou le liant bitumineux. L'ajout du GBR dans l'enrobé ESG10 met en action deux bitumes de différentes caractéristiques. L'interaction entre le bitume d'apport et le bitume du GBR doit faire l'objet d'une étude afin de bien cerner la contribution de chaque bitume dans le comportement à basse température et dans la résistance en traction. Nous recommandons pour les études à venir que ces deux aspects soient évalués directement sur des bitumes extraits des enrobés produits en laboratoire ou prélevés sur site avec les différents taux de GBR utilisés dans ce projet.

Finalement, l'ajout du GBR à augmenter la température de rupture au retrait thermique, mais à améliorer la résistance en traction permettant à l'enrobé ESG10 d'avoir une capacité accrue pour supporter plus de trafic avant sa température de rupture au TSRST. Également, on a pu observer qu'à -30 °C l'ajout du GBR permettait à l'enrobé ESG10 d'améliorer sa résistance aux cycles thermiques. Dans les régions froides, l'apparition des fissures transversales est observée à des températures plus chaudes que la température basse critique de conception. Selon nos hypothèses, le phénomène responsable de la fissuration transversale est lié aux contraintes de traction qui sont induites dans la chaussée sous les effets combinés de baisse de la température et du trafic. Cette étude a permis à travers l'évaluation de la RRT de voir que la prise en compte de ces deux éléments ne permettait pas d'expliquer l'apparition prémature de la fissuration transversale, mais que les cycles thermiques pouvaient baisser la capacité de résistance en traction. Il faudrait donc évaluer l'influence des cycles thermiques sur la résistance en traction des enrobés utilisés dans cette thèse. Pour ce faire, je recommande un essai combinant les cycles thermiques et la traction directe en limitant le nombre de cycles thermique à une dizaine.

ANNEXE I

FEUILLES DE FORMULE DES ENROBÉS DE L'ÉTUDE

Tableau-A I-1 Feuille de formule R0

ESG-10 R0															
Granulats utilisés				Granulométrie								Formule et exigences			
Calibre / Classe granulaire	Identifiant (ID) - Avent (A), Béton (B), Ciment (C), Ciment avec floculant (CL), Recycle (R), Pierre (P), Soufflé (S), Sable manufacture (M), Filler (F)	Tamis en mm (% passant)				Tamis en µm (% passant)				Proportion (%)	Densité des granulats	Absorption en eau des granulats (%)			
		28	20	14	10	5	2,5	1,25	630	315	160	80			
5 - 10 mm P	Sables L-G St-Hippolyte	100	100	93	14	3	2	2	2	1,2	44,0	44,0			
2,5 - 5 mm P	Sables L-G St-Hippolyte	100	100	100	100	89	20	7	3	2	12,0	12,0			
0,25mm SM	Sables L-G St-Hippolyte	100	100	100	100	100	86	59	40	25	12,0	2,735			
0 - 5 mm C	Sables L-G St-Hippolyte	100	100	100	100	96	66	48	34	26	18	18,5			
GBR 0-10 Filler F	CMM, Montréal Filler de fracturation usine	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8,6			
Granulométrie du combiné		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-			
		100	100	97	60	37	26	18	13	9	5,7	1,5			
										100	100	2,733			
										2,731	2,730	0,39			
Formule												PCG			
Formule	28	20	14	10	5,00	2,5	1,25	630	315	160	80	Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide (%)	VAM (%)
Specifications	100	100	97	60	37	26	18	13	9	5,7	5,23	5,7	17,2	70,9	2,387
Max	-	-	-	100	65	# 46,1	< 36,7	< 26,8	# 18,1	-	10				Densité Maximale
Min	-	-	-	100	92	52	# 46,1	> 30,7	> 22,8	# 18,1	-	4			Ressusage
Caractéristiques de la formule												Spéc.			
Granulat recyclé												Spéc.			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34	%				-				PCG				Spéc.	
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	58S-28	% de l'additif				5,06				N _g _{roches} Vides (%)				Spéc.	
Densité du bitume d'ajout	1,024	% de bitume de l'additif				100				N _{ini} z 13,1				Spéc.	
Densité effective des granulats, D _{ge}	2,755	% mobilisable				100				N _{design} z 11,0				Spéc.	
Pourcentage de bitume effectif, P _{fe} (%)	4,92	% de bitume dans l'EB				0,00				N _{max} z 4,0 à 7,0				Spéc.	
Volume de bitume effectif, VBE, à 0% de vide (%)	12,19	Entente Dmn				2,523				Ressusage à N _{max} Non				Spéc.	
Total granulométrique (%)	466	Tenue à l'eau				-				Essai sur presse MTS				Spéc.	
Rapport du bitumétoital granul.	1,12	Stabilité retenue				A faire				T _{rupture} (TSR1) -34,7				Spéc.	
Film de bitume effectif, FBE (µm)	8,92	> 70				E' (100c, 10Hz) 4009				Fatigue (ε _f)				Spéc.	
Surface spécifique, SS (m ² /kg)	5,70														



BAUVAL

Tableau-A I-2 Feuille de formule R20

Formule de mélange Enrobés bitumineux

Formule de mélange Enrobés bitumineux											
Client : BAUVAL CMM Projet : LA22243700		Type de mélange : ESG-10 No de formule : FG1-ESG10-D-58S28				Formulation : PG 64H-28 / 1,026				Densité du bitume / Production : PG 58S-28	
Fournisseur : Bauval CMM Usine : 085 - Ville St-Laurent (085)		Code produit : GS1D010 Date de formulation : 2023-03-22 Code de composition :				Extraction :				Facteur de justesse : Ignition :	
Classe granulaire	Type	Provenance	28 mm	20 mm	14 mm	10 mm	5 mm	2,5 mm	0,630 mm	0,315 mm	0,080 mm
5-10 mm	P	Sables LG , St-Hippolyte	100	100	90	10,0	4	3	2	2	1,3
0-5 mm Lavé	CL	Sables LG , St-Hippolyte	100	100	100	95,0	59	37	24	14	7
0-5 mm	CR	Sables LG , St-Hippolyte	100	100	100	93,0	64	45	34	25	17
Filler	F	Bauval CMM, Ville St-Laurent (085)	100	100	100	100,0	100	100	100	100	10,0
GRR	R	Bauval CMM, Ville St-Laurent (085)	100	100	100	77,8	59	45	36	27	18
Combiné		100	100	97	63,3	42	29	21	15	10	5,8
Extract. non-lavée LC 26-350		100	100	97	63,3	42	29	21	15	10	5,5
Référence lavée LC 26-006		100	100	97	63,3	42	29	21	15	10	5,8
Fuseau du mélange				100	92	52,0					4,0
Fuseau de restriction suggéré du mélange				100	65,0						10,0
% de bitume de la formule :		5,17	FBE :	8,35	PBA :	0,21	Giriations : 10 % vide : 13,1 %				Pierre Lyonnais
% de bitume vierge :		4,37	SST :	6,14	% VBE :	12,2	Giriations : 10 % vide : 13,1 %				Directeur technique – Enrobés
% de bitume dans le recyclé :		4,02	% VAM :		DGF :	2,732	Giriations : 10 % vide : 13,1 %				Maxim Cardinal
Total granulométrique :		483	% VCB :		PBI estimé :	5,19	Giriations : 10 % vide : 13,1 %				Chargé de projets – Laboratoire
Densité brute :			Stab. :		Densité maximale au PBI estimé :	2,515	Giriations : 10 % vide : 13,1 %				
Densité maximale :		2,516	Déformation :	4,97	Vérifié par :		Giriations : 10 % vide : 13,1 %				Dominic Ste-Marie, Tech. sr
% de vide :		81,9	Bitume eff. :		Date :		Giriations : 10 % vide : 13,1 %				2023-03-24
Tenue à l'eau :			Comp. Ant. :		Remarques		Giriations : 10 % vide : 13,1 %				

Tableau-A I-3 Feuille de formule R30

ESG-10 R30												
Granulats utilisés						Granulométrie						
Calibre / Classe granulaire	(ID)	Tamis en mm (% passant)				Tamis en µm (% passant)	Proportion (%)				Absorption en eau des granulats (%)	
		Provenance	28	20	14	10	5	2,5	1,25	630	315	
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	93	14	3	2	2	1,2	39,0	39,0
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	89	20	7	3	2	0,9	24,0
0 - 5 mm	C	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	96	66	48	34	26	18	11,7
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8,6
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	2,0	2,700
Granulométrie du combiné		100	100	97	58	30	23	18	13	8	5,8	100
Formule et exigences												
Formule		Tamis en mm (% passant)				Tamis en µm (% passant)	Proportion (%)				Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5,00	2,5	1,25	630	315	160	
Spécifications	Max	100	100	97	58	30	23	18	13	8	5,8	5,62
	Min	-	-	100	100	65	≠ 46,1	< 36,7	< 26,8	≠ 18,1	-	4,10
Caractéristiques de la formule												
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)		52S-34				% de l'additif	30,0				Spéc.	
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)		52S-34					5,06					
Densité du bitume d'ajout		1,024				% mobilisable		100				
Densité effective des granulats, Dge		2,765				% de bitume dans l'EB		1,52				
Pourcentage de bitume effectif, Pbe (%)		5,12				Ratio bitume recyclé (RBR) (%)		27				
Volume de bitume effectif, VBE, à 0% de vide (%)		12,61				Entente Dm		2,523				
Total granulométrique (%)		453				Report du bitume/total granul.		1,24				
Film de bitume effectif, FBE (µm)		9,62				Tenue à l'eau		Spéc.				
Surface spécifique, SS (m ² /kg)		5,52				Stabilité retenue		A faire				
Fatigue (ε _a)		≥ 70				Essai sur presse MTS		Spéc.				
T _{rupture} (TSR)		-3,4				T _{rupture} (100C, 10Hz)		7440				
Fatigue (ε _a)		-				Résultage		-				

Tableau-A I-4 Feuille de formule R40

ESG-10 R40												
Granulats utilisés						Granulométrie						
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absorbé (AB), Bordure (BPF), Cribture (C), Cribture laveur (CL), Recyclé (GR), Pierre (P), Scorie (SC), sable manufacturé (SM), Filier (F).	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					
		28	20	14	10	5	2,5	1,25	630	315	80	
5 - 10 mm	P Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	93	14	3	2	2	1,2	38,0	35,0	
2,5 - 5 mm	P Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	89	20	7	3	2	1	0,9	
0 - 5 mm	C Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	96	66	48	34	26	18	11,7	
GBR 0-10	GBR CMM, Montréal	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8,6	
Filler	F Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2,0	
Granulométrie du combiné		100	100	97	57	33	25	20	14	9	6,1	
Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume absorbé (%)	
	28	20	14	10	5,00	2,5	1,25	630	315	160		
	100	100	97	57		25	20	14	9	6,1	5,62	
Spécifications	Max	-	-	100	65	≠ 46,1	< 36,7	≠ 26,8	# 18,1	-	10	
	Min	-	-	100	92	52	≠ 46,1	> 30,7	> 22,8	# 18,1	-	4
Caractéristiques de la formule												
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34	40	% de l'additif	% de bitume de l'additif	5,06	Vides	N _{iterations}	10	14,3	≥ 11,0	= < 10	
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34										= < 15	
Densité du bitume d'ajout	1,024		% mobilisable	100		Nini						
Densité effective des granulats, Dge	2,775		% de bitume dans l'EB	2,02		N design	80	5,5	4,0 à 7,0	10 000 cycles		
Pourcentage de bitume effectif, PBe (%)	4,97		Ratio bitume recyclé (RBR) (%)	36		N max	200	2,7	≥ 2,0	30 000 cycles		
Volume de bitume effectif, VBE, à 0% de vide (%)	12,29		Entente Dinn	2,523		Ressuage à N max	Non			Ressuage		
Total granulométrique (%)	461		PCG									
Rapport du bitume/total granul.	1,22		PCG	N _{iterations}	Vides	Spéc.						
Film de bitume effectif, FBE (µm)	8,78											
Surface spécifique, SS (m ² /kg)	5,87		Tenu à l'eau	Spéc.								
			Stabilité retenue	A faire	≥ 70							
			Faigue (ε _f)									
Essai sur presse MTS												
T _{rupture} (TSRT)			-31,5									
E [*] (10°C, 10Hz)			8430									
			Ressuage									



Tableau-A I-5 Feuille de formule R60

ESG-10 R60																																										
Granulats utilisés						Granulométrie																																				
Calibre / Classe granulaire (ID)	Identification (ID) : Absorbé (AB), Bardeau (BP), Cribture (C), Cribture avec (CL), Recyclé (GR), Pierre (P), Scorie (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).					Provenance	Tamis en mm (% passant)			Tamis en µm (% passant)			Proportion (%)	Densité des granulats Brute	Apparente	Absorption en eau des granulats (%)																										
	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	93		28	20	14	10	5	2,5																														
5 - 10 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	89	20	7	3	2	2	630	315	160	80	Ciblee	Réelle	Brute	Apparente																							
2,5 - 5 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	100	89	20	7	3	2	1	0,9	20,0	20,0	2,741	2,758	2,758	0,23																							
0 - 5 mm	C	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	96	66	48	34	26	18	11,7	-	-	-	2,721	2,741	0,27																								
GBR 0-5mm	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	100	83	68	52	35	19	11	15,0	15,0	15,0	2,746	2,867	1,54																								
GBR 5-10mm	GBR	CMM, Montréal	100	100	96	44	31	26	21	15	8	4	45,0	45,0	45,0	2,751	2,863	1,42																								
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2,0	2,0	2,0	2,700	2,700	0																								
Granulométrie du combiné			100	100	97	57	33	26	20	15	9	5,9	100	100	100	2,743	2,819	0,99																								
Formule et exigences																																										
Formule		Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)			Bitume d'ajout (%)			Bitume TOTAL (%)		Vide (%)		VAM (%)		VCB (%)		Densité Brute		Densité Maximale		Bitume absorbé (%)																	
28		100	100	97	57	33	26	20	15	9	5,9	5,62	2,86	4,2	16,4	77,7	2,429	2,535	0,49																							
100		-	-	100	100	65	≠ 46,1	< 36,7	> 26,8	≠ 18,1	-	10																														
Max		-	-	100	92	52	≠ 46,1	> 30,7	> 22,8	≠ 18,1	-	4																														
Specifications		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																														
Caractéristiques de la formule												Granulat recyclé			PCG			Spéc.			Spéc.			Résistance à l'ornièreage																		
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)		52S-34					% de l'additif			60,0			PCG		N _{grattons}		Vides (%)		Spéc. (%)		≤ <10		1 000 cycles		≤ <15		3 000 cycles		10 000 cycles		30 000 cycles		Ressuage									
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)		52S-34					% de bitume de l'additif			100			N ini		10		12,9		≥ 11,0		N design		80		4,2		4,0 à 7,0		N max		200		2,3		≥ 2,0		Ressuage à N max		Non			
Densité du bitume d'ajout		1.024					% de bitume dans l'EB			2,76			E ¹ (10°C, 10hz)		Faigle (ε _d)		10850		ESS		BAUWAL		ESS sur presse MTS		Spéc.		T _{rupture} (TSST)		E ¹ (10°C, 10hz)		Faigle (ε _d)		ESS sur presse MTS		Spéc.							
Densité effective des granulats, Dge		2,779					Ratio bitume recyclé (RBR) (%)			49			Entente Dmm		2,523		Total granulométrique (%)		462		Rapport du bitume et/total granul.		1,22		Terre à l'eau		Spéc.		Film de bitume effectif, FBE (µm)		9,13		Stabilité retenue		A faire		≥ 70		Surface spécifique, SS (m ² /kg)		5,87	

Tableau-A I-6 Feuille de formule R80

ESG-10 R80											
Granulats utilisés						Granulométrie					
Calibre / Classe granulaire (ID)	Identification (ID) : Absast (AB), Bardeau (BPF), Cribture (C), Cribture avec (CL), Recyle (GR), Pierre (P), Scorie (SC), Sable manufacture (SM), Filler (F).					Tamis en mm (% passant)	Tamis en µm (% passant)				
	Provenance	28	20	14	10	5	2,5	1,25	630	315	160
5 - 10 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	93	14	3	2	2	1,2	5,0
2,5 - 5 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	89	20	7	3	2	1
0 - 5 mm	C	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	96	66	48	34	26	18
GBR 0-2mm	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	100	83	68	52	35	19
GBR 5-10mm	GBR	CMM, Montréal	100	100	96	44	31	26	21	15	8
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Granulométrie du combiné		100	100	97	55	34	27	22	15	9	5,2
Formule et exigences											
Formule	28	20	14	10	5,00	2,5	1,25	630	315	160	80
Spécifications	100	100	97	55	34	27	22	15	9	5,2	5,62
Max	-	-	100	65	= 46,1	< 36,7	< 26,8	= 18,1	-	10	4
Min	-	-	100	92	52	= 46,1	> 30,7	> 22,8	= 18,1	-	4
PCG											
Granulat recyclé						PCG					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34	% de l'additif	80,0	Nini	10	Ngiations	Vides (%)	Spéc.	1 000 cycles	A faire	= < 10
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34	% de bitume de l'additif		Nini	10				3 000 cycles		= < 15
Densité du bitume d'ajout	1,024	% mobilisable	100	N design	80				10 000 cycles		
Densité effective des granulats, Dge	2,792	% de bitume dans l'EB	3,56	Nmax	200				30 000 cycles		
Pourcentage de bitume effectif, Pbe (%)	5,06	Ratio bitume recyclé (RBR) (%)	63	Ressusage à Nmax	Non				ressusage		
Volume de bitume effectif, VBE à 0% de vide (%)	12,57	Entente Dmm	2,523								
Total granulométrique (%)	463	Essai sur presse MTS									
Rapport du bitume/total granul.	1,21	T _{rupture} (TSRS-T)									
Film de bitume effectif, FBE (µm)	9,24	E ¹ (10°C, 10hz)									
Surface spécifique, SS (m ² /kg)	5,68	Stabilité retenue	A faire	≥ 70							



ANNEXE II

RÉSULTATS DES ESSAIS DE MESURE DU COEFFICIENT DE DILATATION/CONTRACTION THERMIQUE

Tableau-A II-1 Résultats mesure du coefficient DCT R0

ESG10-R0 Ep 01				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)			
-	9,0	-	9,5	-6	-6	-1,1
3,3	-	3,9	-	6	-	-
-	8,9	-	10,4	-69	-76	-42,0
-20,2	-	-19,8	-	-401	-	-
-	0,8	-	1,5	-11	391	363,1
3,3	-	3,9	-	-55	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,3	3,3	3,3	-20,2	3,4	3,4
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{chambre Thermique})$	6,2		10,4	1,4		22,5
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{SRTD moyen})$	9,0		8,9	0,8		21,8
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	0,3		-63	47		-21
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	4		-60	50		-14
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	9		-61	56		-5
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	6		-407	340		-100
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen}$	0,3 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	17 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	14 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	6 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		

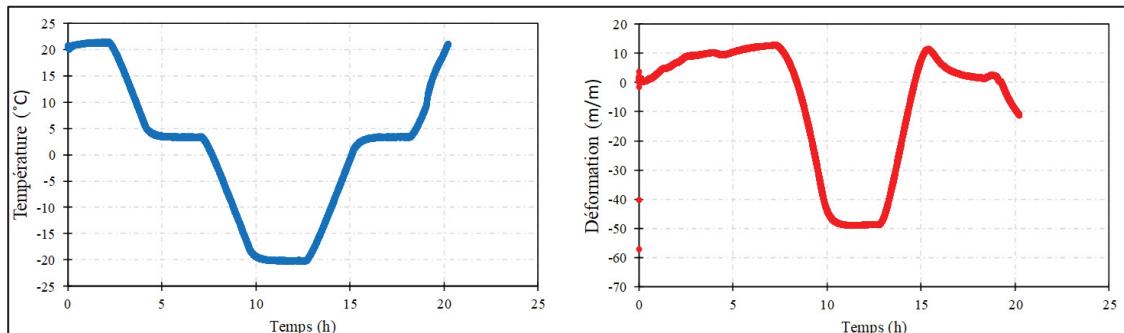


Figure-A II-1 Évolution température et déformation moyennes R0-Ep01

Tableau-A II-2 Résultats mesure du coefficient DCT R0

ESG10-R0 Ep02				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C/h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C/h}$)			
-	8,9	-	9,9	-31	-31	-5,5
3,1	-	3,7	-	-27	-	-
-	8,7	-	10,2	38	65	-35,6
-20,3	-	-19,7	-	-439	-	-
-	1,4	-	1,9	-36	402	373,9
3,1	-	3,9	-	-101	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,2	3,2	3,1	-20,2	-20,2	3,1
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{chambre Thermique})$	6,5		10,2		1,9	22,5
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{SRTD moyen})$	8,9		8,7		1,4	21,8
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	3,1		-57		48	-21
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	-1		-64		54	-25
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	-4		-65		47	-24
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	-30		-412		328	-110
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen}$	1,7 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	18 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	14 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	6 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		

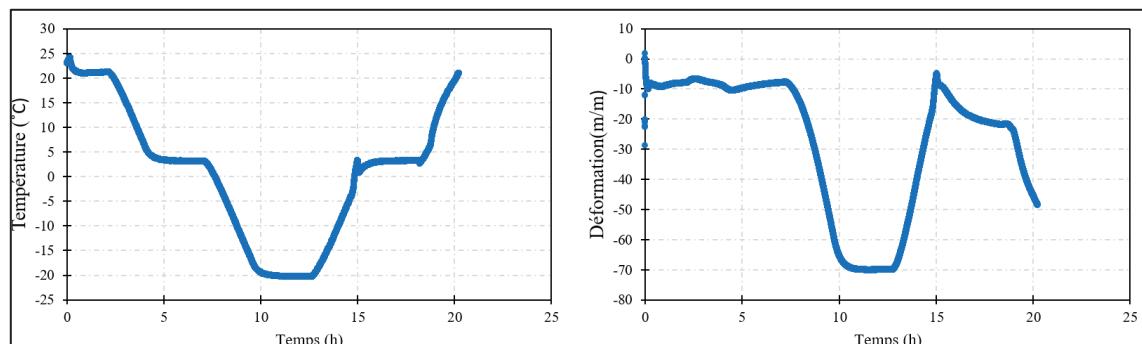


Figure-A II-2 Évolution température et déformation moyennes R0-Ep02

Tableau-A II-3 Résultats mesure du coefficient DCT R20

ESG10-R20 Ep01				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
-	8,9	-	10,0	-135	-135	-23,9
3,2	-	3,9	-	-148	-	-
-	8,2	-	9,6	1326	1474	31,6
-20,1	-	-19,6	-	-609	-	-
-	1,0	-	1,3	-206	404	375,6
3,3	-	4,1	-	-249	-	-

$\Delta T_{\text{visé}}$	$+21\text{ }^\circ\text{C à }+5\text{ }^\circ\text{C}$		$+5\text{ }^\circ\text{C à }-20\text{ }^\circ\text{C}$		$-20\text{ }^\circ\text{C à }+5\text{ }^\circ\text{C}$		$+5\text{ }^\circ\text{C à }+20\text{ }^\circ\text{C}$	
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,2	3,2	3,2	-20,1	-20,1	3,3	3,2	20,8
$T_{\text{rampe }}T^\circ (\text{chambre Thermique})$	6,5		9,6		1,4		22,5	
$T_{\text{rampe }}T^\circ (\text{SRTD moyen})$	8,9		8,2		1,0		21,8	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	-36,8		-84		60		-26	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	-10		-67		58		-7	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	-15		-60		42		-33	
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	-148		-461		341		-118	
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen }$	8,3	$\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	20	$\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	15	$\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	7	$\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$

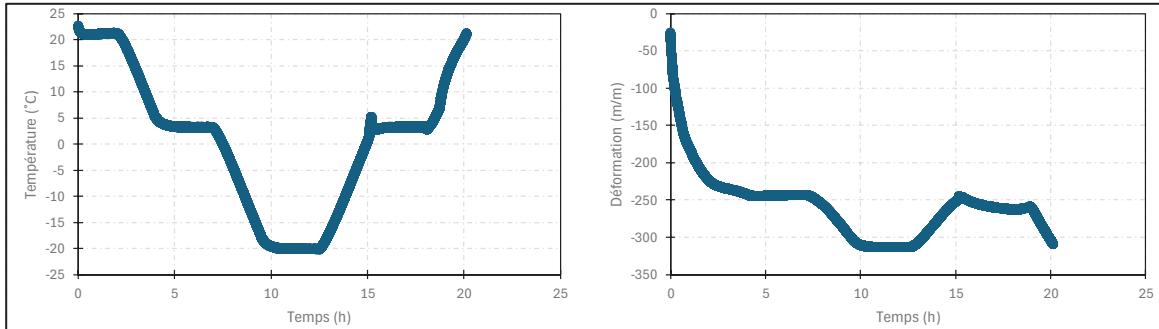


Figure-A II-3 Évolution température et déformation moyennes R20-Ep01

Tableau-A II-4 Résultats mesure du coefficient DCT R20

ESG10-R20 Ep02				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)			
-	8,8	-	9,8	-57	-57	-10,1
3,1	-	3,8	-	-65	-	-
-	8,2	-	9,6	-221	-155	-46,3
-20,3	-	-19,7	-	-523	-	-
-	3,8	-	4,4	-55	467	434,3
3,1	-	3,8	-	-144	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,0	3,0	3,1	-20,2	-20,3	3,1
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{chambre Thermique})$	6,5		9,6		4,4	
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{SRTD moyen})$	8,8		8,2		3,8	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	-3,2		-74		62	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	-1		-69		63	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	-17		-65		45	
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	-65		-458		363	
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen }$	3,6 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	20 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	16 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	8 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		

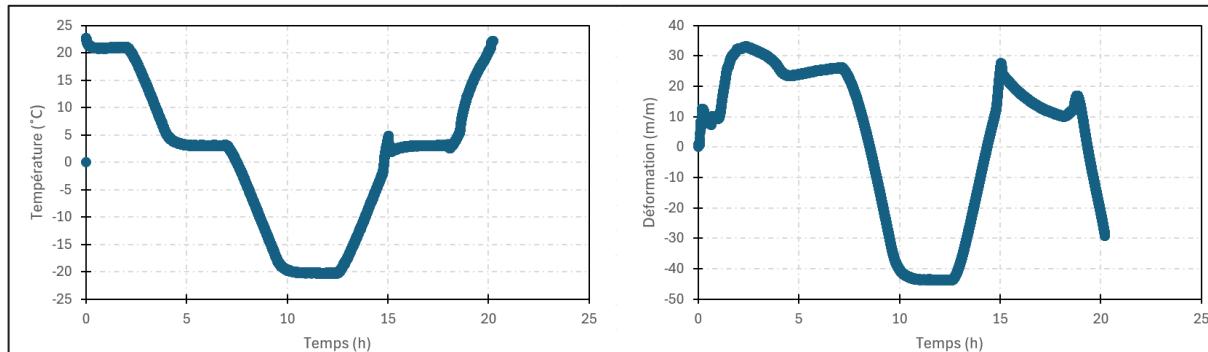


Figure-A II-4 Évolution température et déformation moyennes R20-Ep02

Tableau-A II-5 Résultats mesure du coefficient DCT R30

ESG10-R30 Ep01				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
-	9,0	-	9,8	-127	-127	-8,2
3,1	-	3,7	-	0	-	-
-	9,5	-	11,3	-530	-530	-18,4
-20,3	-	-19,9	-	-627	-	-
-	8,4	-	8,4	-198	429	20,1
3,1	-	3,8	-	-184	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,1	3,1	3,0	-20,1	-20,3	3,1
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{chambre Thermique})$	15,6		11,3		21,5	22,4
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{SRTD moyen})$	9,0		9,5		8,4	21,8
$\alpha_{L \text{ ext165 - 2325}} (\text{micron})$	138		-22		78	-46
$\alpha_{L \text{ ext165 - 2326}} (\text{micron})$	-54		-259		55	-90
$\alpha_{L \text{ ext165 - 2332}} (\text{micron})$	205		61		68	-129
$\alpha_{L \text{ ext165 compensé - moyen}} (\mu\text{def})$	-196		-477		447	-135
$\tau \alpha_{L \text{ ext165 compensé - moyen}}$	11 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		21 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		19 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	7 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$

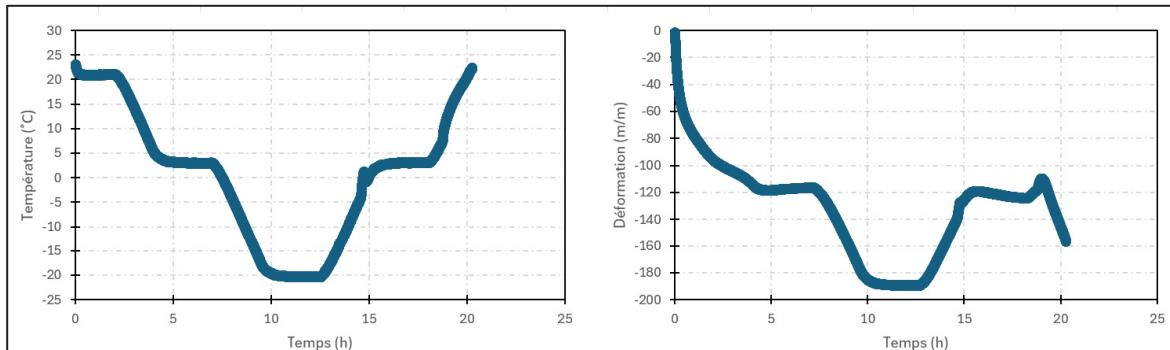


Figure-A II-5 Évolution température et déformation moyennes R30-Ep01

Tableau-A II-6 Résultats mesure du coefficient DCT R30

ESG10-R30 Ep02				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)			
-	8,9	-	9,3	-305	-305	#DIV/0!
3,3	-	3,8	-	-358	-	-
-	8,3	-	9,7	0	358	-22,6
-20,2	-	-19,9	-	-940	-	-
-	1,1	-	1,8	-467	473	439,9
3,5	-	4,2	-	-430	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,0	3,3	3,3	-20,2	-20,2	20,7
T rampe T° (chambre Thermique)	5,9		9,7	1,8	22,5	
T rampe T° (SRTD moyen)	8,9		8,3	1,1	21,8	
α_L ext165 - 2325 (micron)	-71,8		-91	75	-6	
α_L ext165 - 2326 (micron)	-42		-29	89	31	
α_L ext165 - 2332 (micron)	-50		-81	70	-1	
α_L ext165 compensé - moyen (μdef)	-192		-582	493	-118	
$\tau \alpha_L$ ext165 compensé - moyen	10,8 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	25 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	21 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	7 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		

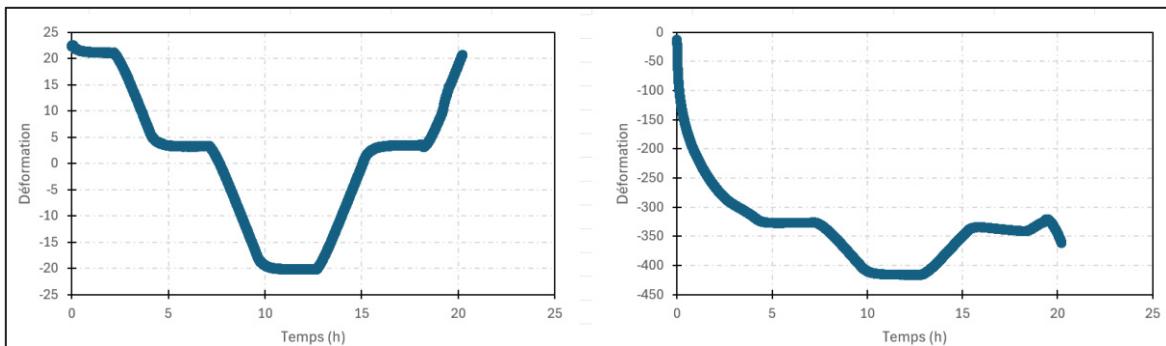


Figure-A II-6 Évolution température et déformation moyennes R30-Ep02

Tableau-A II-7 Résultats mesure du coefficient DCT R40

ESG10-R40 Ep01				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)			
-	9,1	-	9,0	-149	-149	-9,7
3,5	-	4,1	-	-830	-	-
-	8,4	-	9,8	-1444	-614	-58,3
-20,0	-	-19,8	-	-706	-	-
-	8,4	-	8,8	-282	424	19,8
3,6	-	4,3	-	-206	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,2	3,5	3,5	-20,1	-20,1	3,7
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{chambre Thermique})$	16,3		9,8		22,5	
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{SRTD moyen})$	9,1		8,4		8,4	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	-58		-143		77	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	-315		-409		75	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	-26		-96		78	
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	-196		-510		499	
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen }$	11 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	22 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	21 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	10 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		

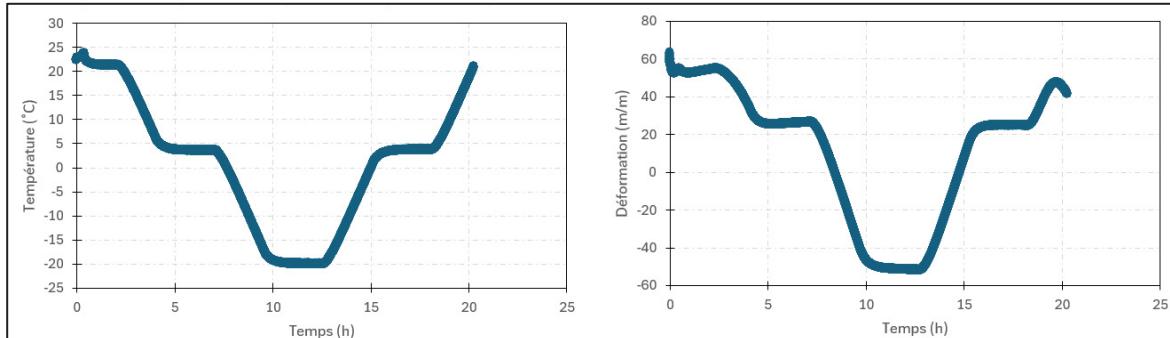


Figure-A II-7 Évolution température et déformation moyennes R40-Ep01

Tableau-A II-8 Résultats mesure du coefficient DCT R40

ESG10-R40 Ep02				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe 166			
-	9,1	-	9,9	-208	-208	-36,7
3,2	-	3,8	-	-264	-	-
-	8,3	-	9,7	-1014	-750	-35,6
-20,1	-	-19,9	-	-838	-	-
-	0,9	-	1,3	-374	464	559,5
3,3	-	1,8	-	-307	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,2	3,3	3,2	-20,2	-20,2	3,3
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{chambre Thermique})$	6,5		9,7	1,3		22,2
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{SRTD moyen})$	9,1		8,3	0,9		21,8
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	-26		-85	79		23
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	-40		-91	84		29
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	-51		-90	82		24
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	-263		-574	524		170
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen}$	15 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	25 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	22 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	9 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		

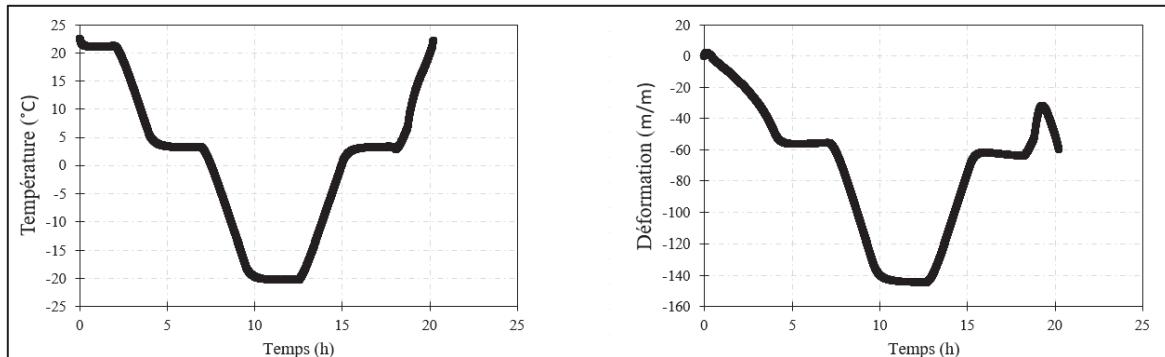


Figure-A II-8 Évolution température et déformation moyennes R40-Ep02

Tableau-A II-9 Résultats mesure du coefficient DCT R60

ESG10-R60 Ep01				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)			
-	8,9	-	9,9	-249	-249	-35,0
3,6	-	4,3	-	-301	-	-
-	-0,5	-	-3,6	-22	279	-124,0
-20,1	-	-19,7	-	-844	-	-
-	1,4	-	2,0	-379	466	339,7
3,6	-	4,2	-	-306	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,2	3,6	3,7	-20,1	3,7	20,9
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{chambre Thermique})$	6,5		-3,6	1,9		22,5
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{SRTD moyen})$	8,9		-0,5	1,4		22,1
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	-46		-92	93		57
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	-20		-80	81		8
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	-42		-79	74		9
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	-244		-544	535		185
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen }$	14 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		23 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	23 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		11 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$

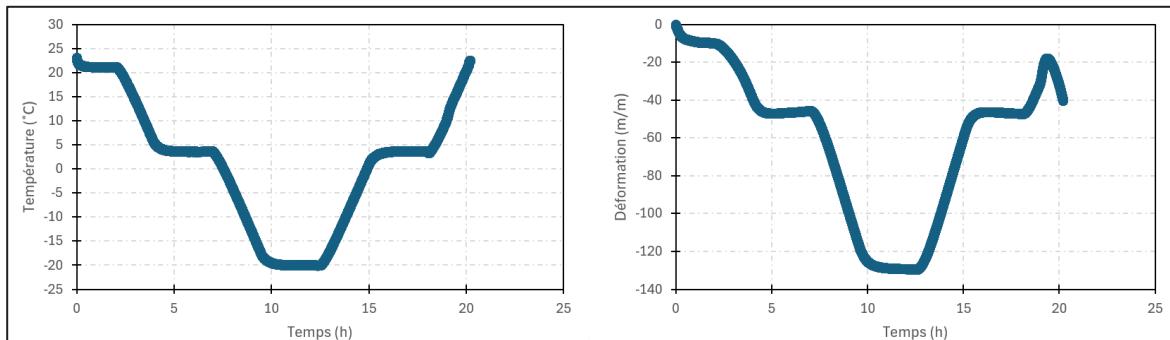


Figure-A II-9 Évolution température et déformation moyennes R60-Ep01

Tableau-A II-10 Résultats mesure du coefficient DCT R60

ESG10-R60 Ep02				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe (μdef/°C)
Température Réelle (°C)	Taux rampe (°C/h)	Température Réelle (°C)	Taux rampe (°C/h)			
-	8,9	-	9,9	-309	-309	-44,4
3,2	-	3,9	-	-381	-	-
-	10,3	-	12,3	-1110	-729	-34,5
-20,2	-	-19,9	-	-959	-	-
-	2,3	-	2,4	-460	498	218,6
3,0	-	3,9	-	-394	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 °C à +5°C	+5 °C à -20°C	-20 °C à +5°C	+5 °C à +20°C		
$\Delta T_{\text{réel}} (\text{°C})$	21,3	3,3	3,3	-20,2	-20,2	21,8
$T_{\text{rampe}} T^{\circ}$ (chambre Thermique)	6,4	12,3		2,4	22,2	
$T_{\text{rampe}} T^{\circ}$ (SRTD moyen)	8,9	10,3		2,3	21,8	
α_L ext165 - 2325 (micron)	-20	-84		85	30	
α_L ext165 - 2326 (micron)	-57	-95		94	46	
α_L ext165 - 2332 (micron)	-67	-89		84	34	
α_L ext165 compensé - moyen (μdef)	-321	-576		564	263	
$\tau \alpha_L$ ext165 compensé - moyen	18 μdef / °C	24 μdef / °C	24 μdef / °C	14 μdef / °C		

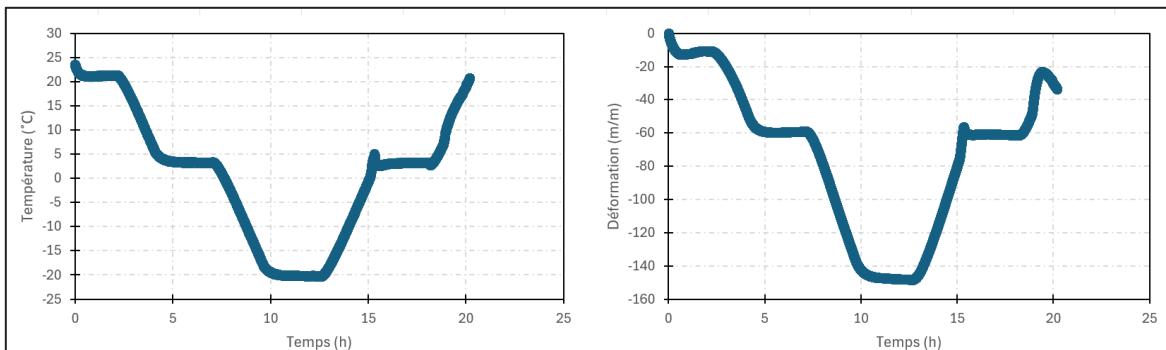


Figure-A II-10 Évolution température et déformation moyennes R60-Ep02

Tableau-A II-11 Résultats mesure du coefficient DCT R80

ESG10-R80 Ep01				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C}/\text{h}$)	déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
-	9,0	-	9,5	-252	-252	-44,6
3,3	-	3,7	-	-337	-	-
-	8,3	-	9,7	14	351	-21,8
-20,0	-	-19,7	-	-888	-	-
-	1,0	-	1,6	-433	454	421,9
3,3	-	3,8	-	-347	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,3	3,5	3,3	-20,0	-20,0	20,7
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{chambre Thermique})$	6,3		9,7	1,6		22,5
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{SRTD moyen})$	9,0		8,3	1,0		21,9
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	-61		-92	90		72
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	-32		-74	75		45
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	-60		-89	85		59
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	-336		-551	540		385
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen }$	19 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		24 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	23 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	22 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	

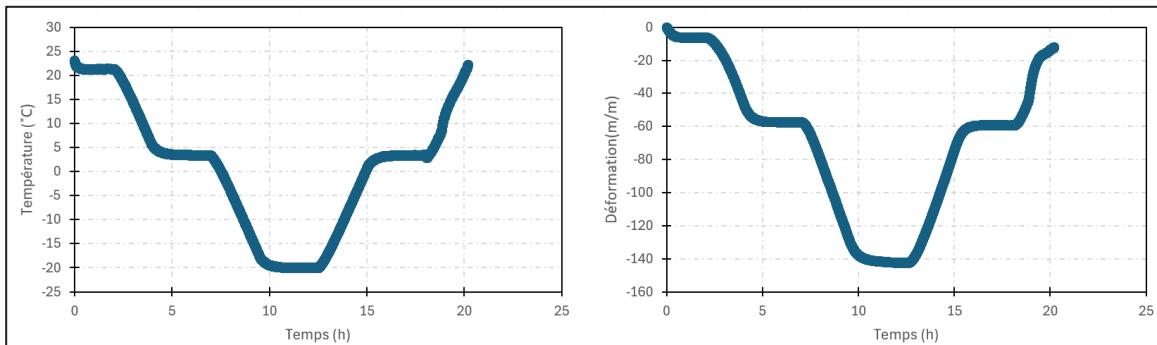


Figure-A II-11 Évolution température et déformation moyennes R80-Ep01

Tableau-A II-12 Résultats mesure du coefficient DCT R80

ESG10-R80 Ep02				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe (μdef/°C)
Température Réelle (°C)	Taux rampe (°C/h)	Température Réelle (°C)	Taux rampe (°C/h)			
-	9,1	-	9,7	-250	-250	-43,4
3,2	-	3,7	-	-332	-	-
-	-22,0	-	-25,7	-695	-363	-17,3
-20,0	-	-19,4	-	-855	-	-
-	3,6	-	3,9	-420	435	121,6
3,2	-	3,6	-	-364	-	-
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 °C à +5°C	+5 °C à -20°C	-20 °C à +5°C	+5 °C à +20°C		
$\Delta T_{\text{réel}} (\text{°C})$	20,8	3,2	3,1	-20,0	-20,0	20,8
$T_{\text{rampe}} T^{\circ} (\text{chambre Thermique})$	6,5		-25,7	3,8		22,2
$T_{\text{rampe}} T^{\circ} (\text{SRTD moyen})$	9,1		-22,0	3,6		21,9
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	-50		-86	81		52
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	-45		-72	66		37
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	-56		-84	79		63
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	-332		-523	489		335
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen}$	19 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	23 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	21 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	19 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		

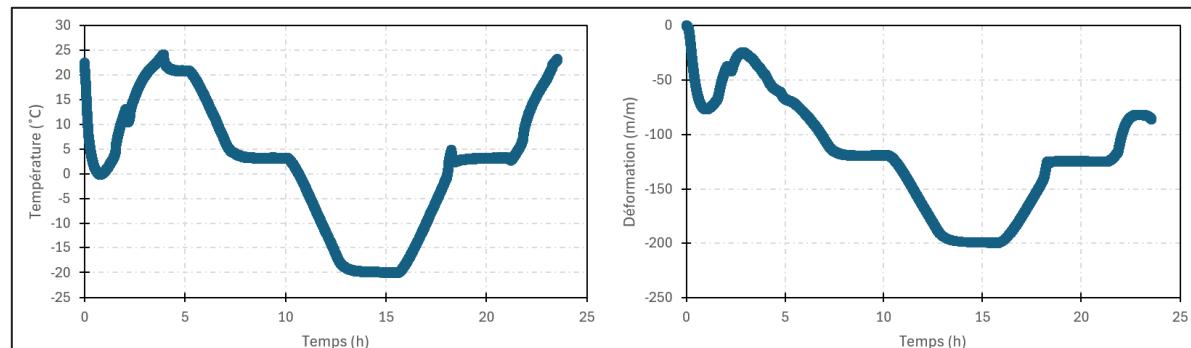


Figure-A II-12 Évolution température et déformation moyennes R80-Ep02

Tableau-A II-13 Résultats mesure du coefficient DCT R100

R100 Ep01				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD		
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C/h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C/h}$)			
-	9,2	-	10,1	-305	-305	-19,8
3,5	-	4,2	-	-436	-	-
-	10,0	-	11,6	-1051	-614	-30,5
-19,8	-	-19,4	-	-892	-	-
-	9,6	-	9,5	-461	431	17,5
3,3	-	3,9	-	-434	-	-
ΔT visé	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$		
ΔT réel ($^\circ\text{C}$)	21,2	3,6	3,6	-20,1	-19,9	3,4
T rampe T° (chambre Thermique)	15,3		11,6		24,2	21,3
T rampe T° (SRTD moyen)	9,2		10,0		9,6	20,8
α_L ext165 - 2325 (micron)	-66		-110		76	111
α_L ext165 - 2326 (micron)	-74		-135		63	84
α_L ext165 - 2332 (micron)	-65		-109		70	85
α_L ext165 compensé - moyen (μdef)	-397		-495		456	460
$\tau \alpha_L$ ext165 compensé - moyen	22 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		21 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$		20 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	24 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$

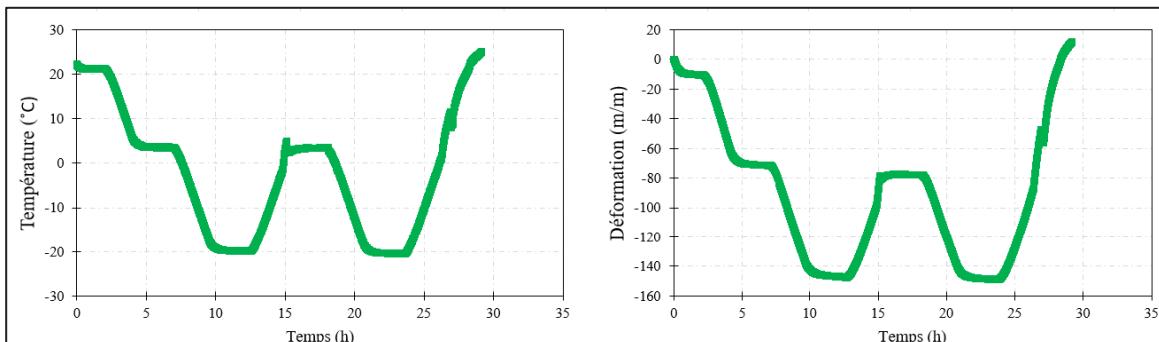


Figure-A II-13 Évolution température et déformation moyennes R100-Ep01

Tableau-A II-14 Résultats mesure du coefficient DCT R100

R100 Ep02				Extensomètre (3) Compensés en fonction des 3 SRTD				
3 SRTD sur éprouvette		Température chambre (RTD)		déformation pt initial (μdef)	déformation entre 2 pts (μdef)	Taux rampe ($\mu\text{def}/^\circ\text{C}$)		
Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C/h}$)	Température Réelle ($^\circ\text{C}$)	Taux rampe ($^\circ\text{C/h}$)					
-	8,9	-	10,0	-304	-304	-55,4		
3,1	-	3,8	-	-403	-	-		
-	1,5	-	11,4	-26	377	119,6		
-20,2	-	-19,6	-	-897	-	-		
-	9,5	-	9,5	-498	399	16,4		
3,1	-	3,9	-	-435	-	-		
$\Delta T_{\text{visé}}$	+21 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à -20 $^\circ\text{C}$	-20 $^\circ\text{C}$ à +5 $^\circ\text{C}$	+5 $^\circ\text{C}$ à +20 $^\circ\text{C}$				
$\Delta T_{\text{réel}} (^\circ\text{C})$	21,0	3,2	3,1	-20,1	-20,1	3,2	3,3	20,5
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{chambre Thermique})$	6,5		11,4		24,2		21,3	
$T_{\text{rampe}} T^\circ (\text{SRTD moyen})$	8,9		1,5		9,5		19,2	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2325 (micron)}$	-61		-80		75		83	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2326 (micron)}$	-60		-73		66		59	
$\alpha_L \text{ ext165 - 2332 (micron)}$	-64		-74		70		60	
$\alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen } (\mu\text{def})$	-402		-495		462		463	
$\tau \alpha_L \text{ ext165 compensé - moyen}$	22 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	21 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	20 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	20 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$	27 $\mu\text{def} / ^\circ\text{C}$			

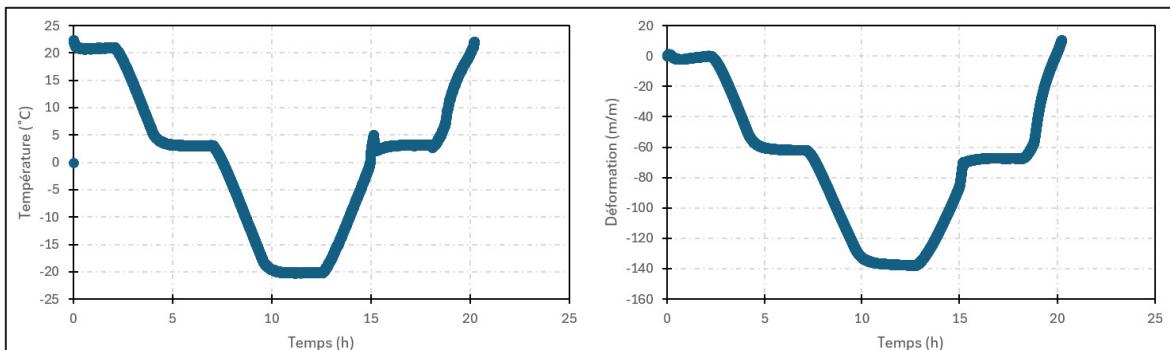


Figure-A II-14 Évolution température et déformation moyennes R100-Ep02

ANNEXE III

ÉTABLISSEMENT D'UNE DURÉE DE MALAXAGE POUR ENROBÉS À FORT TAUX DE GBR À L'AIDE DES ESSAIS MODULE COMPLEXE ET RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ

1- Introduction

La production d'un enrobé contenant une quantité importante de granulats bitumineux recyclés (GBR) nécessite des conditions spécifiques pour prévenir la formation de clusters, qui peuvent affecter l'homogénéité des enrobés recyclés. En l'absence de mesures pour atténuer ces phénomènes de mélange, le comportement et les performances des enrobés sont compromis. Ainsi, les taux de GBR autorisés au Québec sont de 10 % dans les couches de surface et de 20 % dans les couches de base. Pour ces taux de recyclage, le ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD) fournit des directives de formulation afin d'obtenir des mélanges recyclés de qualité.

Pour les enrobés à fort taux de GBR (supérieur à 20 %), la littérature indique qu'il existe des phénomènes chimiques et physiques à prendre en compte lors de leur production. Pour minimiser l'impact de ces phénomènes, il est recommandé d'augmenter la durée et la température de malaxage. Cependant, au Québec, les températures de malaxage en laboratoire sont déjà normalisées en fonction du type de bitume d'apport utilisé, tandis que la durée de malaxage n'est pas précisément définie, laissant la possibilité de l'ajuster.

L'objectif de ce chapitre est d'établir une durée de malaxage optimale pour les enrobés avec un taux de GBR supérieur à 20 %, durée qui sera ensuite appliquée pour la production des enrobés à fort taux de GBR. Pour ce faire, un programme expérimental incluant des essais de module complexe (MC) et de retrait thermique a été mis en place pour atteindre cet objectif.

2- Programme expérimental et matériaux

La démarche expérimentale ayant conduit à l'établissement de la durée de malaxage optimale pour la production des enrobés à fort taux de GBR, ainsi que les matériaux utilisés, sont présentés dans cette section. Trois enrobés de surface de type ESG10 ont été utilisés pour cette étude : un enrobé sans GBR et deux enrobés avec GBR.

3- Programme expérimental

Pour établir la durée de malaxage optimale pour ce projet, les enrobés R0, R30 et R40 ont été produits en laboratoire selon le programme expérimental illustré à la Figure 4-1. Une plaque a été confectionnée pour chaque enrobé produit en laboratoire, totalisant neuf plaques pour cette étude. Une éprouvette pour l'essai de module complexe et deux éprouvettes TSRST ont été prélevées de chaque plaque. Les plaques confectionnées pour cette partie sont de dimension 500x180x100 mm, comme montré sur la photo de la Figure 3-14 et selon le plan de prélèvement de la Figure 3-15.

L'enrobé R0, qui ne contient pas de GBR, sert de référence. Sa durée de malaxage diffère des quatre durées de malaxage testées pour les enrobés contenant du GBR dans cette étude. La durée de malaxage optimale retenue pour les enrobés à fort taux de GBR sera celle qui permet d'obtenir des résultats pour les enrobés recyclés très proches de ceux de l'enrobé R0.

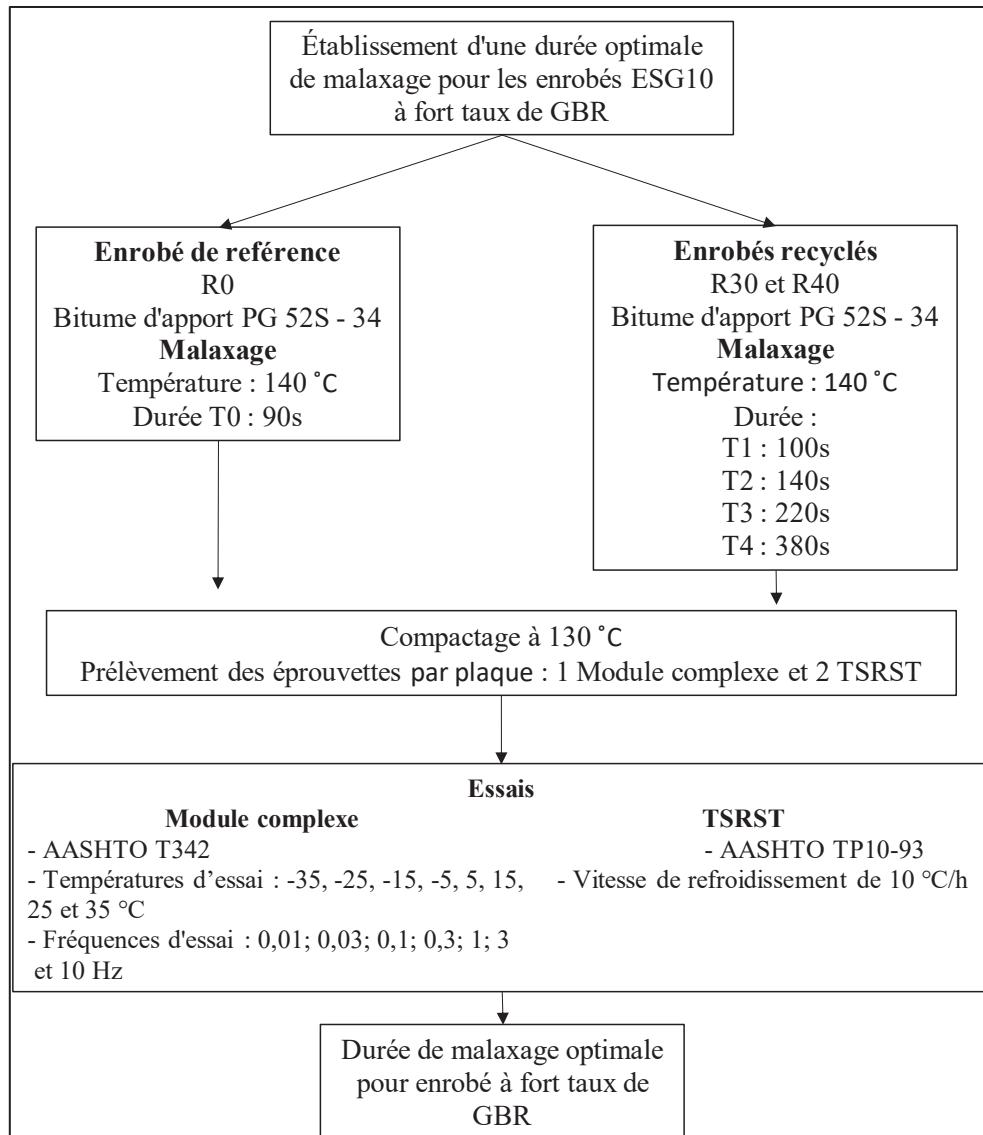


Figure-A III-1 Diagramme de la démarche expérimentale

4- Matériaux

Les matériaux utilisés ici ont été décrits au chapitre 3. Les courbes granulométriques sont montrées à la Figure 2. Les trois matériaux rencontrent les exigences du fuseau d'un mélange ESG10 de la norme 4202 du MTMD.

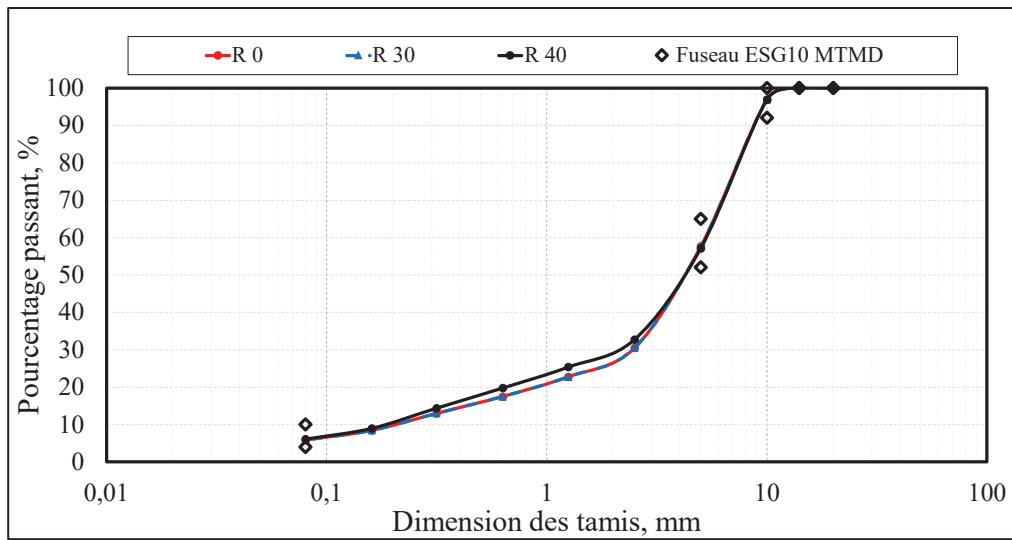


Figure-A III-2 Granulométries des enrobés ESG10 de l'étude et fuseau ESG10 du MTMD

5- Préparation des matériaux et mélanges et prélèvement des éprouvettes d'essai

La préparation des matériaux, leur conditionnement, la production des mélanges et le prélèvement des éprouvettes d'essai ont été décrits en détails au chapitre 3. Pour rappel, cinq temps de malaxage inscrits au Tableau 1 ont été utilisé dans cette étude. La durée T0 a servi pour produire l'enrobé de référence R0. Cette durée provient des travaux du LCMB qui a démontré que l'utilisation d'une durée de 90 s avec le malaxeur thermorégulé permettait d'obtenir un enrobé du MTMD homogène où tous les granulats étaient bien enrobés de bitume. La T1 aussi est une référence de ce même laboratoire. Les durées T1, T2, T3 et T4 ont été utilisées pour les enrobés R30 et R40. Ainsi, quatre mélanges ont été produits pour chaque enrobé contenant du GBR, totalisant neuf mélanges pour cette étude.

Tableau-A III-1 Durées de malaxage des enrobés ESG10 à l'étude

Malaxage	T0	T1	T2	T3	T4
Durée séquence 1(s)	60	60	60	60	60
Durée séquence 2 (s)	30	40	80	160	320
Total (s)	90	100	140	220	380

Après production, compactage, cure de deux jours des plaques, prélèvement des éprouvettes et une cure de quatorze jours pour les éprouvettes, les différents essais de module complexe et retrait thermique empêché ont débutés. Les résultats de ces essais sont ici présentés et analysés.

6- Résultats des essais

Des essais de module complexe ont été réalisés sur neuf mélanges bitumineux contenant 0 %, 30 % et 40 % de GBR. Les résultats expérimentaux ont été modélisés à l'aide du modèle rhéologique 2S2P1D, les paramètres d'étalement étant répertoriés dans le tableau 3. Il est important de noter que les mélanges présentent des niveaux variables de vides d'air. Cependant, comme le soulignent Bérubé et al. (2023), ces différences de vides d'air ne peuvent pas être entièrement attribuées à la durée du mélange. Les figures 7 et 8 montrent les courbes maîtresses des résultats du module complexe pour les trois enrobés. Pour les mélanges obtenus avec les

quatre durées de malaxage pour le R30, aucune différence significative n'a été observée entre les quatre mélanges. Ces quatre mélanges présentent des écarts par rapport à R0 sur une plage de fréquences équivalentes, mais il n'y a pas d'écarts à des fréquences équivalentes très élevées pour aucun de ces mélanges.

Dans le cas de l'enrobé R40, dont les courbes maîtresses sont illustrées à la figure 8, les quatre enrobés présentent des écarts entre eux et par rapport à l'enrobé de référence R0, mais avec peu de différences à des fréquences très élevées. Pour l'enrobé R40, le temps de malaxage a une influence évidente sur les résultats du module complexe à partir de fréquences équivalentes très basses et moyennes.

Tableau-A III-2 Paramètres de calibration du modèle 2S2P1D des enrobés ESG10-R0, ESG10-R30 et ESG10-R40

Enrobés	R0	R30				R40			
		R0_T0	R30_T1	R30_T2	R30_T3	R30_T4	R40_T1	R40_T2	R40_T3
Temps malaxage (s)	90	100	140	220	380	100	140	220	380
E ₀ (MPa)	15	15	12	12	15	120	30	25	35
E ₀₀ (MPa)	33500	31500	34000	31500	32200	35000	35000	34000	39000
h	0.72	0.6	0.65	0.62	0.62	0.58	0.6	0.6	0.62
k	0.24	0.21	0.22	0.21	0.21	0.20	0.20	0.19	0.20
δ	2.5	2.5	2.6	2.5	2.5	2.25	2.3	2.2	2.4
T _E	0.00039	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.003	0.002	0.0015	0.0035
β	90	120	120	120	120	150	150	150	150
C ₁	26.42	41.99	27.13	30.9	20.94	41.78	23.61	23.97	26.35
C ₂	211.01	298.13	199.22	209.35	155.98	298.21	165.41	171.54	195.51
Tref	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Vi (%)	6.01	6.45	5.54	6.44	6.66	4.94	4.92	5.51	3.27

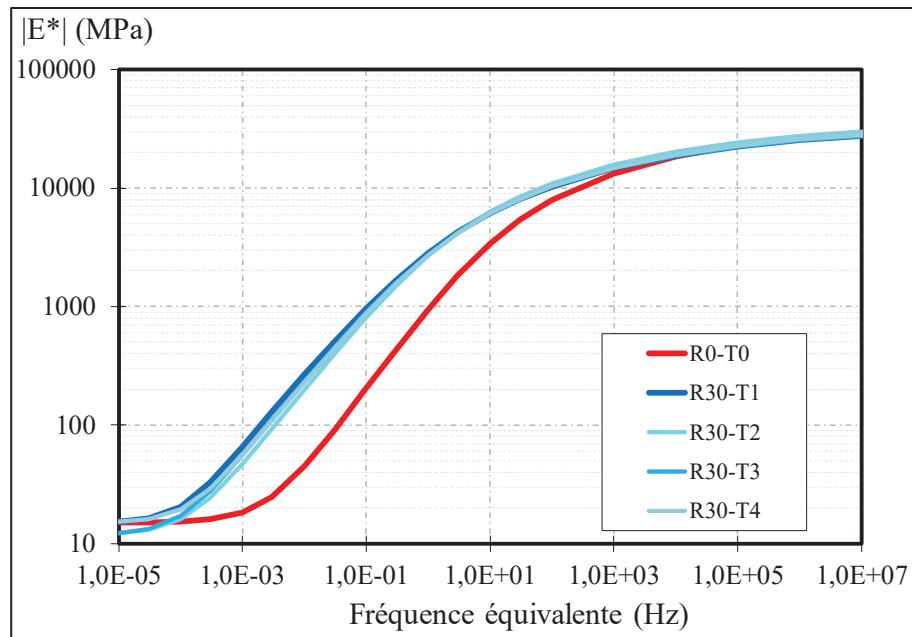


Figure-A III-3 Courbes maîtresses 2S2P1D des enrobés ESG10-R0 et ESG10-R30

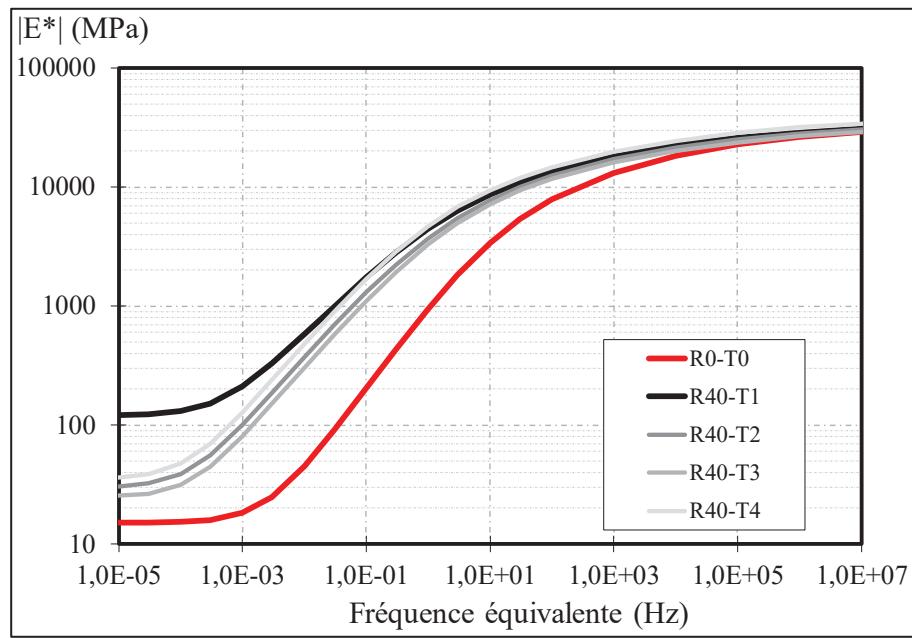


Figure-A III-4 Courbes maîtresses 2S2P1D des enrobés ESG10-R0 et ESG10-R40

Les Figures 5 et 6 présentent les résultats des modules complexes dans le plan Cole-Cole normalisé. Les résultats de module complexe dans le plan Cole-Cole peuvent être influencé par les vides des éprouvettes surtout pour les basses températures. Une normalisation du plan

Cole-Cole permet de se défaire de cette influence des vides sur les résultats expérimentaux obtenus

Ces deux figures du plan Cole-Cole nous montrent simplement que les quatre mélanges de chaque enrobé R30 et R40 produits avec les quatre temps de malaxage sont identique. L'analyse des résultats des essais de module complexe va donc nécessiter un autre paramètre du module complexe qui doit être plus sensible à la durée de malaxage. En effet, les courbes maîtresses seules ne suffisent pas pour le choix d'une durée de malaxage pour tout le projet. Il faut que l'analyse de l'essai de module complexe soit un peu plus poussée pour arriver à une conclusion.

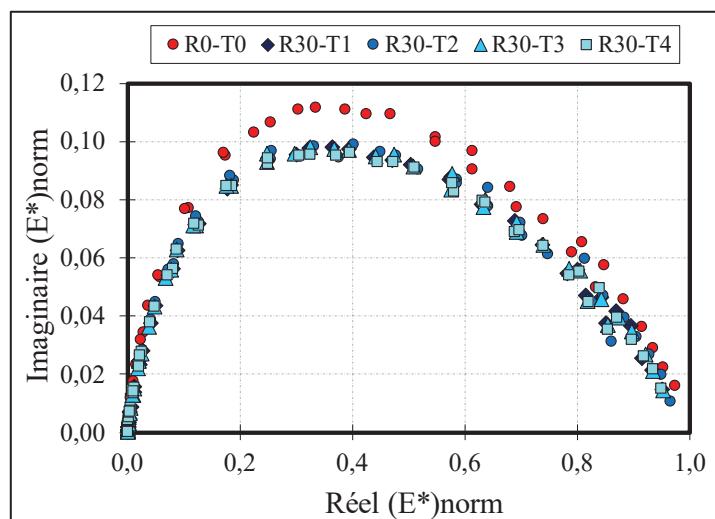


Figure-A III-5 Courbes maîtresses des enrobés ESG10-R0 et ESG10-R30

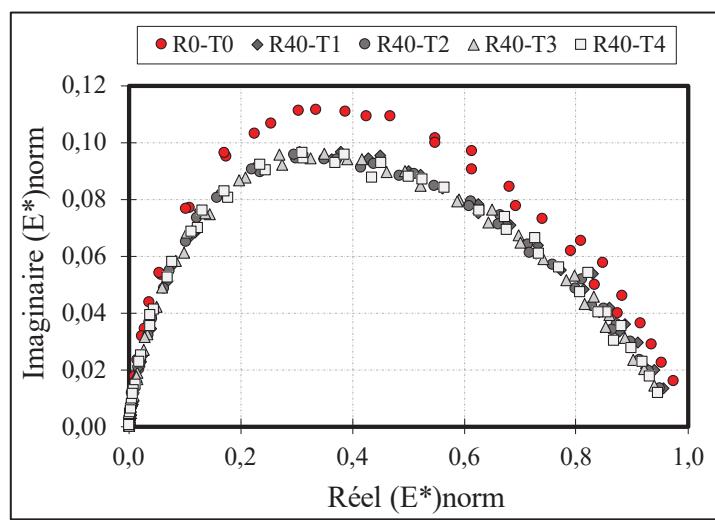


Figure-A III-6 Courbes maîtresses des enrobés ESG10-R0 et ESG10-R40

7- Analyse des résultats des essais de module complexe

L'analyse des courbes maîtresses et des plans Cole-Cole ne nous permet pas d'aboutir à un choix éclairé du temps de malaxage à retenir pour les essais de module complexe. L'essai de module complexe permet de mesurer en plus du module de rigidité, un autre paramètre qui est l'angle de phase. L'angle de phase est un paramètre important du module complexe, car il permet de traduire le comportement élastique ou visqueux de l'enrobé bitumineux. Les résultats des essais pour cette partie de la thèse ont permis de tracer l'évolution des angles de phase en fonction de la température pour une fréquence de 0.01 Hz. Cette fréquence permet de caractériser le comportement sans sollicitations mécaniques. De plus, au niveau des courbes maîtresse, des écarts visibles ont été observés à cette fréquence.

Les températures des résultats expérimentaux n'étant pas exactement identique pour les neuf essais de module complexe de la présente étude, les valeurs d'angle de phase ont été calculées pour des températures identiques à l'aide du modèle 2S2P1D. Les résultats obtenus sont montrés à la Figure 7.

La Figure 7 montre qu'à très basse température, l'angle de phase tend vers zéro. Ce qui signifie que le bitume est complètement rigide et l'enrobé à un comportement quasi élastique. L'augmentation de la température entraîne une augmentation de l'angle de phase jusqu'à une valeur maximale. Traduisant ainsi un comportement viscoélastique du mélange. Une fois la valeur maximale (pic) atteint, l'augmentation de la température entraîne une baisse de l'angle de phase jusqu'à une valeur qui tend à nouveau vers zéro. Le bitume se ramollit et tend à se comporter comme un fluide. Si la température continue à augmenter, le bitume sera totalement fluidifié et l'enrobé deviendra un mélange granulaire non lié. La Figure 7 montre également l'évolution de l'angle de phase des enrobés R30 et R40 en fonction de la durée de malaxage pour la fréquence de 0,01 Hz. Cette évolution de l'angle peut se traduire par déduction, dans une moindre mesure, comme l'évolution du comportement de l'enrobé bitumineux à cette fréquence.

Un décalage est observé à la Figure 7a entre les courbes et les pics des courbes pour les trois mélanges. L'angle de phase du mélange R0 atteint son maximum de 60 degrés à une température de 3 °C. Le maximum pour le mélange R30 est de 54 degrés à 13 °C et pour le R40, on a 41 degrés à 6 °C. Dès que la durée de malaxage augmente pour les enrobés recyclés, on observe des changements dans le comportement de l'angle de phase. À partir de T2 (Figure 7 b) la forme des courbes est très similaire pour l'ensemble des enrobés. Le pic du R30 passe de 54 à 56 degrés sans changement de température associée à ce pic. Pour le R40, le pic passe 41 à 50 degrés et la température de 6 à 13 °C. Identique à la température du pic de l'enrobé R30. Les angles de phase maximums et leur température associée ne subissent pas de changement pour les deux enrobés à T3 (Figure 7c). Toutefois, on observe une légère baisse du pic du R30 et un léger gain d'angle de phase du R40 (voir Figure 8). À T4, le pic poursuit sa baisse pour le R30 tandis qu'on observe une stabilisation du pic du R40 entre T3 et T4.

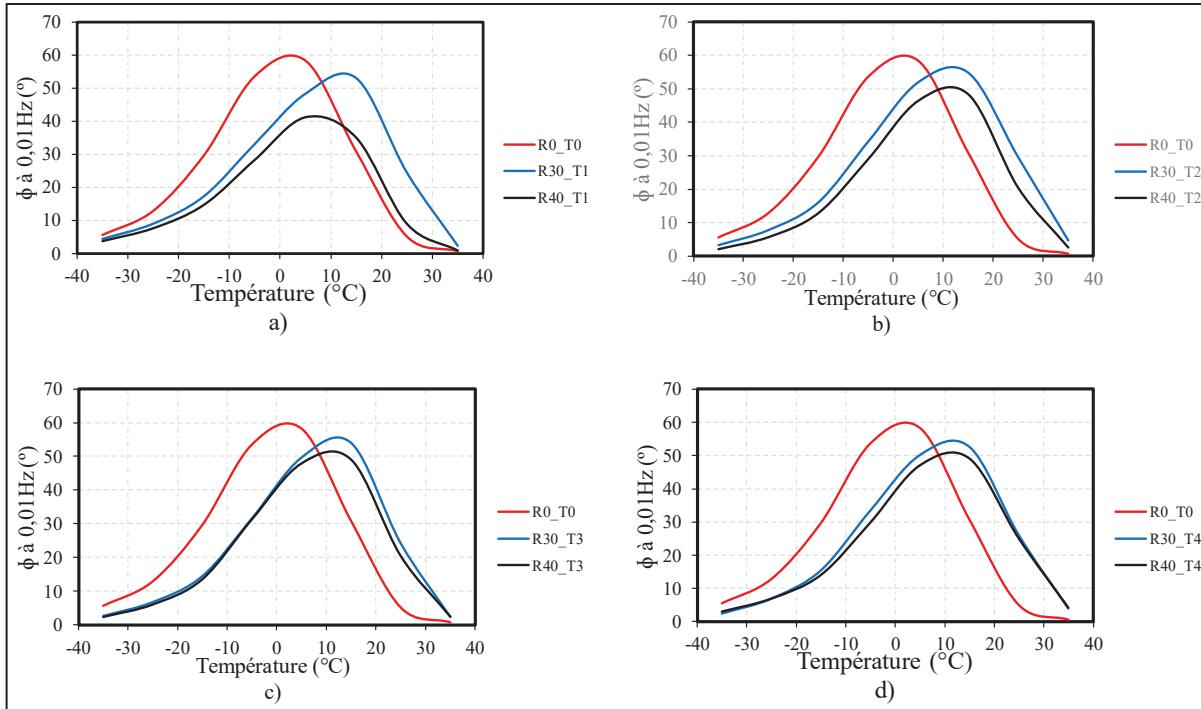


Figure-A III-7 Évolution des angles de phase 2S2P1D des enrobés ESG10 en fonction de la température a) T0 et T1 b) T0 et T2 c) T0 et T3 d) T0 et T4

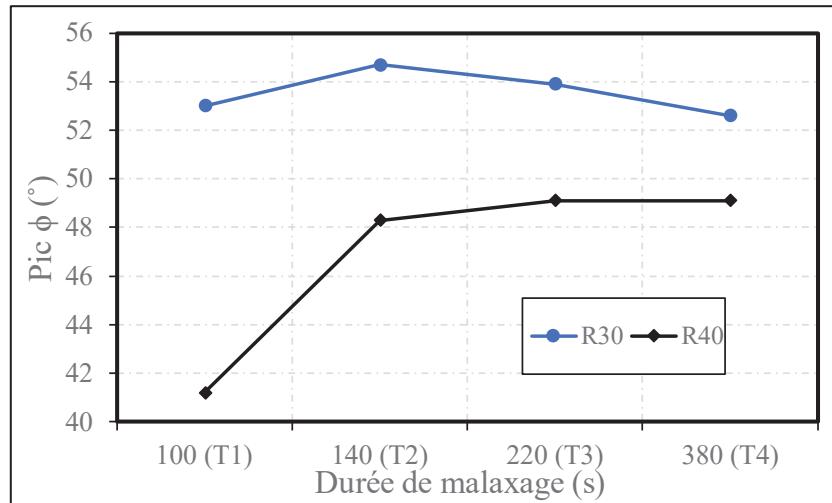


Figure-A III-8 Évolution des maximums (pics) d'angle de phase en fonction des durées de malaxage des enrobés ESG10 avec GBR

L'analyse des résultats présentés aux Figures 11 et 12 nous permet de faire l'hypothèse qu'au temps T1, les deux mélanges recyclés ne seraient pas encore homogènes. D'où des formes de courbes différentes de celle de la courbe R0_T0. À T2, le R30 se serait homogénéisé, car l'angle de phase a atteint son maximum et commence par baisser à T3. Cette baisse d'angle de phase peut traduire un début d'oxydation. L'enrobé R40 serait homogène à T3, car on observe

une stabilisation de l'angle de phase entre T3 et T4. On peut également émettre l'hypothèse que l'ajout du GBR en quantité importante freinera l'oxydation des enrobés recyclé. En effet, l'augmentation de la durée de malaxage était sensée entraîner une oxydation rapide se traduisant par une baisse plus prononcée des angles de phase après les maximums. Si les enrobés recyclés avaient subis une oxydation au cours de cette étude, nous pensons que les pics d'angle de phase à T4 devraient être inférieurs aux pics à T1. En effet, on estime qu'à T1, les caractéristiques du bitume d'apport prédominent le comportement de l'angle de phase. Un angle de phase à T4 inférieur à celui de T1 aurait signifié que le bitume d'apport s'est en parti oxydé. Toutefois, l'hypothèse de frein liée au GBR n'est pas démontrée dans cette étude, car l'enrobé de référence n'a pas subi de variation de durée de malaxage et un mélange 100% GBR ne fait pas parti de cette étude.

À la suite de cette analyse, les durées de malaxage T2 (140 s) et T3 (220 s) semblent permettre une homogénéisation complète des enrobés recyclés R30 et R40 respectivement. Car l'angle de phase qui a permis d'observer des différences entre les mélanges atteint sa valeur maximale entre ces deux temps. Le temps à retenir pour le projet aux vues de l'analyse du module complexe est T3 pour deux raisons. Premièrement, on observe qu'entre T3 et T4, l'angle de phase du R40 s'est stabilisé montrant de cette façon que T3 était la durée de malaxage permettant au mélange R40 d'atteindre une homogénéité maximale. Deuxièmement, le projet comporte des taux de GBR supérieurs 40 % (60 et 80 %) et entre T2 et T3, on observe une évolution du comportement de l'angle de phase du R40. Toutefois, baser les choix du temps de malaxage du projet sur les résultats de module complexe uniquement semble ne pas être suffisant. Un deuxième essai est nécessaire pour confirmer le choix du temps T3. L'augmentation de la durée de malaxage d'un enrobé contenant des quantités importante de GBR devrait aider à activer plus de bitume du GBR qui viendrait ainsi influencer les performances au retrait thermique.

8- Essais de retrait thermique empêché (TSRST)

Les résultats des essais TSRST sont montrés à la Figure 4-8. Deux éprouvettes ont été testés pour chaque enrobé produit en laboratoire. Tout comme dans le cas du module complexe, la Figure 13 ne permet d'identifier l'influence de l'évolution du temps de malaxage sur l'essai TSRST. Mais l'influence de l'ajout du GBR est bien mise en avant par cette figure. Une analyse plus approfondie s'avère nécessaire pour identifier la durée de malaxage à retenir selon les résultats du TSRST.

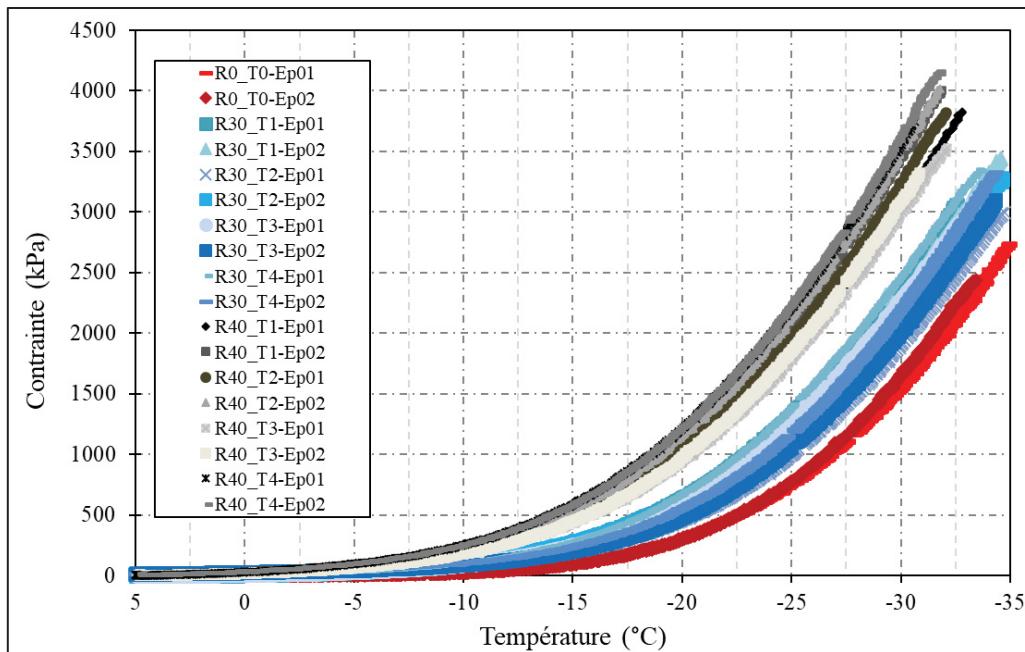


Figure-A III-9 Résultats des essais TSRST des enrobés ESG10 de l'étude

9- Analyse des résultats des essais TSRST

Pour évaluer la sensibilité des enrobés R30 et R40 au temps de malaxage, les températures de transition vitreuse bissectrice (T_g) et les pentes 2 d'évolution de la contrainte en phase linéaire ont été déterminer à partir des résultats montrés à la Figure 9. La moyenne de chaque paramètre des deux essais par mélange a permis d'obtenir les graphiques des Figures 10 et 11. On obtient ainsi, l'évolution des températures de rupture en fonction du temps de malaxage et celle des pentes 2 des contraintes en phase linéaire en fonction du temps de malaxage respectivement. Ces deux figures permettent d'avoir une meilleure visibilité de l'évolution des paramètres sus mentionnées.

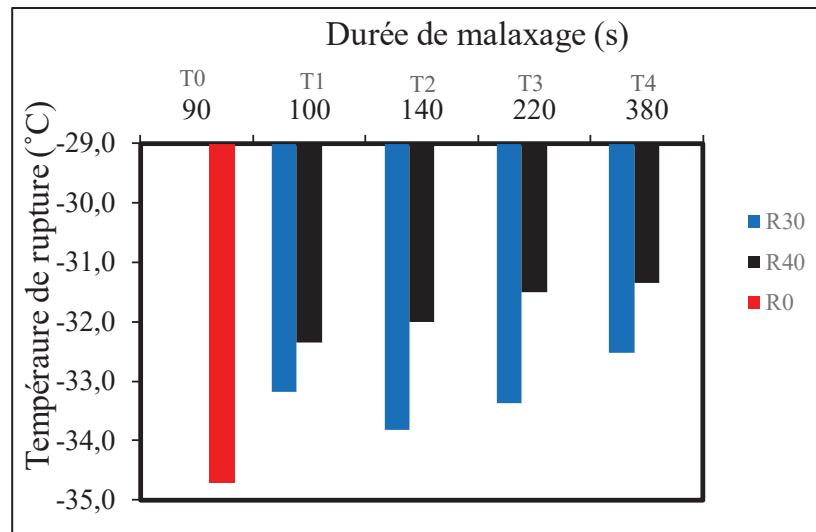


Figure-A III-10 Résultats de l'évolution des températures de rupture

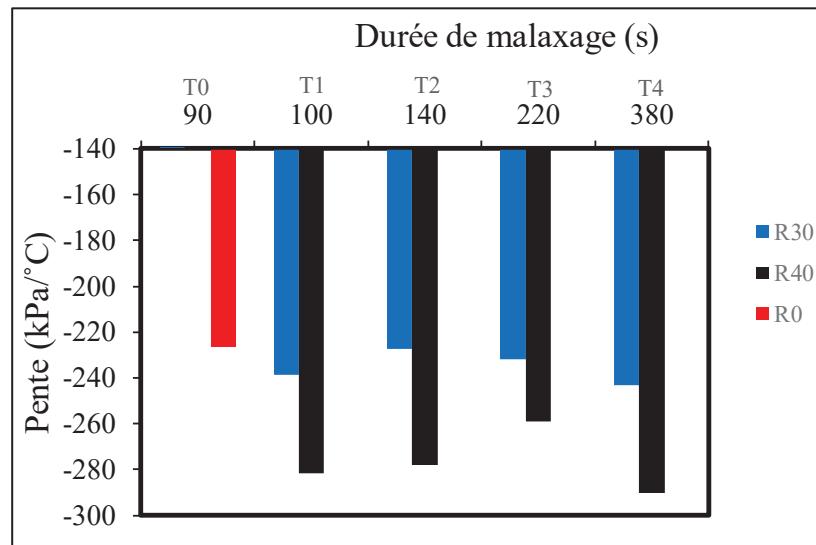


Figure-A III-11 Résultats des pentes des contraintes en phase linéaire

Pour l'enrobé R30, on observe une baisse de la température de rupture entre T1 et T2. Ce qui représente un gain de température de rupture. Cette observation n'était pas attendu. Car l'hypothèse était que la température de rupture augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage. Une explication possible serait que cette observation soit liée à une évolution de l'homogénéité du R30. À T2, l'enrobé est plus homogène qu'à T1, car une plus longue durée de malaxage permet une distribution équitable du bitume d'apport dans l'enrobé. La quantité du bitume d'apport étant plus importante, ces caractéristiques dictent les performances du mélange. On peut ainsi remarquer que la température de rupture à T2 (-33.8 °C) est très proche de celle de l'enrobé R0 (-34.7 °C). Entre les durées T2, T3 et T4, on observe une augmentation de la température de rupture presque linéaire. L'augmentation de la durée de malaxage entre

T2 et T4 entraîne une possible oxydation de l'enrobé tel que l'avait montrée l'analyse des modules complexes. Il faut toutefois signaler que le gain et les pertes de température de rupture observé sont très faibles donc peu significatifs. Le gain est 0.6 °C entre T1 et T2. Les pertes sont de 0.4 °C entre T2 et T3 et de 1.3 °C entre T2 et T4.

L'analyse des pentes 2 de la phase linéaire des contraintes confirment les observations des températures de rupture du R30. En valeur absolue, une pente élevée signifie que l'enrobé est plus susceptible au changement de température. Tel qu'on peut l'observer à la Figure 15, l'enrobé R30 obtenu à T2 est le moins susceptible à la baisse de température suivi de celui obtenu à T3 en étant très proche de l'enrobé à T2. La susceptibilité de l'enrobé R30 à T2 est quasi identique à celle de l'enrobé de référence R0. En valeur absolue, l'enrobé R0 a une pente 2 de 226.4 KPa/°C et le R30 à T2 a une pente 2 de 227.2 KPa/°C.

À T3, on a 231.9 KPa/°C. L'écart entre T2 et T3 est très faible. Ce qui signifie que l'augmentation de la susceptibilité à la baisse de température entre T2 et T3 est négligeable.

Dans le cas de l'enrobé R40, les températures de rupture augmentent avec l'augmentation de la durée de malaxage. L'hypothèse initiale est respectée dans ce cas. Le fait que la quantité de bitume d'apport soit réduit dans le R40, une distribution équitable se fait plus rapidement dans ce dernier. Mais l'enrobé met un peu plus de temps à s'homogénéiser. L'enrobé s'homogénéise complètement à T3 comme en témoigne l'évolution de la pente 2 de la Figure 15. On observe en valeur absolue, une baisse de la pente 2 de T1 à T3 traduisant une diminution de la susceptibilité à la baisse de l'enrobé. Une fois la valeur absolue minimale 259 KPa/°C atteinte, la pente 2 augmente à T4 et atteint 290.1 KPa/°C. Donc après le temps T3, le R40 commence peut-être à s'oxydé.

Au regard de l'analyse des résultats des essais TSRST tout en se fiant à l'évolution de la pente 2 de l'évolution des contraintes en phase linéaire, T2 et T3 sont les temps de malaxage qui permettent d'obtenir les meilleures performances au TSRST pour les mélanges R30 et R40. Pour les raisons mentionnées à la suite de l'analyse des MC, T3 est le temps de malaxage à retenir pour le projet.

ANNEXE IV

RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE

Tableau-A IV-1 Résultats MC R0

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSEES ET MATERIAUX BITUMINEUX		Enrobé Vi (%)	:	R0 6,0	Ep01
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	Φ (°)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
-35	10	32675	0,9	32670	540
-35	3	31931	1,3	31922	752
-35	1	31341	1,8	31326	971
-35	0,3	30669	2,3	30645	1216
-35	0,1	29608	3,0	29567	1537
-35	0,03	28464	3,9	28399	1925
-35	0,01	27183	4,6	27094	2191
-25	10	29321	2,6	29290	1334
-25	3	27976	3,4	27925	1669
-25	1	26588	4,5	26507	2070
-25	0,3	24888	5,7	24767	2454
-25	0,1	23001	7,1	22826	2824
-25	0,03	20845	8,9	20591	3242
-25	0,01	18704	10,5	18392	3396
-15	10	23365	6,4	23220	2597
-15	3	20814	8,4	20592	3030
-15	1	18664	10,3	18362	3343
-15	0,3	16077	13,2	15655	3660
-15	0,1	13514	16,0	12993	3714
-15	0,03	10832	20,1	10173	3717
-15	0,01	8329	24,5	7582	3447
-5	10	14724	14,4	14261	3663
-5	3	11815	18,4	11209	3734
-5	1	9260	22,7	8542	3574
-5	0,3	6640	28,7	5827	3184
-5	0,1	4489	35,1	3671	2583
-5	0,03	2639	42,6	1942	1786
-5	0,01	1517	49,5	986	1153
5	10	6591	29,3	5750	3222
5	3	4289	36,8	3433	2570
5	1	2572	44,7	1828	1809
5	0,3	1348	52,4	824	1068
5	0,1	703	56,8	384	588
5	0,03	337	58,2	178	287
5	0,01	184	54,8	106	150
15	10	1927	49,5	1252	1465
15	3	951	55,7	536	786
15	1	469	59,3	239	404
15	0,3	216	59,7	109	186
15	0,1	110	56,5	61	92
15	0,03	58	52,3	36	46
15	0,01	34	49,8	22	26
24	10	449	61,4	215	395
24	3	198	60,9	96	173
24	1	99	57,7	53	83
24	0,3	51	50,8	33	40
24	0,1	32	42,6	23	21
24	0,03	21	34,7	17	12
24	0,01	17	29,8	15	9
35	10	112	57,6	60	95
35	3	59	47,5	40	44
35	1	39	38,0	31	24
35	0,3	27	28,2	24	13
35	0,1	24	21,8	22	9
35	0,03	22	17,1	21	7
35	0,01	20,8	14,3	20,1	5,2

Tableau-A IV-2 Résultats MC R20

		Enrobé Vi (%)	:	R20 5,1	Ep01
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	ϕ (°)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
-35	10	20351	0,9	20348	317
-35	3	20153	1,2	20147	430
-35	1	19687	1,5	19680	517
-35	0,3	19267	1,8	19257	606
-35	0,1	18808	2,5	18790	809
-35	0,03	18173	2,8	18151	900
-35	0,01	17485	3,5	17450	1074
-25	10	18522	2,3	18505	745
-25	3	17688	2,9	17665	900
-25	1	16986	3,8	16948	1130
-25	0,3	16005	4,5	15955	1257
-25	0,1	15198	6,0	15113	1594
-25	0,03	13888	7,5	13769	1814
-25	0,01	12798	8,2	12668	1818
-15	10	15345	5,7	15268	1521
-15	3	14050	6,9	13949	1677
-15	1	12840	8,3	12705	1851
-15	0,3	11293	10,0	11122	1957
-15	0,1	9962	12,1	9741	2085
-15	0,03	8363	14,8	8083	2142
-15	0,01	6899	17,5	6580	2074
-5	10	10422	11,2	10222	2028
-5	3	8734	14,2	8466	2146
-5	1	7200	17,0	6885	2107
-5	0,3	5650	21,3	5263	2055
-5	0,1	4243	26,2	3806	1874
-5	0,03	2897	31,3	2476	1504
-5	0,01	1964	36,5	1579	1167
5	10	5675	21,1	5294	2044
5	3	4115	26,8	3671	1858
5	1	2834	33,2	2373	1550
5	0,3	1728	40,4	1317	1119
5	0,1	1030	45,8	718	738
5	0,03	574	49,2	375	434
5	0,01	343	50,4	219	264
15	10	2112	37,2	1683	1277
15	3	1227	43,0	897	837
15	1	680	49,2	444	514
15	0,3	358	50,4	228	276
15	0,1	208	49,7	134	159
15	0,03	121	45,9	84	87
15	0,01	76	41,2	57	50

Tableau-A IV-3 Résultats MC R20

LCMB LABORATOIRE SUR LES CHAUSSÉES ET MATERIAUX BITUMINEUX		Enrobé Vi (%)	:	R20 4,8	Ep02
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	ϕ (°)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
-34	10	18348	1,2	18343	391
-34	3	18020	1,3	18014	404
-34	1	17566	2,1	17550	650
-34	0,3	17281	2,2	17268	648
-34	0,1	16591	2,7	16571	795
-34	0,03	15827	4,3	15780	1190
-34	0,01	15024	4,3	14982	1118
-25	10	16312	2,5	16294	700
-25	3	15501	3,3	15473	891
-25	1	14869	4,1	14828	1076
-25	0,3	14207	4,6	14160	1144
-25	0,1	13242	5,9	13172	1355
-25	0,03	11984	7,5	11880	1569
-25	0,01	10995	9,2	10854	1759
-15	10	13497	5,8	13427	1351
-15	3	12143	7,4	12040	1562
-15	1	10945	9,6	10788	1831
-15	0,3	9665	11,0	9488	1839
-15	0,1	8365	13,0	8150	1884
-15	0,03	6907	15,4	6659	1836
-15	0,01	5628	19,0	5321	1833
-5	10	8966	12,3	8760	1912
-5	3	7383	15,0	7130	1913
-5	1	6070	18,3	5764	1903
-5	0,3	4673	22,6	4315	1793
-5	0,1	3409	28,0	3009	1600
-5	0,03	2265	34,1	1875	1270
-5	0,01	1479	38,7	1154	924
5	10	4610	23,5	4228	1837
5	3	3230	29,2	2821	1573
5	1	2166	35,6	1762	1260
5	0,3	1275	42,6	938	864
5	0,1	734	48,2	489	548
5	0,03	394	50,8	249	306
5	0,01	226	50,5	144	175
14	10	1644	39,8	1264	1051
15	3	930	45,7	650	665
15	1	500	51,2	313	390
15	0,3	249	53,6	148	200
15	0,1	140	51,9	86	110
15	0,03	80	48,1	53	59
15	0,01	52	44,7	37	36

Tableau-A IV-4 Résultats MC R30

		Enrobé Vi (%)	:	R30 5,7	Ep01
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	ϕ (°)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
-35	10	34465	1,0	34460	584
-35	3	33694	1,3	33685	763
-35	1	33033	1,4	33023	823
-35	0,3	32182	1,7	32168	952
-35	0,1	31552	2,1	31530	1180
-35	0,03	30533	3,0	30492	1577
-35	0,01	29728	3,6	29668	1891
-25	10	31052	2,2	31029	1202
-25	3	29932	3,1	29890	1598
-25	1	28851	3,7	28790	1880
-25	0,3	27159	4,2	27085	2009
-25	0,1	25814	5,2	25706	2360
-25	0,03	23898	6,5	23745	2697
-25	0,01	22051	7,6	21855	2930
-15	10	25788	5,4	25673	2434
-15	3	23709	6,7	23544	2785
-15	1	21849	7,7	21652	2926
-15	0,3	19556	9,3	19300	3152
-15	0,1	17385	10,8	17080	3245
-15	0,03	14891	12,9	14513	3333
-15	0,01	12558	16,1	12068	3473
-5	10	18255	10,7	17937	3393
-5	3	15658	13,2	15244	3574
-5	1	13238	15,2	12776	3467
-5	0,3	10632	18,5	10081	3379
-5	0,1	8378	22,1	7764	3150
-5	0,03	6116	26,6	5467	2741
-5	0,01	4296	31,9	3649	2267
5	10	10368	20,2	9732	3577
5	3	7709	24,5	7017	3194
5	1	5676	28,7	4978	2726
5	0,3	3785	34,4	3123	2138
5	0,1	2415	40,0	1850	1552
5	0,03	1383	45,6	968	988
5	0,01	796	48,8	525	599
15	10	4358	34,3	3600	2457
15	3	2696	39,7	2073	1723
15	1	1601	45,4	1123	1141
15	0,3	859	49,7	556	655
15	0,1	473	52,2	290	374
15	0,03	246	53,2	148	197
15	0,01	138	52,4	84	110
25	10	1346	48,7	889	1011
25	3	686	52,7	416	546
25	1	367	53,7	218	296
25	0,3	187	53,6	111	150
25	0,1	104	51,5	65	81
25	0,03	59	46,5	40	43
25	0,01	39	42,1	29	26
35	10	385	55,4	219	317
35	3	195	53,5	116	157
35	1	110	48,9	72	83
35	0,3	67	42,2	49	45
35	0,1	46	37,6	36	28
35	0,03	33	32,5	27	17
35	0,01	26,6	25,0	24,1	11,2

Tableau-A IV-5 Résultats MC R30

		Enrobé Vi (%)	:	R30 6,4	Ep02
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	Φ (°)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
-34	10	30045	0,9	30041	460
-34	3	29457	1,3	29449	661
-34	1	29058	1,7	29046	839
-34	0,3	28281	2,2	28259	1093
-34	0,1	27588	2,6	27559	1241
-34	0,03	26630	3,1	26590	1438
-34	0,01	25435	4,0	25374	1756
-25	10	26947	2,5	26921	1167
-25	3	25824	3,2	25785	1426
-25	1	24838	4,1	24775	1770
-25	0,3	23381	5,0	23292	2026
-25	0,1	21911	6,0	21792	2271
-25	0,03	20222	7,2	20063	2521
-25	0,01	18393	8,8	18177	2802
-15	10	21904	5,7	21796	2170
-15	3	20128	7,0	19980	2437
-15	1	18334	8,2	18145	2628
-15	0,3	16311	10,2	16055	2880
-15	0,1	14210	12,1	13892	2987
-15	0,03	11967	14,8	11568	3064
-15	0,01	9829	17,9	9354	3020
-5	10	15230	11,4	14929	3010
-5	3	12776	13,9	12404	3062
-5	1	10686	16,8	10231	3087
-5	0,3	8348	20,6	7817	2931
-5	0,1	6383	24,7	5797	2670
-5	0,03	4450	30,3	3842	2245
-5	0,01	3038	35,5	2473	1763
5	10	8392	21,1	7830	3021
5	3	6148	25,7	5538	2670
5	1	4309	31,3	3683	2237
5	0,3	2730	37,9	2155	1676
5	0,1	1675	43,1	1222	1146
5	0,03	922	48,5	611	691
5	0,01	525	50,4	335	405
15	10	3386	35,8	2747	1980
15	3	2030	42,1	1507	1360
15	1	1167	47,4	790	859
15	0,3	602	51,5	375	471
15	0,1	326	53,3	195	261
15	0,03	171	51,9	105	134
15	0,01	97	49,9	62	74
24	10	1002	50,2	642	770
24	3	504	54,3	294	409
24	1	262	55,5	148	216
24	0,3	129	54,8	74	106
24	0,1	71	51,3	44	55
24	0,03	39	49,6	25	29
24	0,01	25	46,8	17	18
35	10	241	57,5	130	203
35	3	115	54,9	66	94
35	1	64	50,3	41	49
35	0,3	36	44,2	26	25
35	0,1	24	36,5	19	14
35	0,03	17	31,1	15	9
35	0,01	14,9	24,4	13,5	6,2

Tableau-A IV-6 Résultats MC R40

		Enrobé : Vi (%)		R40 : 5,5	Ep01	
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	ϕ (%)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)	
-34	10	31967	0,9	31962	485	
-34	3	31356	1,2	31347	682	
-34	1	30716	1,5	30705	802	
-34	0,3	30176	2,0	30156	1059	
-34	0,1	29249	2,6	29218	1329	
-34	0,03	28327	3,1	28283	1552	
-34	0,01	27180	3,8	27118	1808	
-25	10	29041	2,4	29015	1196	
-25	3	27750	3,0	27710	1465	
-25	1	26681	3,8	26623	1751	
-25	0,3	25324	4,5	25244	2002	
-25	0,1	23836	5,5	23726	2283	
-25	0,03	22238	6,7	22086	2592	
-25	0,01	20282	7,7	20099	2719	
-15	10	23913	5,3	23809	2203	
-15	3	21990	6,4	21854	2441	
-15	1	20193	7,7	20013	2695	
-15	0,3	18001	9,2	17768	2883	
-15	0,1	16011	11,0	15718	3047	
-15	0,03	13662	13,5	13282	3197	
-15	0,01	11514	16,2	11058	3207	
-5	10	17097	10,3	16822	3054	
-5	3	14558	12,7	14201	3201	
-5	1	12347	15,3	11908	3261	
-5	0,3	9845	18,6	9332	3135	
-5	0,1	7705	22,7	7106	2979	
-5	0,03	5561	27,2	4945	2543	
-5	0,01	3965	31,6	3376	2079	
5	10	9744	19,5	9183	3256	
5	3	7349	23,6	6733	2945	
5	1	5306	28,7	4655	2546	
5	0,3	3514	34,3	2902	1983	
5	0,1	2252	39,4	1740	1429	
5	0,03	1320	44,1	947	919	
5	0,01	769	47,3	521	565	
15	10	4238	33,3	3543	2324	
15	3	2634	39,2	2041	1664	
15	1	1584	44,3	1135	1106	
15	0,3	858	48,7	567	644	
15	0,1	473	51,2	297	369	
15	0,03	248	51,4	155	194	
15	0,01	144	49,7	93	110	
24	10	1464	46,7	1004	1066	
24	3	769	51,3	481	601	
24	1	413	52,9	249	329	
24	0,3	209	52,4	128	166	
24	0,1	115	50,5	73	89	
24	0,03	68	44,2	49	47	
24	0,01	44	38,5	34	27	
35	10	376	54,5	219	306	
35	3	188	52,0	116	148	
35	1	106	47,8	71	79	
35	0,3	63	40,2	48	41	
35	0,1	44	33,1	37	24	
35	0,03	33	29,1	29	16	
35	0,01	28,7	26,4	25,7	12,7	

Tableau-A IV-7 Résultats MC R40

		Enrobé : Vi (%)		R40 : 6,1		Ep02	
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	Φ (°)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)		
-36	10	32033	0,7	32031	383		
-36	3	31391	1,3	31382	710		
-36	1	30844	1,4	30835	735		
-36	0,3	30279	1,8	30264	975		
-36	0,1	29728	2,2	29706	1129		
-36	0,03	28915	3,0	28876	1496		
-36	0,01	27830	3,4	27782	1646		
-25	10	29328	2,2	29306	1148		
-25	3	28154	2,6	28125	1268		
-25	1	27202	3,3	27156	1576		
-25	0,3	25943	3,9	25882	1780		
-25	0,1	24658	5,0	24565	2140		
-25	0,03	22943	5,7	22828	2296		
-25	0,01	21359	6,7	21213	2498		
-15	10	24507	4,7	24423	2027		
-15	3	22798	6,0	22674	2372		
-15	1	21138	6,8	20989	2502		
-15	0,3	19148	8,3	18949	2755		
-15	0,1	17314	9,4	17080	2839		
-15	0,03	15144	10,9	14872	2857		
-15	0,01	13171	13,0	12833	2964		
-5	10	17903	9,2	17671	2870		
-5	3	15618	10,9	15338	2940		
-5	1	13509	12,8	13175	2986		
-5	0,3	11210	15,4	10810	2970		
-5	0,1	9168	18,0	8721	2829		
-5	0,03	7179	21,7	6671	2652		
-5	0,01	5384	25,9	4841	2355		
5	10	10917	16,6	10465	3110		
5	3	8506	20,1	7990	2917		
5	1	6572	24,0	6004	2671		
5	0,3	4673	28,5	4109	2227		
5	0,1	3227	33,1	2703	1764		
5	0,03	2021	38,1	1591	1247		
5	0,01	1267	42,0	941	848		
15	10	5142	28,3	4526	2441		
15	3	3429	33,6	2855	1899		
15	1	2192	38,6	1714	1367		
15	0,3	1286	43,5	933	886		
15	0,1	752	47,3	510	553		
15	0,03	414	49,8	267	316		
15	0,01	240	50,3	153	184		
25	10	1788	42,4	1321	1204		
25	3	1005	46,8	689	732		
25	1	568	49,7	367	434		
25	0,3	301	51,4	188	235		
25	0,1	167	51,3	105	130		
25	0,03	92	50,2	59	71		
25	0,01	56	46,7	39	41		
35	10	556	51,7	345	436		
35	3	287	52,1	177	227		
35	1	160	50,4	102	124		
35	0,3	90	46,4	62	65		
35	0,1	57	41,8	42	38		
35	0,03	38	36,7	30	23		
35	0,01	28,6	28,9	25,1	13,8		

Tableau-A IV-8 Résultats MC R60

		Enrobé : Vi (%)		R60 : 3,5		Ep01
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	ϕ (°)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)	
-34	10	37518	0,6	37516	380	
-34	3	36517	1,1	36510	690	
-34	1	35988	1,7	35971	1091	
-34	0,3	35139	2,1	35115	1295	
-34	0,1	34347	2,5	34314	1487	
-34	0,03	33309	2,9	33265	1707	
-34	0,01	31964	3,3	31909	1845	
-24	10	34219	2,0	34197	1189	
-24	3	32654	2,7	32618	1523	
-24	1	31454	3,4	31399	1843	
-24	0,3	30078	4,0	30004	2102	
-24	0,1	28494	5,1	28382	2518	
-24	0,03	26772	5,6	26644	2610	
-24	0,01	24787	6,4	24633	2745	
-14	10	28761	4,4	28675	2223	
-14	3	26923	5,4	26802	2556	
-14	1	25069	6,5	24907	2840	
-14	0,3	22855	7,8	22645	3086	
-14	0,1	20696	8,9	20445	3211	
-14	0,03	18241	11,0	17908	3465	
-14	0,01	15886	12,7	15498	3490	
-4	10	21637	8,6	21394	3231	
-4	3	18914	10,4	18600	3429	
-4	1	16531	12,4	16145	3551	
-4	0,3	13879	15,0	13406	3591	
-4	0,1	11421	18,0	10861	3535	
-4	0,03	8867	21,7	8241	3272	
-4	0,01	6723	25,9	6046	2938	
6	10	13613	15,7	13103	3692	
6	3	10873	19,6	10245	3641	
6	1	8387	23,6	7685	3359	
6	0,3	6028	28,4	5302	2867	
6	0,1	4164	33,4	3475	2294	
6	0,03	2639	39,0	2050	1662	
6	0,01	1598	43,6	1157	1102	
15	10	6976	27,3	6199	3201	
15	3	4686	32,8	3940	2535	
15	1	3040	38,8	2370	1903	
15	0,3	1779	44,6	1266	1250	
15	0,1	1022	49,1	669	773	
15	0,03	536	52,3	328	424	
15	0,01	293	53,6	174	236	
25	10	2732	41,3	2053	1802	
25	3	1524	47,5	1029	1124	
25	1	853	51,4	532	667	
25	0,3	434	54,1	254	352	
25	0,1	234	54,2	137	190	
25	0,03	121	52,5	74	96	
25	0,01	71	47,9	48	53	
35	10	797	53,3	477	639	
35	3	397	54,8	229	325	
35	1	216	52,8	131	172	
35	0,3	116	48,7	77	87	
35	0,1	75	41,7	56	50	
35	0,03	51	34,1	42	28	
35	0,01	42,0	28,0	37,0	19,7	

Tableau-A IV-9 Résultats MC R60

		Enrobé : Vi (%)		R60 : 4,3		Ep02	
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	ϕ (°)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)		
-34	10	36818	0,6	36815	383		
-34	3	36236	1,5	36223	943		
-34	1	35536	1,3	35527	808		
-34	0,3	35086	2,1	35062	1281		
-34	0,1	34499	2,3	34470	1390		
-34	0,03	33581	2,7	33542	1589		
-34	0,01	32454	3,2	32403	1806		
-25	10	34495	2,1	34470	1280		
-25	3	33104	2,4	33073	1413		
-25	1	32182	3,1	32134	1744		
-25	0,3	30784	3,7	30718	1995		
-25	0,1	29413	4,3	29331	2185		
-25	0,03	27711	5,3	27592	2542		
-25	0,01	25951	6,2	25800	2786		
-15	10	28793	4,1	28717	2081		
-15	3	27111	5,0	27006	2377		
-15	1	25526	5,6	25403	2505		
-15	0,3	23623	6,9	23452	2835		
-15	0,1	21582	7,9	21376	2967		
-15	0,03	19333	9,5	19069	3179		
-15	0,01	17132	11,4	16794	3383		
-5	10	22443	7,8	22235	3041		
-5	3	19971	9,2	19712	3203		
-5	1	17739	10,8	17423	3331		
-5	0,3	15132	12,9	14750	3382		
-5	0,1	12717	15,3	12263	3365		
-5	0,03	10215	18,6	9681	3260		
-5	0,01	7960	21,9	7385	2970		
5	10	14639	13,9	14210	3516		
5	3	11911	16,7	11407	3429		
5	1	9494	20,3	8903	3299		
5	0,3	7024	24,4	6399	2897		
5	0,1	5098	28,9	4462	2465		
5	0,03	3395	34,3	2804	1913		
5	0,01	2251	38,4	1763	1399		
15	10	7661	23,9	7005	3101		
15	3	5406	28,7	4742	2595		
15	1	3530	35,0	2891	2025		
15	0,3	2150	40,8	1628	1404		
15	0,1	1296	44,7	921	912		
15	0,03	791	45,6	553	565		
15	0,01	484	45,3	340	344		
25	10	3162	36,1	2556	1861		
25	3	1904	41,1	1434	1252		
25	1	1131	44,6	806	793		
25	0,3	633	45,5	444	452		
25	0,1	385	44,2	276	268		
25	0,03	238	41,5	178	157		
25	0,01	158	37,6	125	97		
35	10	823	47,4	558	605		
35	3	449	46,8	308	327		
35	1	267	44,9	189	188		
35	0,3	163	40,5	124	106		
35	0,1	108	36,7	86	64		
35	0,03	74	34,1	61	41		
35	0,01	46,3	35,8	37,6	27,0		

Tableau-A IV-10 Résultats MC R80

		Enrobé : Vi (%)		R80 : 3,2		Ep01
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	φ (%)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)	
-34	10	39705	0,6	39702	426	
-34	3	39091	0,9	39085	630	
-34	1	38520	1,3	38510	853	
-34	0,3	37560	1,9	37537	1254	
-34	0,1	36830	2,0	36807	1266	
-34	0,03	35687	2,2	35661	1361	
-34	0,01	34744	3,2	34688	1938	
-24	10	36317	1,7	36300	1076	
-24	3	35371	2,1	35346	1308	
-24	1	34329	2,8	34288	1662	
-25	0,3	32982	3,2	32930	1842	
-24	0,1	31730	4,0	31651	2222	
-24	0,03	29879	4,3	29794	2247	
-24	0,01	28358	5,3	28234	2640	
-15	10	31781	3,7	31716	2024	
-15	3	29971	4,4	29883	2290	
-15	1	28296	5,1	28182	2539	
-15	0,3	26354	6,1	26205	2800	
-15	0,1	24411	6,9	24235	2925	
-15	0,03	22103	8,1	21880	3122	
-15	0,01	19880	9,5	19604	3297	
-5	10	25043	6,5	24880	2855	
-5	3	22572	7,9	22360	3088	
-5	1	20232	9,3	19964	3281	
-5	0,3	17713	10,9	17395	3341	
-5	0,1	15377	13,0	14980	3468	
-5	0,03	12859	15,1	12414	3350	
-5	0,01	10537	18,2	10011	3287	
5	10	17438	11,7	17078	3524	
5	3	14732	13,9	14299	3547	
5	1	12236	16,9	11707	3558	
5	0,3	9616	20,3	9021	3330	
5	0,1	7429	24,1	6784	3028	
5	0,03	5296	28,3	4661	2514	
5	0,01	3672	32,9	3082	1996	
15	10	10142	20,4	9508	3529	
15	3	7550	24,4	6876	3118	
15	1	5524	29,1	4825	2690	
15	0,3	3699	34,2	3061	2077	
15	0,1	2390	38,8	1862	1497	
15	0,03	1392	44,2	998	970	
15	0,01	820	46,8	561	598	
25	10	4930	31,8	4187	2600	
25	3	3128	37,7	2477	1911	
24	1	1959	42,3	1450	1318	
25	0,3	1112	45,3	782	791	
25	0,1	653	46,6	449	475	
25	0,03	363	46,7	249	264	
25	0,01	218	45,3	153	155	
35	10	1711	45,4	1202	1217	
35	3	928	48,8	611	699	
35	1	539	48,9	354	405	
35	0,3	294	46,8	201	215	
35	0,1	180	42,8	132	122	
35	0,03	116	37,3	93	71	
35	0,01	85,4	32,7	71,9	46,2	

Tableau-A IV-11 Résultats MC R80

		Enrobé : Vi (%)		R80 : 3,0		Ep02
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	Φ (°)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)	
-34	10	40830	0,8	40824	580	
-34	3	40380	1,3	40365	904	
-34	1	39656	1,4	39643	983	
-34	0,3	38914	1,5	38901	991	
-34	0,1	37936	2,2	37908	1430	
-34	0,03	36464	2,6	36426	1623	
-34	0,01	35082	3,1	35029	1906	
-24	10	37552	2,8	37482	1839	
-24	3	36725	4,1	36590	2678	
-24	1	34975	3,1	34909	1930	
-24	0,3	35351	3,1	35298	1901	
-24	0,1	33020	4,0	32936	2318	
-24	0,03	30738	4,4	30647	2342	
-24	0,01	29262	5,2	29139	2667	
-15	10	32590	2,5	32546	1456	
-15	3	31003	3,5	30933	1923	
-15	1	28617	5,2	28488	2583	
-15	0,3	26579	5,4	26459	2494	
-15	0,1	24745	6,7	24576	2867	
-15	0,03	22565	8,3	22325	3272	
-15	0,01	20303	9,8	20006	3461	
-5	10	25804	5,0	25687	2245	
-5	3	23666	7,5	23460	3074	
-5	1	21183	8,1	20965	3007	
-5	0,3	18613	10,6	18295	3426	
-5	0,1	16016	12,3	15645	3421	
-5	0,03	13349	15,0	12895	3452	
-5	0,01	11076	17,3	10578	3285	
5	10	18241	11,1	17895	3509	
5	3	15438	14,0	14973	3745	
5	1	12895	15,3	12436	3405	
5	0,3	10372	18,0	9862	3212	
5	0,1	8049	22,1	7459	3021	
5	0,03	5854	25,5	5281	2524	
5	0,01	4289	28,8	3756	2070	
15	10	10393	17,9	9887	3189	
15	3	7817	22,4	7224	2981	
15	1	5862	25,8	5273	2553	
15	0,3	3920	30,5	3377	1991	
15	0,1	2521	35,3	2057	1456	
15	0,03	1564	38,4	1226	971	
15	0,01	1013	39,3	783	641	
25	10	5064	28,6	4445	2424	
25	3	3214	33,8	2669	1789	
25	1	1825	41,8	1362	1216	
25	0,3	1067	44,8	757	752	
25	0,1	662	45,7	462	474	
25	0,03	406	44,5	290	284	
25	0,01	270	43,1	197	184	
35	10	1958	38,6	1529	1222	
35	3	1007	44,3	721	703	
35	1	581	45,9	404	417	
35	0,3	337	44,9	239	238	
35	0,1	216	42,5	159	146	
35	0,03	144	39,4	111	91	
35	0,01	99,7	38,3	78,1	61,8	

Tableau-A IV-12 Résultats MC R100

		Enrobé : Vi (%)		R100 : 5,2		Ep01	
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E* (Mpa)	ϕ (%)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)		
-35	0,01	30553	1,7	30539	913		
-35	0,03	31663	2,0	31643	1130		
-35	0,1	31897	1,6	31884	910		
-35	0,3	32207	1,7	32193	934		
-35	1,0	32995	1,0	32990	551		
-35	3	33594	0,9	33591	503		
-35	10	33984	0,5	33982	321		
-25	0,01	26466	3,4	26419	1588		
-25	0,03	27434	3,5	27384	1656		
-25	0,1	28670	2,8	28635	1408		
-25	0,3	29337	2,6	29307	1337		
-25	1,0	30271	2,2	30250	1147		
-25	3	31162	1,8	31147	962		
-25	10	31791	2,0	31772	1105		
-15	0,01	20695	6,1	20576	2216		
-15	0,03	22230	5,5	22126	2144		
-15	0,1	23731	4,4	23661	1828		
-15	0,3	24950	3,9	24894	1684		
-15	1,0	26024	3,4	25977	1555		
-15	3	27080	3,1	27040	1469		
-15	10	28641	3,0	28602	1483		
-5	0,01	13949	9,9	13742	2394		
-5	0,03	15646	8,4	15478	2292		
-5	0,1	17330	7,7	17173	2331		
-5	0,3	18864	6,7	18736	2197		
-5	1,0	20442	6,0	20331	2123		
-5	3	21898	5,6	21792	2149		
-5	10	23535	4,5	23462	1849		
5	0,01	8102	16,4	7774	2281		
5	0,03	9785	13,6	9510	2302		
5	0,1	11519	11,4	11291	2284		
5	0,3	13116	10,7	12887	2441		
5	1,0	14766	8,9	14590	2276		
5	3	16424	8,3	16253	2364		
5	10	18194	7,5	18038	2378		
15	0,01	3544	26,2	3179	1565		
15	0,03	4774	22,7	4403	1843		
15	0,1	6239	19,4	5884	2076		
15	0,3	7717	17,0	7381	2253		
15	1,0	9407	14,3	9116	2325		
15	3	11062	12,7	10791	2437		
15	10	12959	10,9	12724	2454		
25	0,01	1140	37,5	905	694		
25	0,03	1736	34,1	1438	973		
25	0,1	2631	30,1	2276	1321		
25	0,3	3704	26,3	3319	1643		
25	1,0	5084	22,7	4690	1963		
25	3	6496	19,7	6115	2193		
25	10	8316	16,7	7964	2394		
35	0,03	484	43,2	352	331		
35	0,10	817	40,6	620	532		
35	0,3	1300	37,5	1031	792		
35	1,0	2076	33,6	1728	1149		
35	3,0	3017	30,1	2609	1515		
35	10	4364	26,2	3915	1926		
35							

ANNEXE V

RÉSULTATS DES ESSAIS TSRST

Tableau-A V-1 Résultats TSRST R0

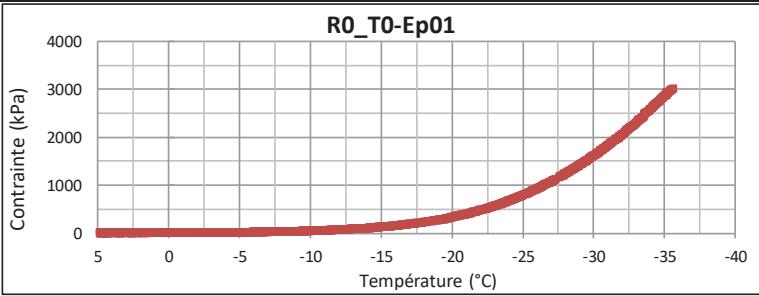
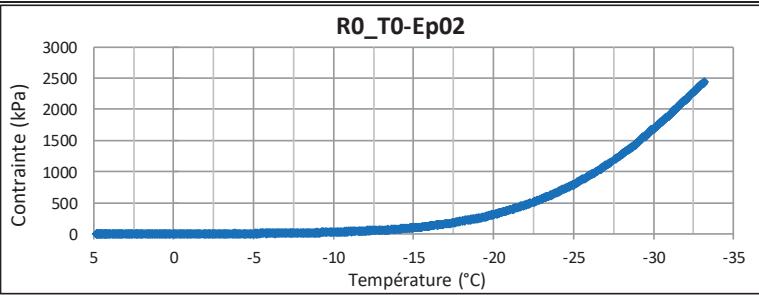
 ÉTS Le génie pour l'industrie	Détermination de la résistance au retrait thermique empêché (AASHTO TP10-93)				AQ-220																																									
#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques																																									
RO_T0-Ep01	-36,0	2516	7554	3002	Rupture à 10mm du haut																																									
RO_T0-Ep02	-33,4	2516	6137	2439	Rupture non observée																																									
MOY	-34,7	2516	6845	2720																																										
TSRSTS RO_T0-Ep01	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Diamètre (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>56,63</td><td>56,60</td><td>56,58</td></tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">56,60</td></tr> <tr> <th colspan="3">Longueur (mm)</th> </tr> <tr> <td>251,04</td><td>250,94</td><td>250,65</td></tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">250,88</td></tr> </tbody> </table>			Diamètre (mm)			56,63	56,60	56,58	56,60			Longueur (mm)			251,04	250,94	250,65	250,88			 <p>RO_T0-Ep01</p> <p>Contrainte (kPa) vs Température (°C). The curve shows a sharp increase in stress starting around -25°C.</p> <table border="1" style="margin-top: 10px; width: 100%;"> <thead> <tr> <th>Température (°C)</th> <th>Contrainte (kPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>-5</td><td>0</td></tr> <tr><td>-10</td><td>0</td></tr> <tr><td>-15</td><td>0</td></tr> <tr><td>-20</td><td>0</td></tr> <tr><td>-25</td><td>0</td></tr> <tr><td>-30</td><td>1000</td></tr> <tr><td>-32</td><td>2000</td></tr> <tr><td>-34</td><td>3000</td></tr> <tr><td>-36</td><td>3500</td></tr> </tbody> </table>	Température (°C)	Contrainte (kPa)	5	0	0	0	-5	0	-10	0	-15	0	-20	0	-25	0	-30	1000	-32	2000	-34	3000	-36	3500
Diamètre (mm)																																														
56,63	56,60	56,58																																												
56,60																																														
Longueur (mm)																																														
251,04	250,94	250,65																																												
250,88																																														
Température (°C)	Contrainte (kPa)																																													
5	0																																													
0	0																																													
-5	0																																													
-10	0																																													
-15	0																																													
-20	0																																													
-25	0																																													
-30	1000																																													
-32	2000																																													
-34	3000																																													
-36	3500																																													
TSRSTS RO_T0-Ep02	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Diamètre (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>56,60</td><td>56,61</td><td>56,59</td></tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">56,60</td></tr> <tr> <th colspan="3">Longueur (mm)</th> </tr> <tr> <td>250,53</td><td>250,26</td><td>250,42</td></tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">250,40</td></tr> </tbody> </table>			Diamètre (mm)			56,60	56,61	56,59	56,60			Longueur (mm)			250,53	250,26	250,42	250,40			 <p>RO_T0-Ep02</p> <p>Contrainte (kPa) vs Température (°C). The curve shows a sharp increase in stress starting around -25°C.</p> <table border="1" style="margin-top: 10px; width: 100%;"> <thead> <tr> <th>Température (°C)</th> <th>Contrainte (kPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>-5</td><td>0</td></tr> <tr><td>-10</td><td>0</td></tr> <tr><td>-15</td><td>0</td></tr> <tr><td>-20</td><td>0</td></tr> <tr><td>-25</td><td>0</td></tr> <tr><td>-30</td><td>1000</td></tr> <tr><td>-32</td><td>2000</td></tr> <tr><td>-34</td><td>2500</td></tr> </tbody> </table>	Température (°C)	Contrainte (kPa)	5	0	0	0	-5	0	-10	0	-15	0	-20	0	-25	0	-30	1000	-32	2000	-34	2500		
Diamètre (mm)																																														
56,60	56,61	56,59																																												
56,60																																														
Longueur (mm)																																														
250,53	250,26	250,42																																												
250,40																																														
Température (°C)	Contrainte (kPa)																																													
5	0																																													
0	0																																													
-5	0																																													
-10	0																																													
-15	0																																													
-20	0																																													
-25	0																																													
-30	1000																																													
-32	2000																																													
-34	2500																																													

Tableau-A V-2 Résultats TSRST R20

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
R20 Ep1	-34,6	2572	6106	2374	Rupture
R20 Ep2	-33,2	2572	5523	2147	Rupture
MOY	-33,9	2572	5814	2261	

TSRSTS	R20 Ep1		
Diamètre (mm)			
57,20	57,24	57,23	
57,22			
Longueur (mm)			
237,05	236,61	236,84	
236,83			

R20 Ep1

TSRSTS	R20 Ep2		
Diamètre (mm)			
57,25	57,21	57,23	
57,23			
Longueur (mm)			
236,19	236,09	235,87	
236,05			

R20 Ep2

Tableau-A V-3 Résultats TSRST R30

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
R30-Ep01	-33,8	2516	7981	3172	Rupture
R30-Ep02	-34,7	2518	7781	3091	Rupture
MOY	-34,2	2517	7881	3131	

TSRSTS	R30-Ep01		
Diamètre (mm)			
56,60	56,63	56,58	
56,60			
Longueur (mm)			
251,58	251,36	251,14	
251,36			

R30-Ep01

TSRSTS	R30-Ep02		
Diamètre (mm)			
56,63	56,65	56,57	
56,62			
Longueur (mm)			
251,44	251,25	251,67	
251,45			

R30-Ep02

Tableau-A V-4 Résultats TSRST R40

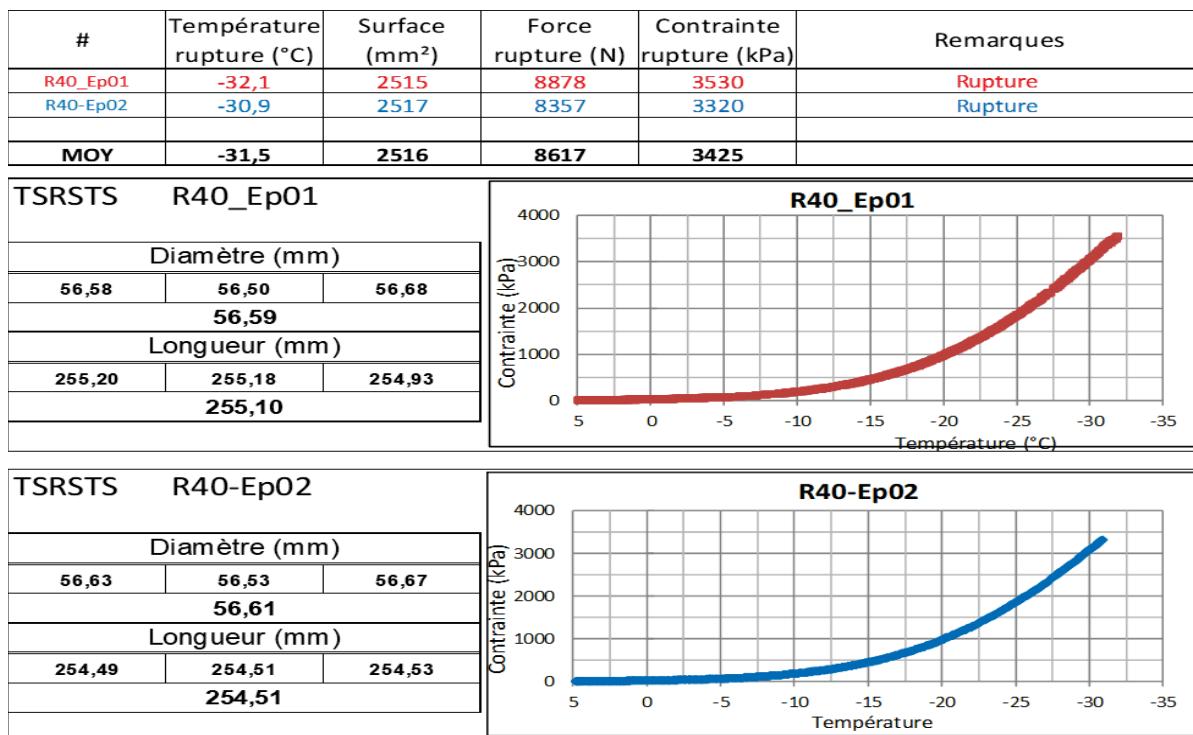


Tableau-A V-5 Résultats TSRST R60

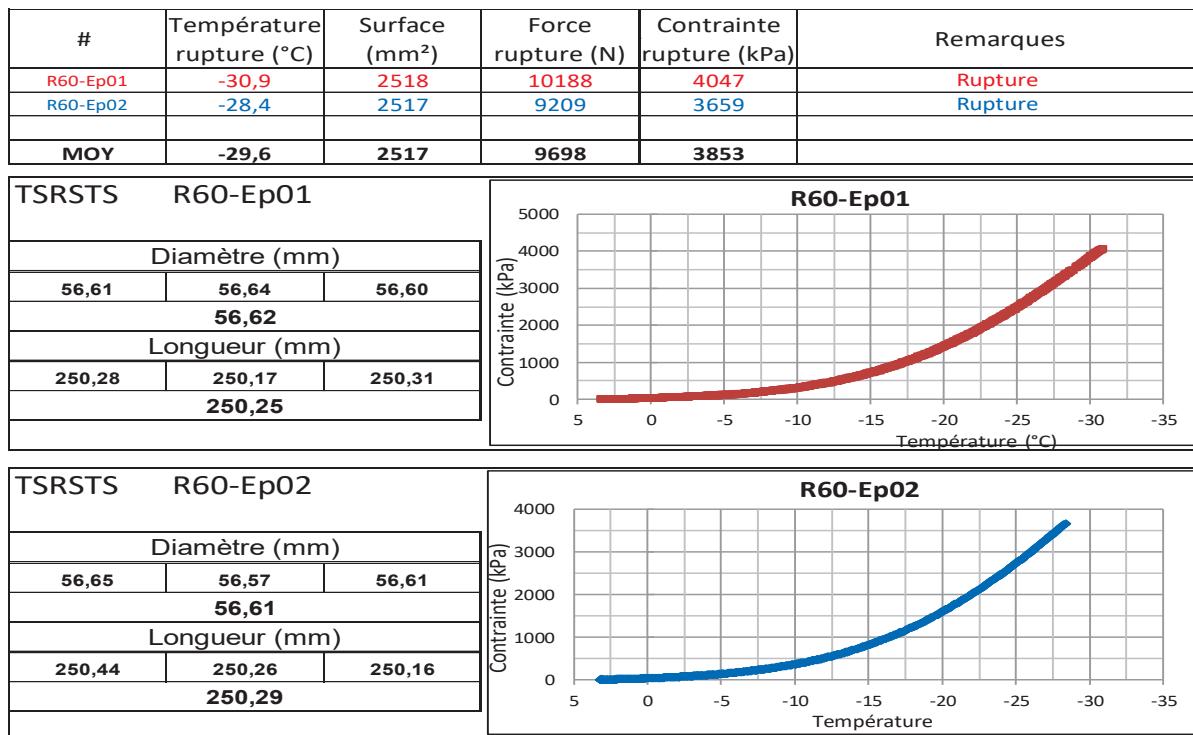


Tableau-A V-6 Résultats TSRST R80

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
R80-Ep01	-28,6	2538	11050	4354	Rupture
R80-Ep02	-25,2	2537	8602	3391	Rupture
MOY	-26,9	2537	9826	3872	

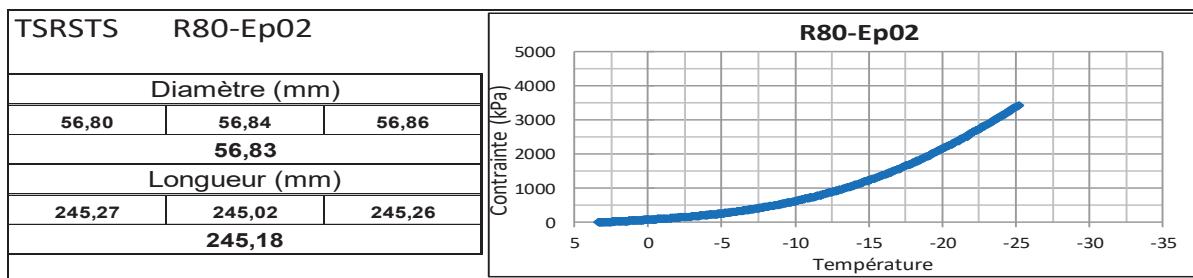
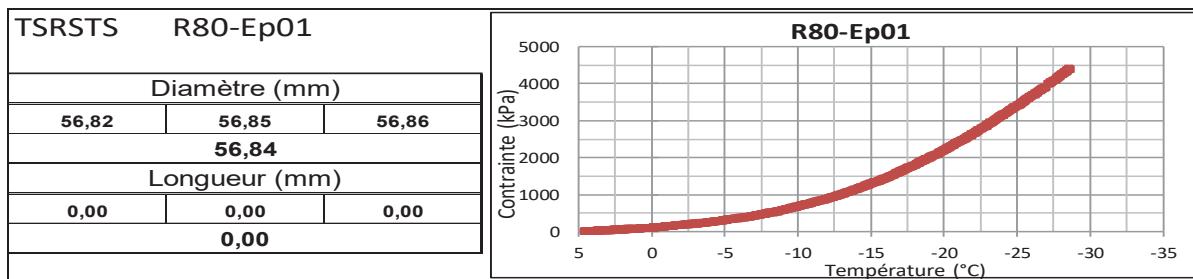
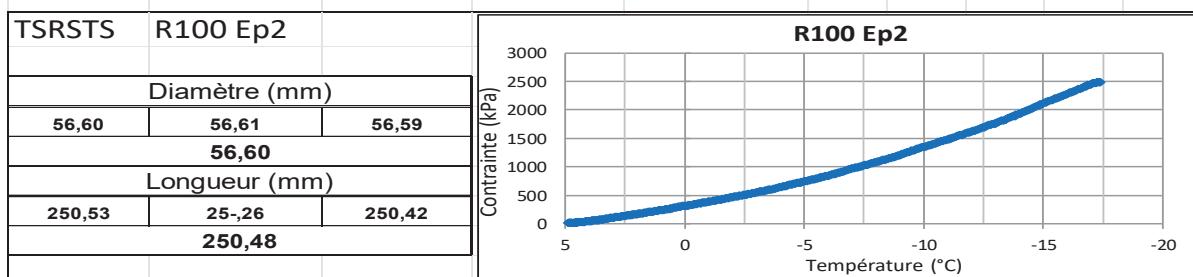
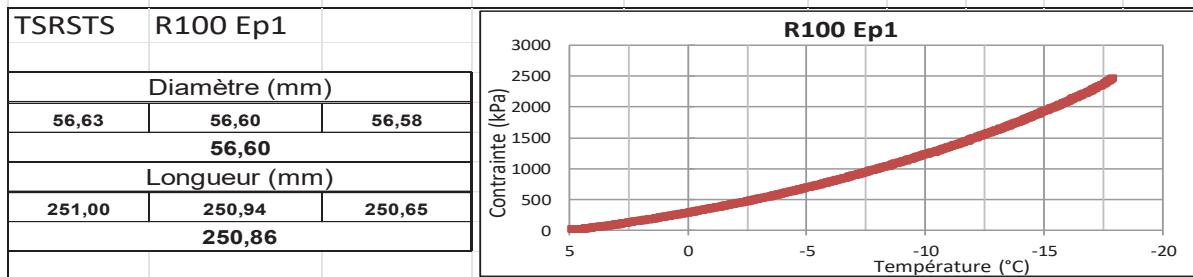


Tableau-A V-7 Résultats TSRST R100

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
R100 Ep1	-17,9	2516	6200	2464	Rupture
R100 Ep2	-17,4	2516	6263	2489	Rupture
MOY	-17,6	2516	6232	2477	



ANNEXE VI

RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION DIRECTE

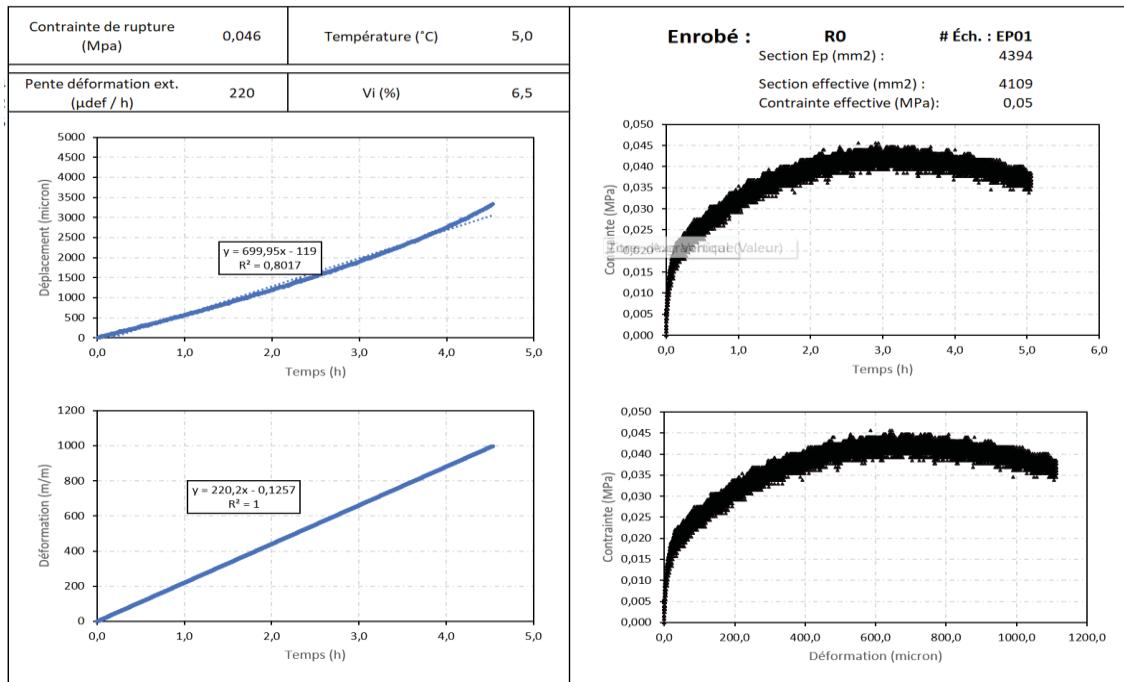


Figure-A VI-1 Résultats essais TD R0 à 5 °C

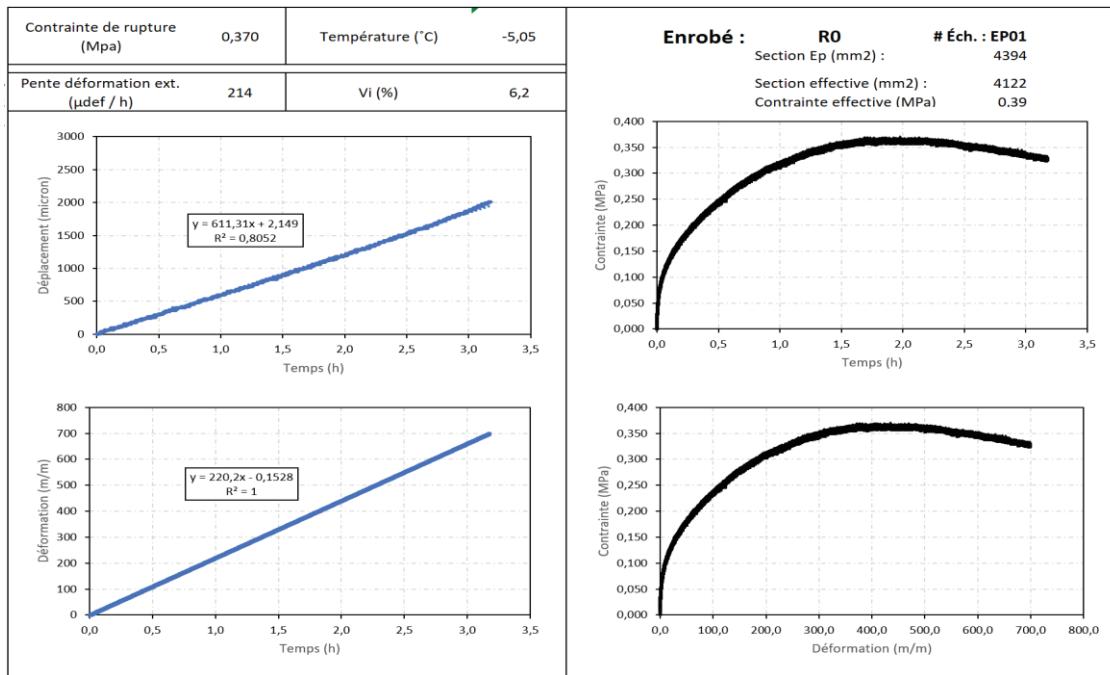


Figure-A VI-2 Résultats essais TD R0 à -5 °C

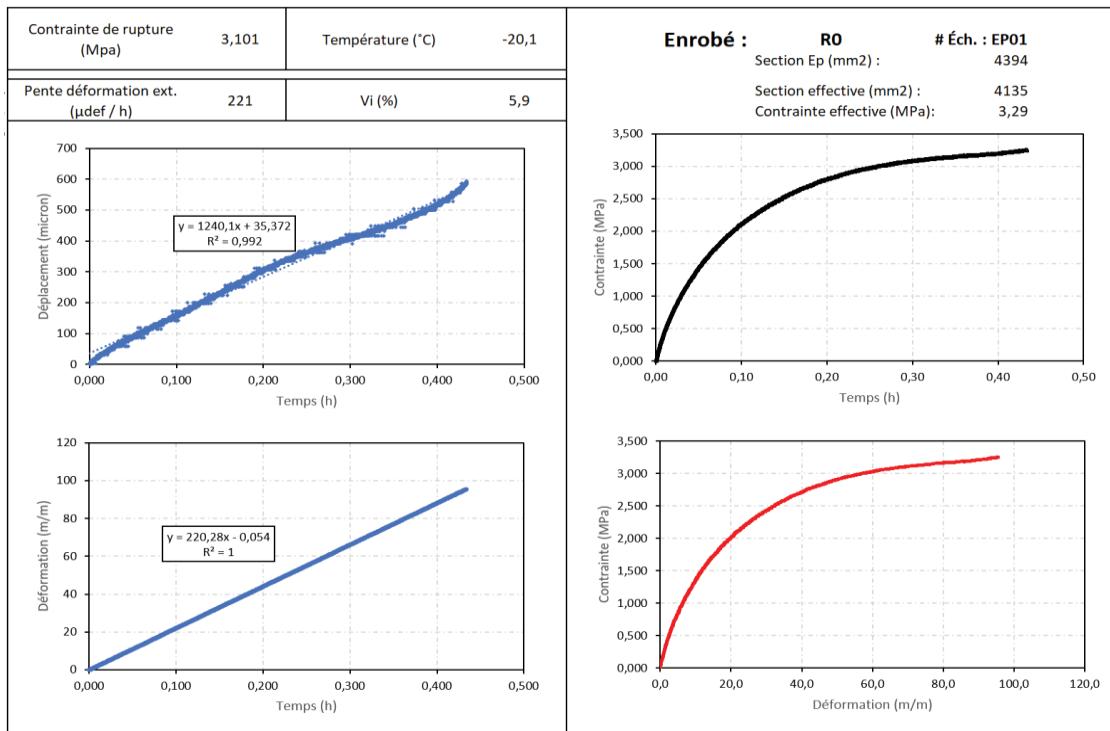


Figure-A VI-3 Résultats essais TD R0 à -20 °C

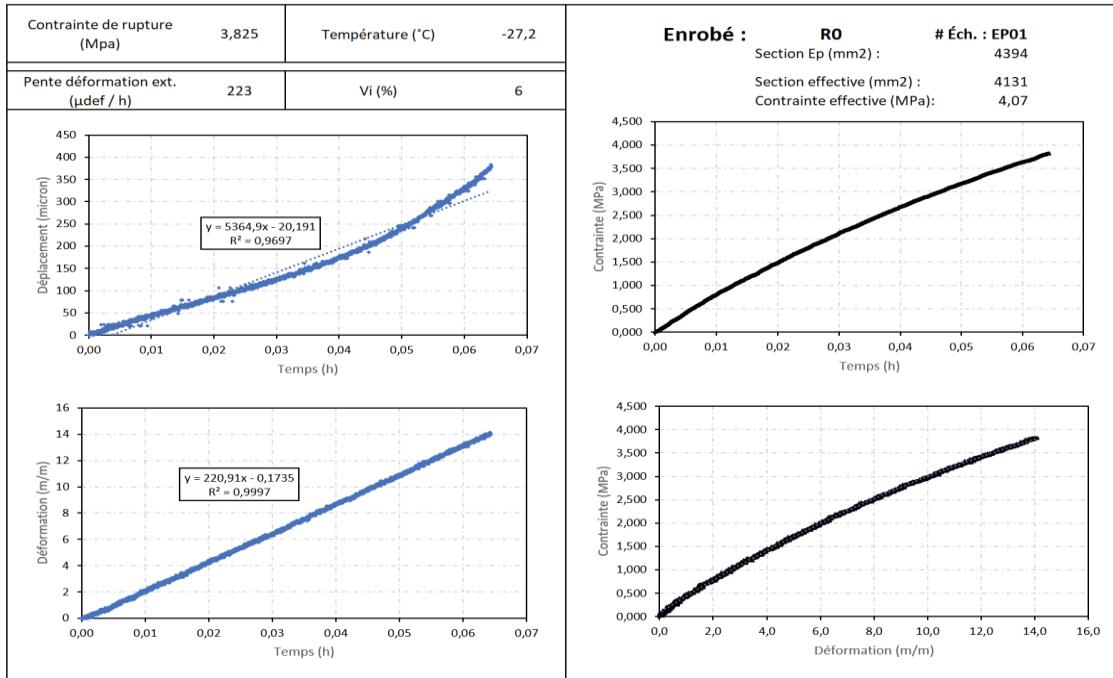


Figure-A VI-4 Résultats essais TD R0 à -27 °C

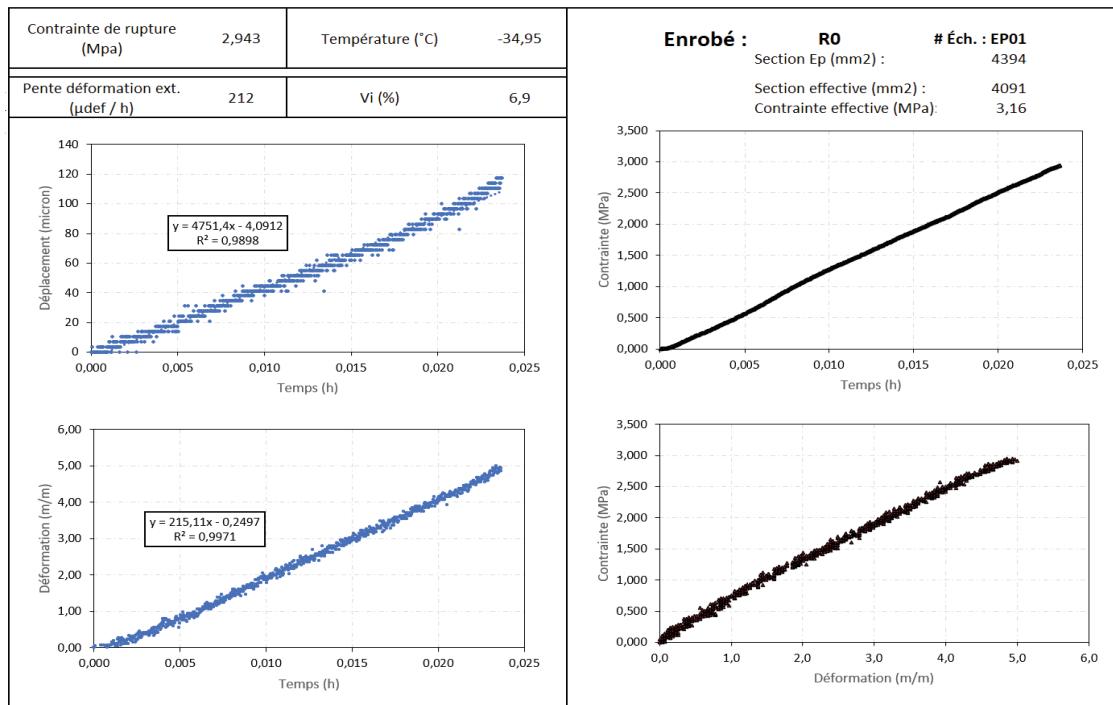


Figure-A VI-5 Résultats essais TD R0 à -35 °C

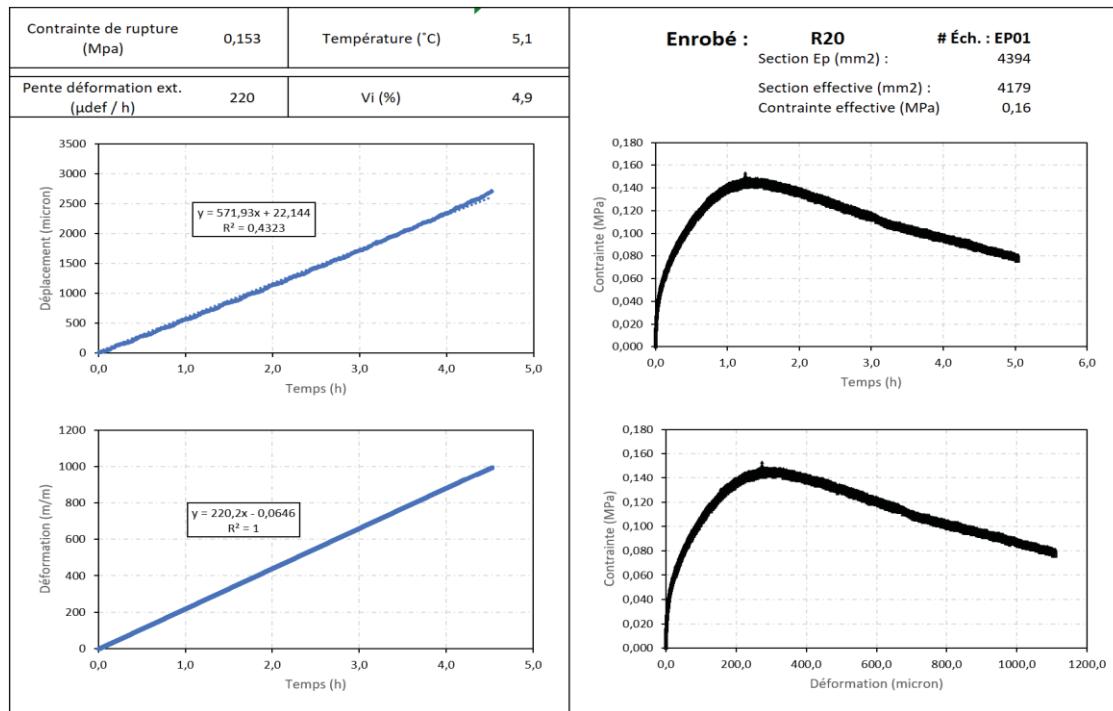


Figure-A VI-6 Résultats essais TD R20 à 5 °C

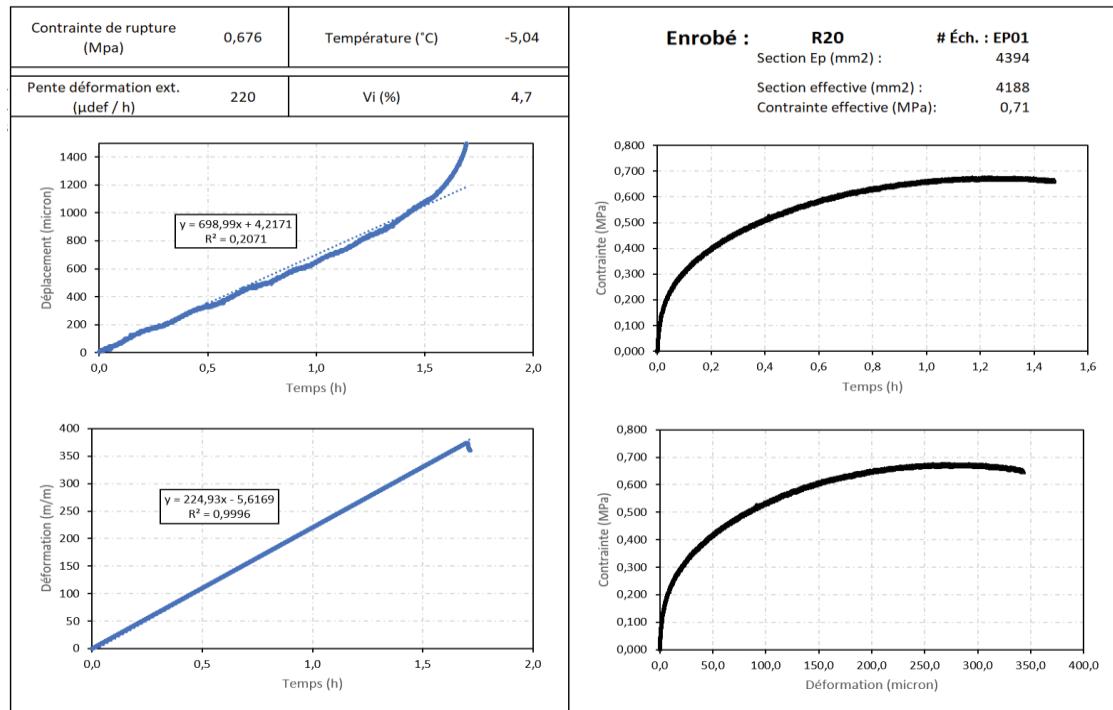


Figure-A VI-7 Résultats essais TD R20 à -5 °C

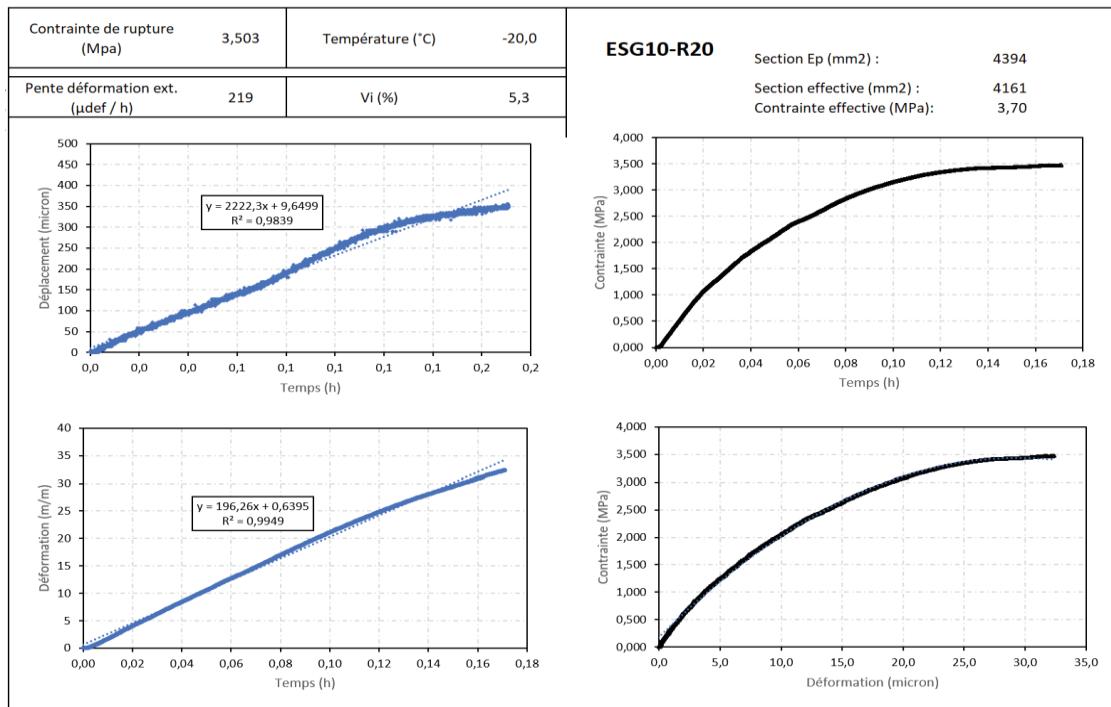


Figure-A VI-8 Résultats essais TD R20 à -20 °C

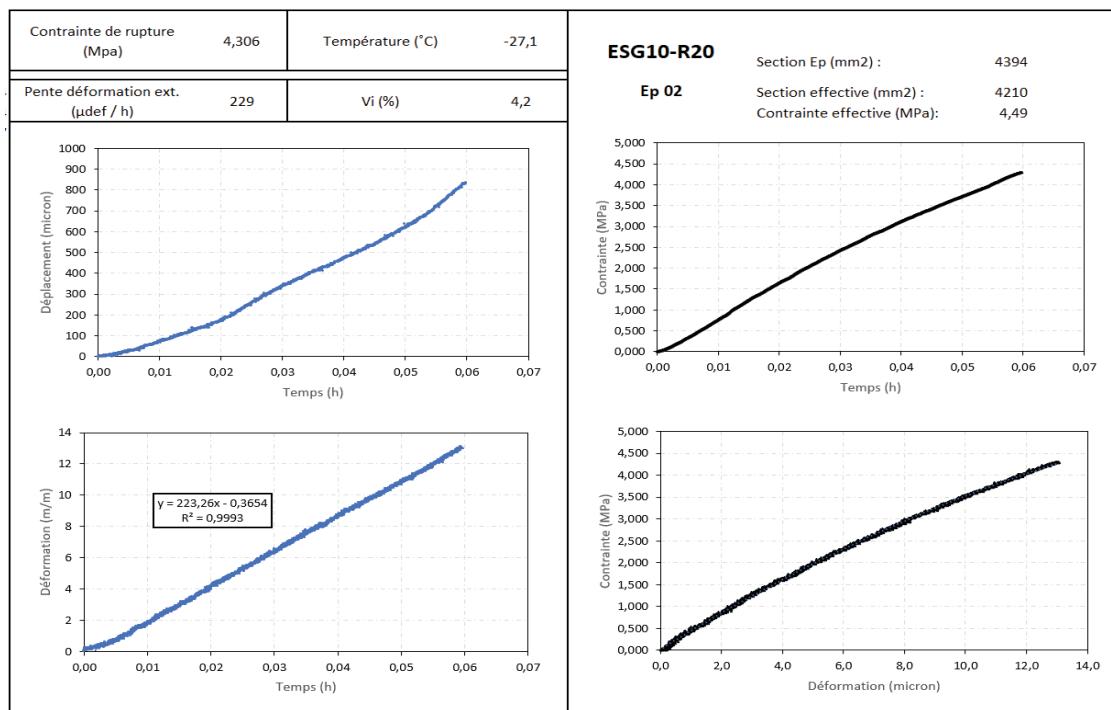


Figure-A VI-9 Résultats essais TD R20 à -27 °C

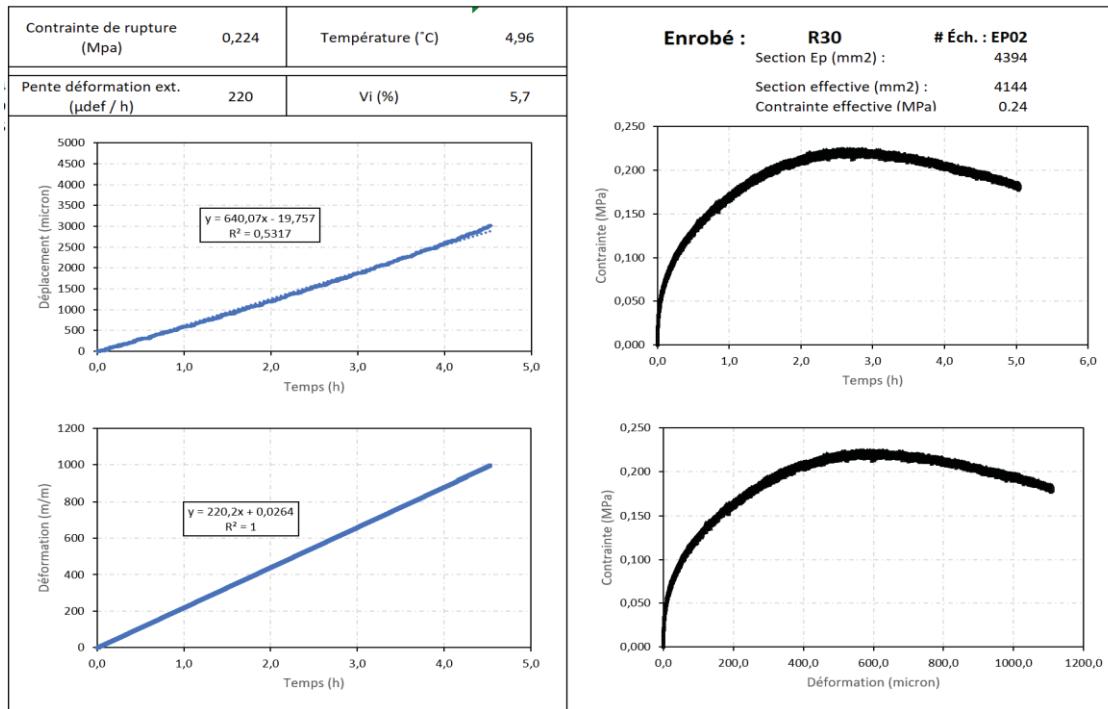


Figure-A VI-10 Résultats essais TD R30 à 5 °C

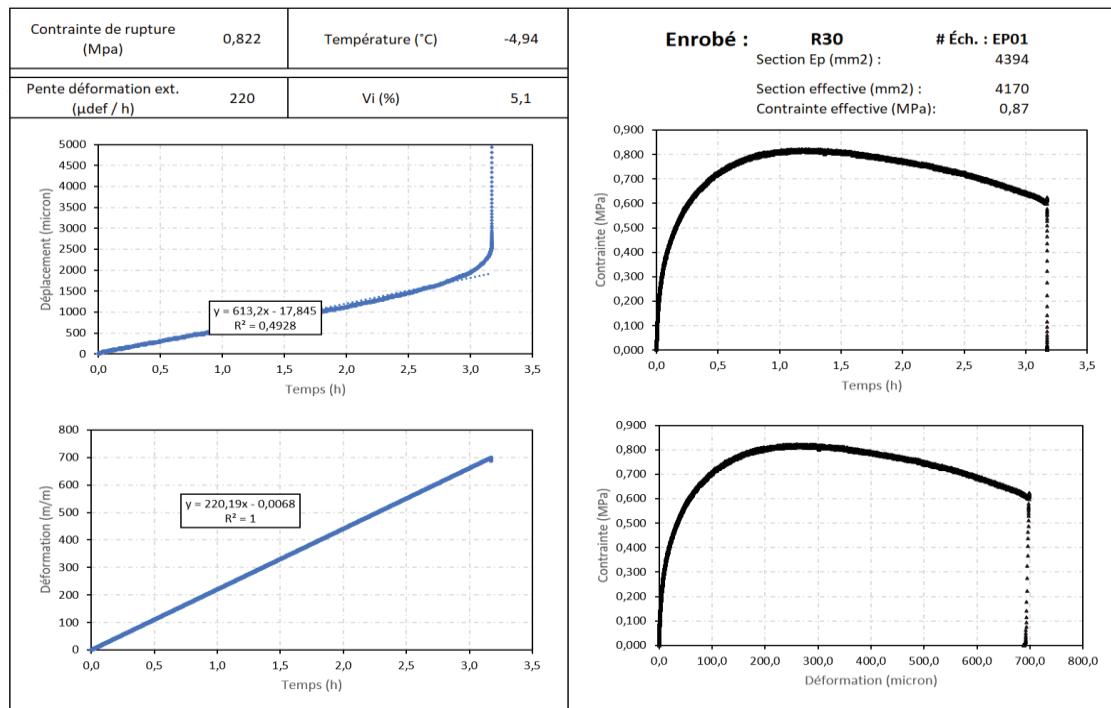


Figure-A VI-11 Résultats essais TD R30 à -5 °C

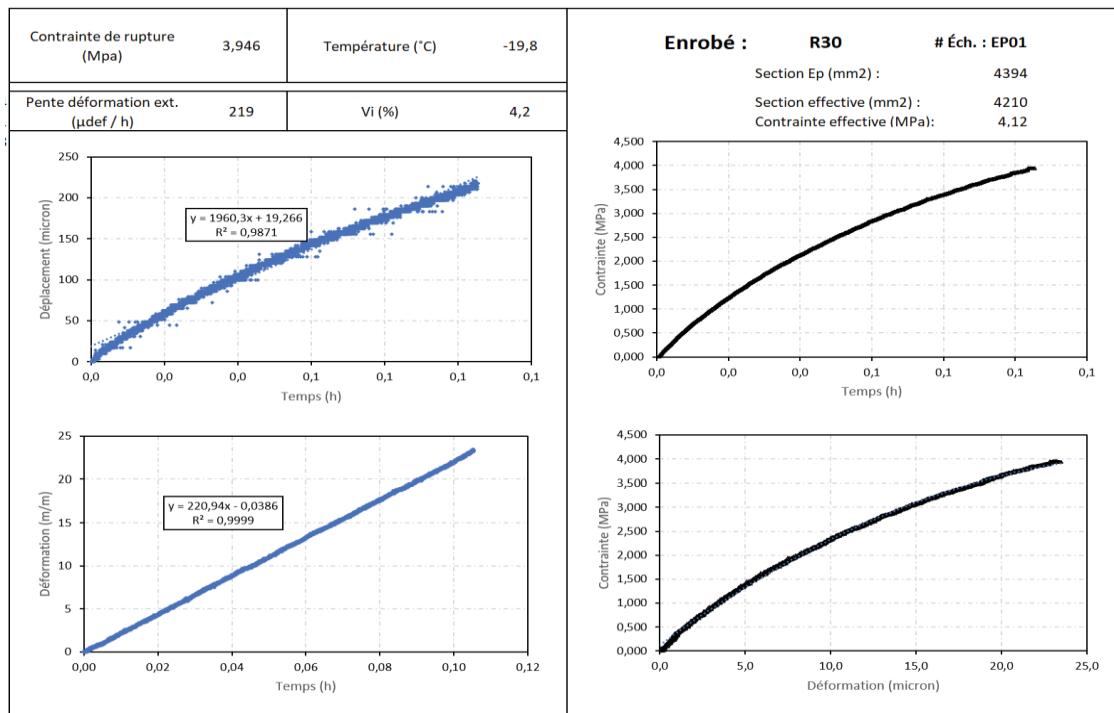


Figure-A VI-12 Résultats essais TD R30 à -20 °C

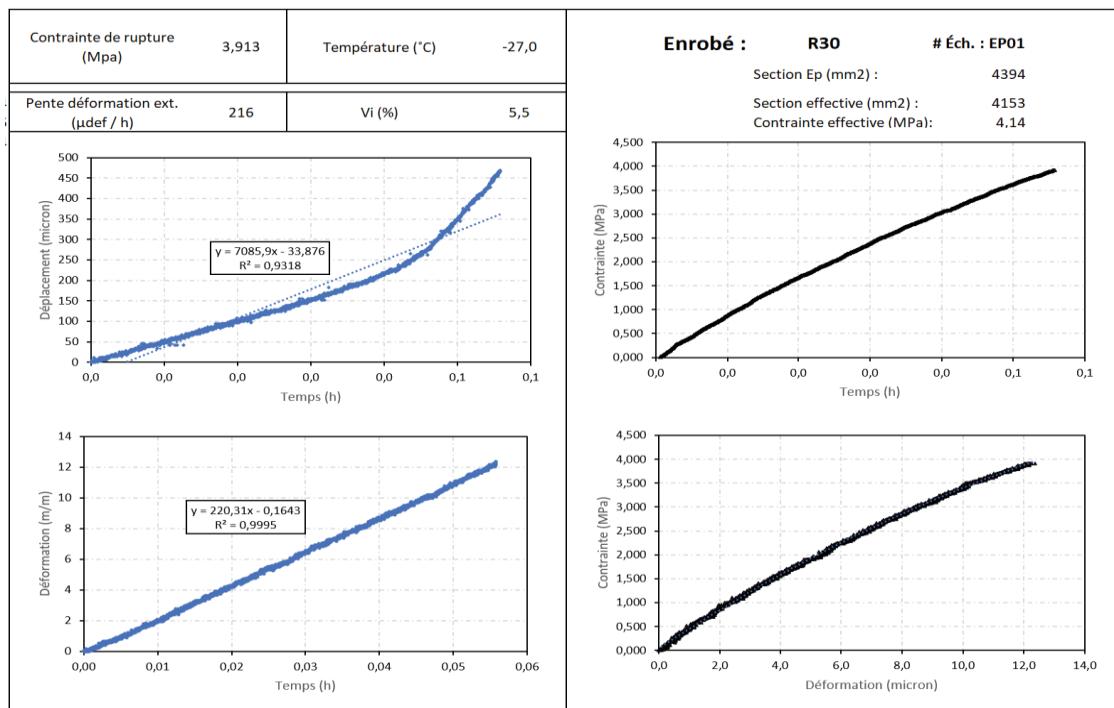


Figure-A VI-13 Résultats essais TD R30 à -27 °C

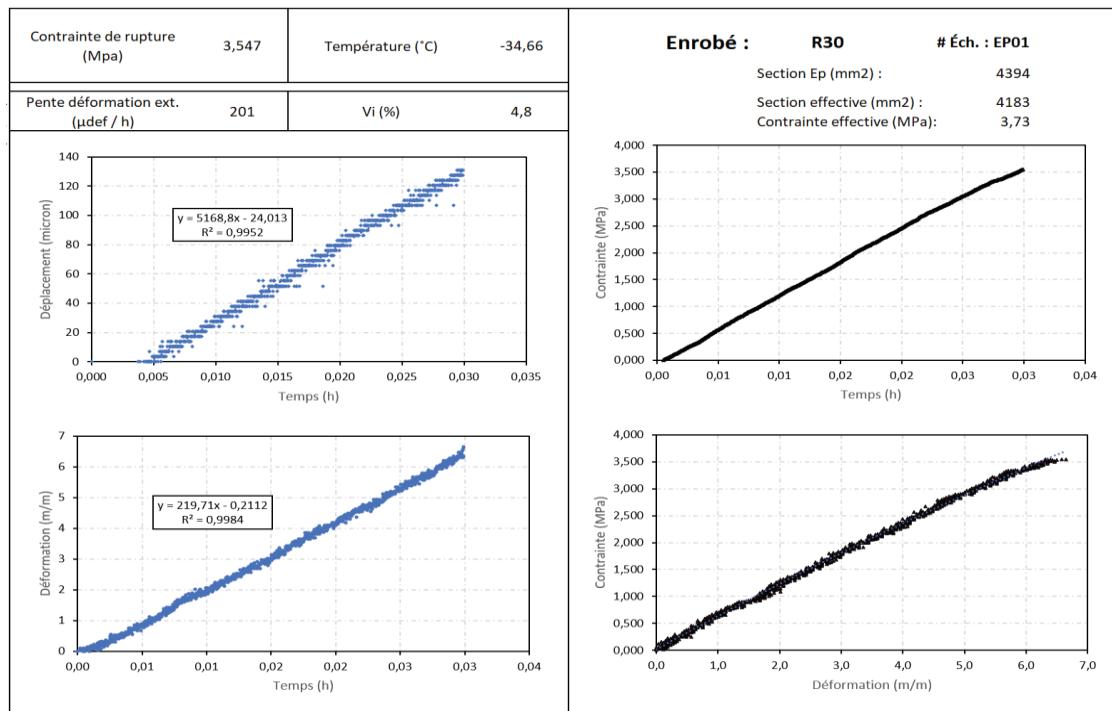


Figure-A VI-14 Résultats essais TD R30 à -35 °C

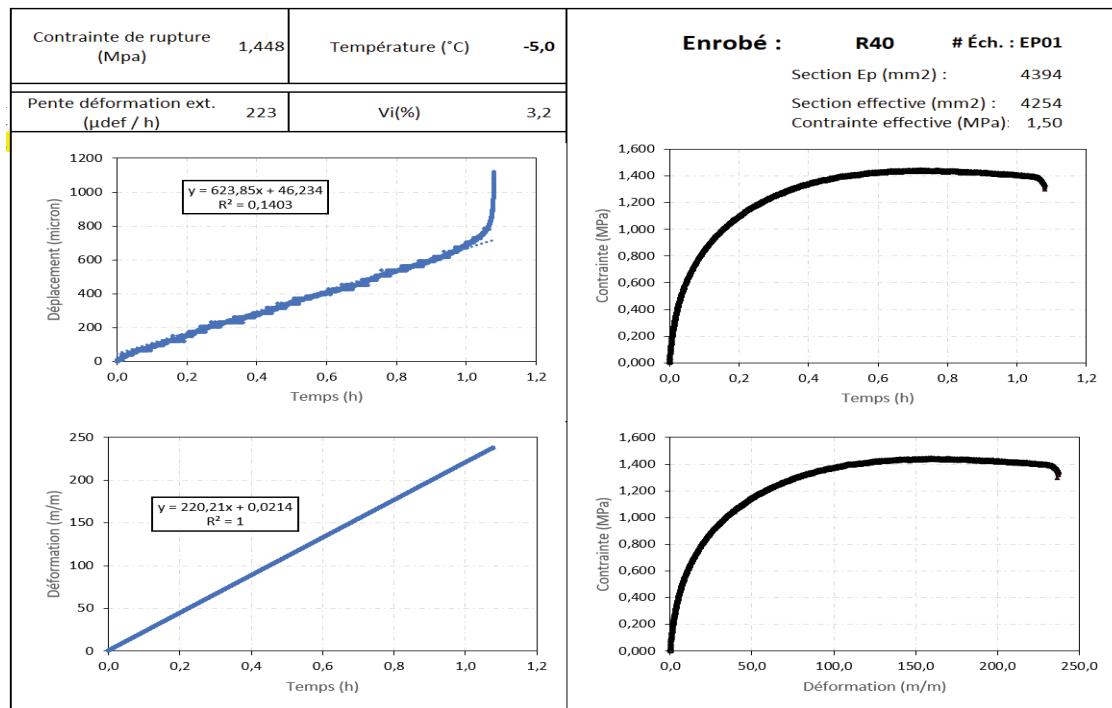


Figure-A VI-15 Résultats essais TD R40 à -5 °C

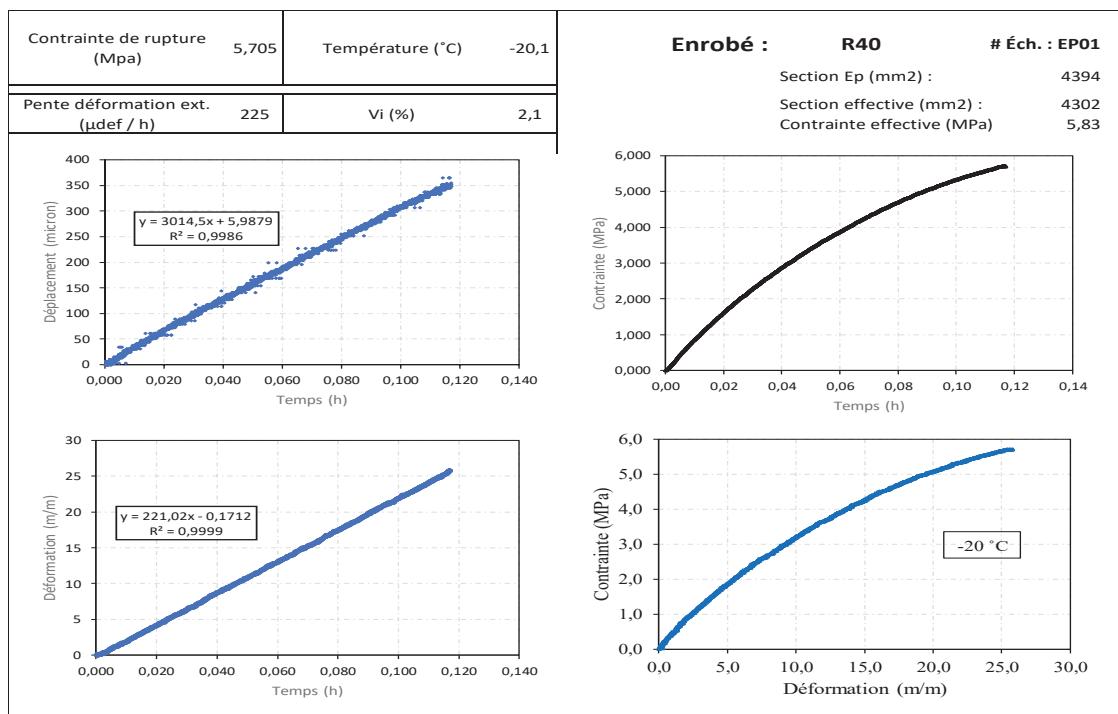


Figure-A VI-16 Résultats essais TD R40 à -20 °C

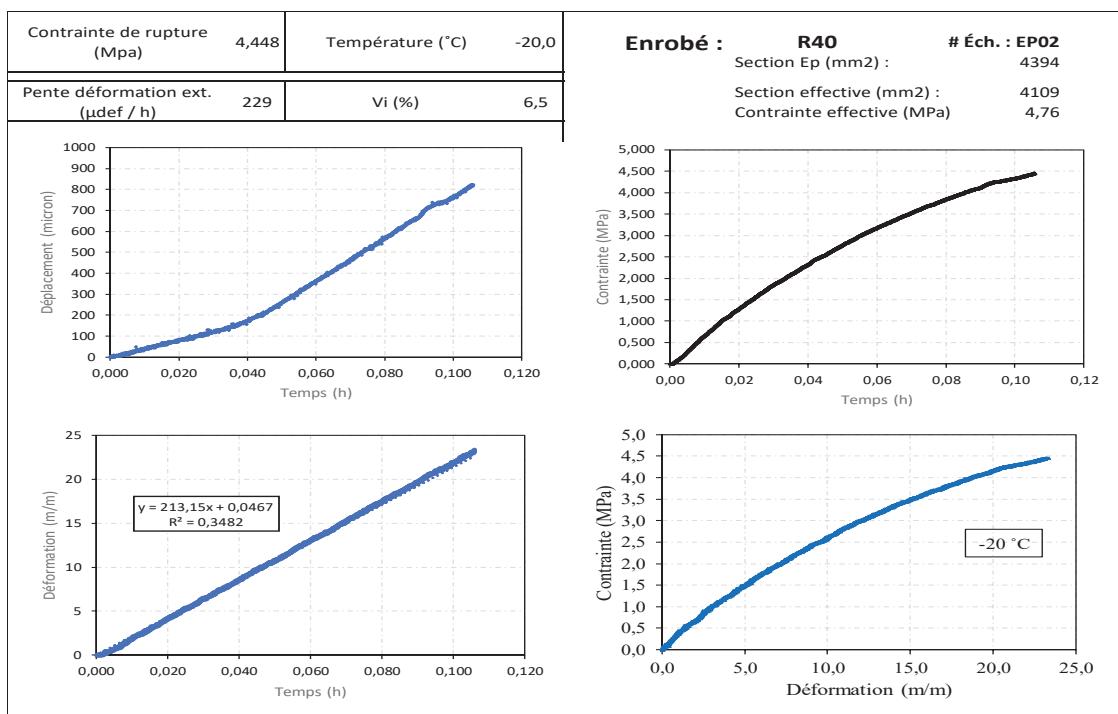


Figure-A VI-17 Résultats essais TD R40 à -20 °C

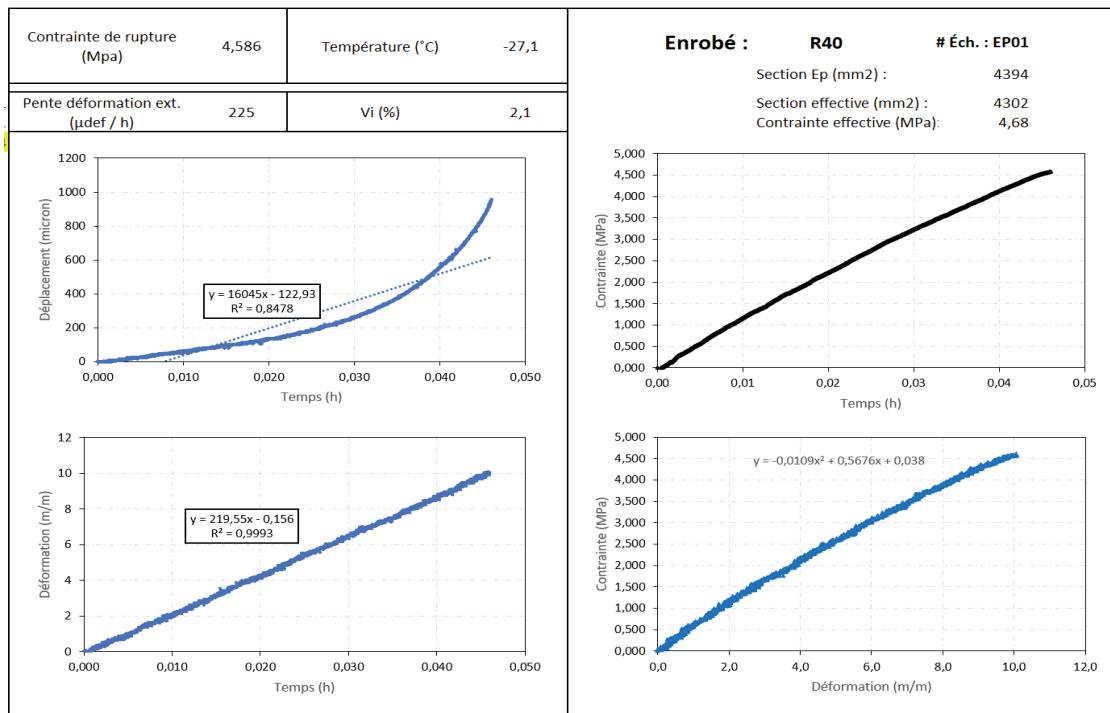


Figure-A VI-18 Résultats essais TD R40 à -27 °C

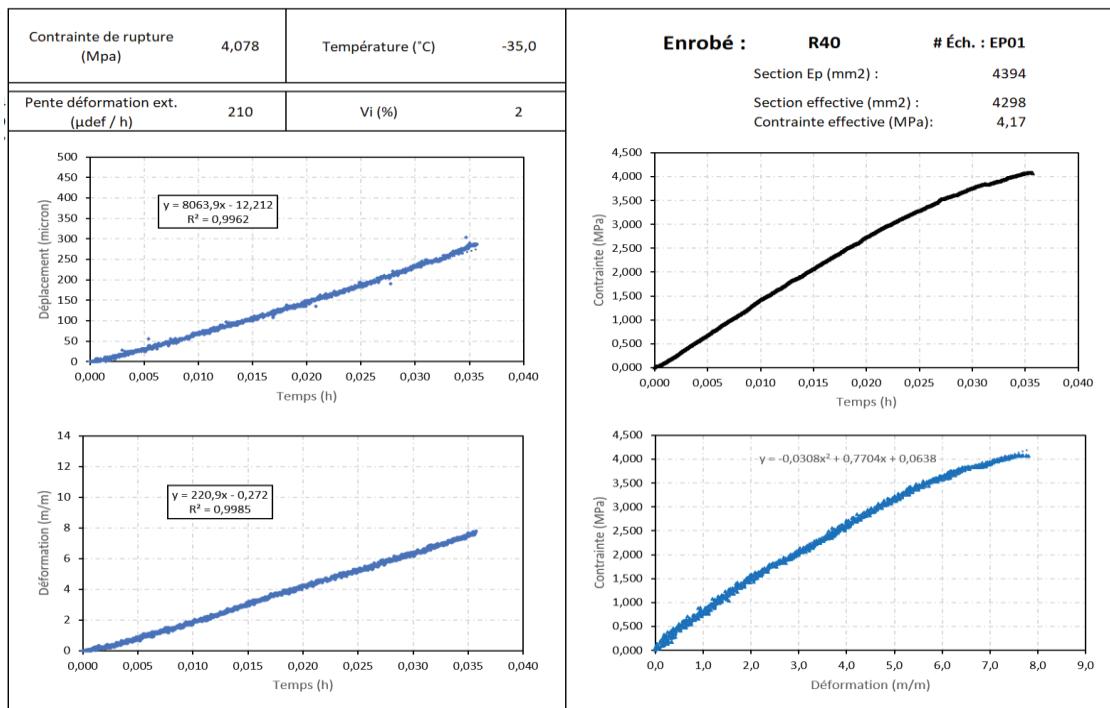


Figure-A VI-19 Résultats essais TD R40 à -35 °C

ANNEXE VII

CONFIGURATION DE STRUCTURE DE CHAUSSÉE ET VARIANTES DE MODELISATION

Tableau-A VII-1 Configuration et variantes de modélisation R0

Configuration	Cas 1 : 5 °C	Cas 2 : -5 °C	Cas 3 : -20 °C	Cas 4 : -27 °C	Cas 5 : -35 °C	
ESG10	h=0,05 m	h=0,05 m	h=0,05 m	h=0,05 m	h=0,05 m	0,00 m
	E=400 MPa	E=3 000 MPa	E=13 300 MPa	E=22 700 MPa	E=27 800 MPa	
	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	0,05 m
ESG14 ou GB20	h=0,10 m	h=0,10 m	h=0,10 m	h=0,10 m	h=0,10 m	0,05 m
	E=3 000 MPa	E=6 000 MPa	E=18 000 MPa	E=28 000 MPa	E=32 000 MPa	
	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	0,15 m
Fondation			h=0,05 m			0,15 m
			E=500 MPa			
			nu=0,35			0,65 m
Sous fondation			h=0,50 m			0,65 m
			E=250 MPa			
			nu=0,35			1,15 m
Sol infra.			h infini			1,15 m
			E=100 MPa			
			nu=0,35			

Tableau-A VII-2 Configuration et variantes de modélisation R20

Configuration	Cas 1 : 5 °C	Cas 2 : -5 °C	Cas 3 : -20 °C	Cas 4 : -27 °C	Cas 5 : -35 °C	
ESG10	h=0,05 m	h=0,05 m	h=0,05 m	h=0,05 m	h=0,05 m	0,00 m
	E=2 000 MPa	E=5 000 MPa	E=16 700 MPa	E=25 000 MPa	E=29 000 MPa	
	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	0,05 m
ESG14 ou GB20	h=0,10 m	h=0,10 m	h=0,10 m	h=0,10 m	h=0,10 m	0,05 m
	E=3 000 MPa	E=6 000 MPa	E=18 000 MPa	E=28 000 MPa	E=32 000 MPa	
	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	nu=0,35	0,15 m
Fondation			h=0,05 m			0,15 m
			E=500 MPa			
			nu=0,35			0,65 m
Sous fondation			h=0,50 m			0,65 m
			E=250 MPa			
			nu=0,35			1,15 m
Sol infra.			h infini			1,15 m
			E=100 MPa			
			nu=0,35			

Tableau-A VII-1 Configuration et variantes de modélisation R40

Configuration	Cas 1 : 5 °C	Cas 2 : -5 °C	Cas 3 : -20 °C	Cas 4 : -27 °C	Cas 5 : -35 °C	
ESG10	h=0,05 m E=3 100 MPa nu=0,35	h=0,05 m E=9 100 MPa nu=0,35	h=0,05 m E=20 450 MPa nu=0,35	h=0,05 m E=25 250 MPa nu=0,35	h=0,05 m E=29 500 MPa nu=0,35	0,00 m 0,05 m
ESG14 ou GB20	h=0,10 m E=3 000 MPa nu=0,35	h=0,10 m E=6 000 MPa nu=0,35	h=0,10 m E=18 000 MPa nu=0,35	h=0,10 m E=28 000 MPa nu=0,35	h=0,10 m E=32 000 MPa nu=0,35	0,05 m 0,15 m
Fondation			h=0,50 m E=500 MPa nu=0,35			0,15 m 0,65 m
Sous fondation			h=0,50 m E=250 MPa nu=0,35			0,65 m 1,15 m
Sol infra.			h infini E=100 MPa nu=0,35			1,15 m

BIBLIOGRAPHIE

- Abbas, C., & Lachance-Tremblay, É. (2023). *Guide d'aide à la conception structurale des chaussées municipales*. Québec: CERIU.
- Abed, A., Thom, N., & Presti, D. L. (2018). Design considerations of high RAP-content asphalt produced at reduced temperatures. *Materials and Structures*, 51(4), 1-16.
- Airey, G. D. (2003). Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, 82(14), 1709-1719.
- Al-Qadi, I. L., Aurangzeb, Q., Carpenter, S. H., Pine, W. J., & Trepanier, J. (2012). *Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures*.
- Al-Qadi, I. L., Hassan, M. M., & Elseifi, M. A. (2005). Field and theoretical evaluation of thermal fatigue cracking in flexible pavements. *Transportation Research Record*, 1919(1), 87-95.
- Applied Research Associates, A. R. A. (2020). *Revue et analyse comparative des enrobés*. Québec.
- Asphalt-Institute. (2015). *Asphalt Mix Design Methods* (7 éd.).
- Baaj, H. (2002). *Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liens hydrocarbones* (Lyon, INSA).
- Baaj, H., Ech, M., Tapsoba, N., Sauzeat, C., & Di Benedetto, H. (2013). Thermomechanical characterization of asphalt mixtures modified with high contents of asphalt shingle modifier (ASM®) and reclaimed asphalt pavement (RAP). *Materials and Structures*, 46(10), 1747-1763.
- Badeli, S., Bilodeau, F., Carter, A., & Perraton, D. (2018). Comparison of Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) Results with Bending Beam Rheometer (BBR) Results to Evaluate the Thermal Cracking Properties of Bituminous Materials. Dans *ISAP 2018 Conference, Fortaleza, Brazil*.
- Basueny, A., Perraton, D., & Carter, A. (2014). Laboratory study of the effect of RAP conditioning on the mechanical properties of hot mix asphalt containing RAP. *Materials and Structures*, 47(9), 1425-1450.
- Behnia, B., Buttler, W., & Reis, H. (2018). Evaluation of low-temperature cracking performance of asphalt pavements using acoustic emission: A review. *Applied Sciences*, 8(2), 306.

- Bitume-Québec. (2016). Le recyclage des enrobés bitumineux en centrale. *Techno-Bitume, Bulletin technique, 10.*
- Bitume-Québec. (2023). *Sondage de bitume Québec.*
- Booshehrian, A., Mogawer, W. S., & Bonaquist, R. (2013). How to construct an asphalt binder master curve and assess the degree of blending between RAP and virgin binders. *Journal of Materials in Civil Engineering, 25*(12), 1813-1821.
- Boussouar, T. (2023). *Impact de la teneur en vides sur le module complexe des enrobés.*
- Bressi, S., Cavalli, M. C., Partl, M. N., Tebaldi, G., Dumont, A. G., & Poulikakos, L. D. (2015). Particle clustering phenomena in hot asphalt mixtures with high content of reclaimed asphalt pavements. *Construction and Building Materials, 100*, 207-217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.052>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815304104>
- Bressi, S., Dumont, A.-G., & Pittet, M. (2015). Cluster phenomenon and partial differential aging in RAP mixtures. *Construction and Building Materials, 99*, 288-297.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., Little, D., & Sanchez-Silva, M. (2010). Probabilistic modeling of the effect of air voids on the mechanical performance of asphalt mixtures subjected to moisture diffusion. *Asphalt Paving Technology-Proceedings Association of Asphalt Technologists, 79*, 221.
- Carter, A., & Paradis, M. (2010). Laboratory characterization of the evolution of the thermal cracking resistance with the freeze-thaw cycles. *Retrieved from data. abacus. hr.*
- Carter, A., & Perraton, D. (2002a). La mesure du module complexe des enrobés bitumineux. Dans *2e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil* (pp. 10).
- Carter, A., & Perraton, D. (2002b). La mesure du module complexe des enrobés bitumineux. Dans *2e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil* (Vol. 10).
- Copeland, A. (2011). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice.* United States. Federal Highway Administration. Office of Research
- D'Angelo, J. A. (2001). Superpave mix design tests methods and requirements. *US Federal Highway Administration, 104.*
- Daoudi, A., & Carter, A. (2021). *Étude du comportement thermomécanique des enrobés contenant des granulats bitumineux recyclés (GBR) et des bardeaux d'asphalte recyclés.*

- Das, P. K., Balieu, R., Kringos, N., & Birgisson, B. (2015). On the oxidative ageing mechanism and its effect on asphalt mixtures morphology. *Materials and Structures*, 48(10), 3113-3127.
- Delorme, J.-L., Wendling, L., & De la Roche, C. (2007). Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud. *Etudes et recherches des Laboratoires des ponts et chaussées. Série Chaussées*.
- Di Benedetto, H., & Corté, J.-F. (2005). *Matériaux routiers bitumineux 2: constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*, 1ère éd. Coll.«Mécanique et Ingénierie des Matériaux». Paris: Hermès Science.
- Di Benedetto, H., & Corté, J. (2005). Matériaux routiers bitumineux 2. *Hermès Lavoisier editions*.
- Di Benedetto, H., & Corté, J. F. (2004). *Matériaux routiers bitumineux 1: description et propriétés des constituants*.
- Di Benedetto, H., & Corté, J. F. (2005a). *Matériaux routiers bitumineux 2*.
- Di Benedetto, H., & Corté, J. F. (2005b). *Matériaux Routiers Bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. hermes.
- Di Benedetto, H., Mondher, N., Sauzéat, C., & Olard, F. (2007). Three-dimensional thermo-viscoplastic behaviour of bituminous materials: The DBN model. *Road Materials and Pavement Design*, 8(2), 285-315.
- Ding, Y., Huang, B., Shu, X., Zhang, Y., & Woods, M. E. (2016). Use of molecular dynamics to investigate diffusion between virgin and aged asphalt binders. *Fuel*, 174, 267-273.
- DLC, D. d. l. d. c. (2004). Mesure en laboratoire de la résistance au retrait thermique des enrobés. *Bulletin d'information technique*, 2.
- Doucet, F., & Auger, B. (2010a). *Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des transports du Québec*. Service des matériaux d'infrastructures, Direction des laboratoires des chaussées, Ministère des Transports du Québec. Rapport RTQ-10-01.
- Druta, C., Wang, L., & Zhu, T. (2009). Laboratory investigation of reclaimed asphalt pavement mixed with pure binder using X-ray CT scanner. Dans *ICCTP 2009: Critical Issues In Transportation Systems Planning, Development, And Management* (pp. 1-10).
- Ghos, S., Ali, S. A., Zaman, M., Chen, D. H., Hobson, K. R., & Behm, M. (2022). Evaluation of transverse cracking in flexible pavements using field investigation and

AASHTOWare pavement ME design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(3), 561-576.

Glaoui, B., Merbouh, M., Van de Ven, M., Chailleux, E., & Youcef, A. (2012). Thermal fatigue of polymer modified bitumen. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 25(4), 469-478.

Hofko, B., Blab, R., & Mader, M. (2012). Impact of air void content on the viscoelastic behavior of hot mix asphalt. Dans *Proceedings of the 3rd conference on four-point bending* (pp. 139-149).

Huang, B., Li, G., Vukosavljevic, D., Shu, X., & Egan, B. K. (2005). Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record*, 1929(1), 37-45.

Huang, B., Shu, X., & Vukosavljevic, D. (2011). Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1535-1543.

Iliuta, S., Andriescu, A., Hesp, S. A., & Tam, K. K. (2004). Improved approach to low-temperature and fatigue fracture performance grading of asphalt cements. Dans *PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE-CANADIAN TECHNICAL ASPHALT ASSOCIATION* (pp. 123-158). Polyscience Publications; 1998.

Imaninasab, R., Loria-Salazar, L., & Carter, A. (2023). Linear viscoelastic behavior of asphalt binders and mixtures containing very high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 17(8), 1211-1227. doi: 10.1007/s11709-023-0983-9. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s11709-023-0983-9>

Islam, M. R. (2015). *Thermal fatigue damage of asphalt pavement*. The University of New Mexico.

Islam, M. R., & Tarefder, R. A. (2015). Coefficients of thermal contraction and expansion of asphalt concrete in the laboratory. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), 04015020.

Jackson, N. M., & Vinson, T. S. (1996). Analysis of thermal fatigue distress of asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record*, 1545(1), 43-49.

Jung, D., & Vinson, T. S. (1994). *Low-temperature cracking: Test selection*.

Karlsson, R., & Isacsson, U. (2003). Laboratory studies of diffusion in bitumen using markers. *Journal of materials science*, 38(13), 2835-2844.

- Karlsson, R., Isacsson, U., & Ekblad, J. (2007). Rheological characterisation of bitumen diffusion. *Journal of materials science*, 42, 101-108.
- Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., & Martin, A. E. (2019). A Method to Quantify Reclaimed Asphalt Pavement Binder Availability (Effective RAP Binder) in Recycled Asphalt Mixes. *Transportation Research Record*, 2673(1), 205-216. doi: 10.1177/0361198118821366. Repéré à <https://doi.org/10.1177/0361198118821366>
- 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 Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE]).
- Langlois, P. (1999). Formulation des enrobés. Méthode LC (Laboratoire des chaussées) du MTQ. *Revue générale des routes et des aérodromes*, (HS-2), 47-50.
- Lcpc-setra, V. P. (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussée. *Guide technique*, Paris.
- Leclerc, G. (2018). Sélection des bitumes basée sur la classification MSCR. *Via Bitume*, 14, 8-12.
- Leiva-Villacorta, F., West, R., & Brown, E. R. (2019). *A Synthesis of Technical Needs of Asphalt Pavements for Local Roads*.
- Lesueur, D. (2002). La rhéologie des bitumes: Principes et modification. *Rhéologie*, 2, 1-30.
- Li, X., & Youtcheff, J. (2018). Practical method to determine the effect of air voids on the dynamic modulus of asphalt mixture. *Transportation Research Record*, 2672(28), 462-470.
- Lu, X., & Isacsson, U. (2001). Effect of binder rheology on the low-temperature cracking of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 2(1), 29-47.
- Lu, X., & Isacsson, U. (2002). Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. *Construction and Building Materials*, 16(1), 15-22.
- Lukanen, E. (2011). Effect of PG XX-34 on Transverse Cracking in Minnesota. *Transportation Research Record*, 2207(1), 58-61. doi: 10.3141/2207-08. Repéré à <https://doi.org/10.3141/2207-08>
- Marasteanu, M., Zofka, A., Turos, M., Li, X., Velasquez, R., Li, X., . . . Dave, E. (2007). *Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements-a transportation pooled fund study*. Minnesota. Dept. of Transportation.

- McDaniel, R. S., Shah, A., Huber, G. A., & Copeland, A. (2012). Effects of reclaimed asphalt pavement content and virgin binder grade on properties of plant produced mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 161-182.
- Meunier, M. (2012). *Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux* (École de technologie supérieure).
- Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J. S., Bonaquist, R., Austerman, A., & Booshehrian, A. (2012). Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 183-208.
- Moutier, F. (1991). Etude statistique de l'effet de la composition des enrobés bitumineux sur leur comportement en fatigue et leur module complexe. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, (172).
- Moutier, F., Duan, T., & Chauvin, J. (1988). The effects of the formulation parameters on the mechanical behavior of mixes. Dans *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 57).
- MTMD. (2005). *Enrobés : Formulation selon la méthode LC*. Bibliothèque national du Québec.
- MTMD. (2023). *Critères de sélection des enrobés*. Repéré à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/chaussees/Documents/criteres-selection-enrobes.pdf>
- MTQ. (1982). Recyclage des vieux revêtements bitumineux. *Recherches transport*.
- Navaro, J. (2011). *Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques*.
- Navaro, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., Colin, J., Dony, A., & Cournet, J. (2012). Observation and evaluation of the degree of blending of reclaimed asphalt concretes using microscopy image analysis. *Construction and Building Materials*, 37, 135-143.
- Nazzal, M. D., Kim, S. S., Abbas, A. R., Qtaish, L. A., Holcombe, E., & Hassan, Y. A. (2017). *Fundamental evaluation of the interaction between RAS/RAP and virgin asphalt binders*. Ohio. Dept. of Transportation.
- Nguyen, M. L. (2009). *Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux* (Institut National des Sciences Appliquées de Lyon).
- Nguyen, Q. T., Di Benedetto, H., & Sauzéat, C. (2013). Prediction of linear viscoelastic behaviour of asphalt mixes from binder properties and reversal. Dans *Multi-Scale*

- Modeling and Characterization of Infrastructure Materials: Proceedings of the International RILEM Symposium Stockholm, June 2013* (pp. 237-248). Springer.
- Nguyen, V. H. (2009). *Effects of laboratory mixing methods and RAP materials on performance of hot recycled asphalt mixtures* (University of Nottingham Nottinghamshire, England, United Kingdom).
- Noferini, L., Simone, A., Sangiorgi, C., & Mazzotta, F. (2017). Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(4), 322-332. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.011>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416301122>
- Olard, F. (2003). *Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé* (INSA de Lyon).
- Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003). General “2S2P1D” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 4(2), 185-224.
- Olard, F., Di Benedetto, H., Dony, A., & Vaniscote, J.-C. (2005). Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics. *Materials and Structures*, 38(1), 121-126.
- Oshone, M., Dave, E., Daniel, J. S., & Rowe, G. M. (2017). Prediction of phase angles from dynamic modulus data and implications for cracking performance evaluation. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup4), 491-513.
- Pedraza, A. (2018). *Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés* (Université de Lyon).
- Pedraza, A., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., & Pouget, S. (2019). 3D Linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures containing high content of multi-recycled RAP. *Road Materials and Pavement Design*, 20(7), 1709-1721.
- Perraton, D., Baaj, H., Benedetto, H. D., & Paradis, M. (2003). Évaluation de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux fondée sur l'évolution de l'endommagement du matériau en cours d'essai: aspects fondamentaux et application à l'enrobé à matrice de pierre. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(5), 902-913.
- 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.

- Petersen, J. C. (2009). A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships. *Transportation research circular, (E-C140)*.
- Pszczola, M., & Szydłowski, C. (2018). Influence of bitumen type and asphalt mixture composition on low-temperature strength properties according to various test methods. *Materials, 11*(11), 2118.
- Québec, T. (2020). Dessin normalisé - Terminologie relative aux chaussées
- Rioux, N. (1993). Optimisation du dimensionnement des structures de chaussées. *Bulletin d'information scientifique, 12*.
- Robertson, R. E., Branthaver, J., Plancher, H., Duvall, J., Ensley, E., & Harnsberger, P. (1991). *Chemical properties of asphalts and their relationship to pavement performance*. Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington, DC.
- Rowe, G. (2009). Phase angle determination and interrelationships within bituminous materials. Dans *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Two Volume Set* (pp. 59-68). CRC Press.
- Rowe, G. M., Khoei, S. H., Blankenship, P., & Mahboub, K. C. (2009). Evaluation of aspects of E* test by using hot-mix asphalt specimens with varying void contents. *Transportation Research Record, 2127*(1), 164-172.
- Rys, D., Judycki, J., Pszczola, M., Jaczewski, M., & Mejln, L. (2017). Comparison of low-temperature cracks intensity on pavements with high modulus asphalt concrete and conventional asphalt concrete bases. *Construction and Building Materials, 147*, 478-487. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.179>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817308371>
- Saint-Laurent, D. (2006). CHAUSSÉE2–Logiciel de dimensionnement des chaussées souples: guide de l'utilisateur. *Service des chaussées, Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec*.
- Seo, Y., El-Haggan, O., King, M., Joon Lee, S., & Richard Kim, Y. (2007). Air void models for the dynamic modulus, fatigue cracking, and rutting of asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering, 19*(10), 874-883.
- SERFASS, J.-P. (2008). *Recyclage en centrale des matériaux de chaussée*. Ed. Techniques Ingénieur.
- Singh, D., & Girimath, S. (2016). Influence of RAP sources and proportions on fracture and low temperature cracking performance of polymer modified binder. *Construction and Building Materials, 120*, 10-18.

- Sreeram, A., Leng, Z., Zhang, Y., & Padhan, R. K. (2018). Evaluation of RAP binder mobilisation and blending efficiency in bituminous mixtures: An approach using ATR-FTIR and artificial aggregate. *Construction and Building Materials*, 179, 245-253.
- Steiner, D., Hofko, B., Blab, R., Wien, T., Wien, A., & Steiner, D. (2016). Effect of Air Void Content and Repeated Testing on Stiffness of Asphalt Mix Specimen. Dans.
- Stimilli, A., Virgili, A., Canestrari, F., & Bahia, H. U. (2017). Estimation of low-temperature performance of recycled asphalt mixtures through relaxation modulus analysis. *Cold Regions Science and Technology*, 133, 36-45.
- Stroup-Gardiner, M. (2016). *Use of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Asphalt Mixtures*.
- Tam, K., Joseph, P. E., & Lynch, D. (1991). *Five year experience on low temperature performance of recycled hot mix*. Ontario Ministry of Transportation, Engineering Materials Office Toronto, ON
- Tapsoba, N. (2012). *Comportement des enrobés bitumineux à base de matériaux recyclés et/ou fabriqués à température réduite* (PhD Thesis, ENTPE/University of Lyon).
- Teguedi, M. C. (2017). *Comportement local des enrobés recyclés: apport des mesures de champs cinématiques* (Université Clermont Auvergne(2017-2020)).
- Teltayev, B., & Radovskiy, B. (2018). Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties. *Road Materials and Pavement Design*, 19(8), 1832-1847.
- Tran, D. T. (2020). *Endommagement des enrobés bitumineux soumis à des cycles de gel/dégel* (Université de Lyon).
- Tušar, M., Hribar, D., & Hofko, B. (2014). Impact of characteristics of asphalt concrete wearing courses on crack resistance at low temperatures. *Proc. of the 5th "Transport Research Arena 2014*, 14-17.
- Vinson, T. S., Janoo, V. C., & Haas, R. (1989). *Summary report, low temperature and thermal fatigue cracking*.
- Witczak, M., & Fonseca, O. (1996). Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1540(1), 15-23.
- Woo, W. J., Chowdhury, A., & Glover, C. J. (2008). Field aging of unmodified asphalt binder in three Texas long-term performance pavements. *Transportation Research Record*, 2051(1), 15-22.

- Xu, Q., & Solaimanian, M. (2008). Measurement and evaluation of asphalt concrete thermal expansion and contraction. *Journal of Testing and Evaluation*, 36(2), 507.
- Yang, Z., Zhuang, G., Wei, X., Wei, J., Yu, H., & Xu, W. (2018). Quantitative analysis of the blending degree of virgin and RAP binders in recycled asphalt mixtures with a high RAP content. *Applied Sciences*, 8(12), 2668.
- Yee, P., Aida, B., Hesp, S. A., Marks, P., & Tam, K. K. (2006). Analysis of premature low-temperature cracking in three Ontario, Canada, pavements. *Transportation Research Record*, 1962(1), 44-51.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2016). 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits. *Transportation Research Procedia*, 14, 3493-3502. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.315>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516303210>
- Zhang, W. (2015). *Evaluation of field transverse cracking of asphalt pavements*. Washington State University.
- Zhang, W., Shen, S., Basak, P., Wen, H., Wu, S., Faheem, A., & Mohammad, L. N. (2015). Development of predictive models for initiation and propagation of field transverse cracking. *Transportation Research Record*, 2524(1), 92-99.
- Zhao, S., Huang, B., Shu, X., & Woods, M. E. (2015). Quantitative characterization of binder blending: How much recycled binder is mobilized during mixing? *Transportation Research Record*, 2506(1), 72-80.