

Modélisation de la performance à la fissuration des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement type I et type II

par

Amel FERJANI

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

MONTREAL, LE 10 MARS 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Amel Ferjani, 2020



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 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. Michel Vaillancourt, codirecteur de thèse
Département de Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Yvan Beauregard, président du jury
Département de génie mécanique 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. Simon Pouget, examinateur externe
Eiffage Infrastructures

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

LE 17 JANVIER 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le résultat, certes de longues recherches, mais surtout de l'appui d'un entourage exceptionnel. Je profite de cette occasion pour exprimer ma reconnaissance et adresser mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué pour mener cette thèse à son terme.

En premier temps, je tiens à remercier mon directeur de thèse, Alan Carter, pour son encadrement et pour m'avoir transmis la passion pour la recherche. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller tout au long de cette thèse. Je tiens à remercier mon codirecteur, Michel Vaillancourt, pour m'avoir consacré de son temps, pour ses remarques constructives et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

Dans un deuxième temps, je voudrais remercier tous mes collègues du LCMB qui ont contribué de près ou de loin à ce projet. Un merci spécial s'adresse aux techniciens, Francis Bilodeau et Sylvain Bibeau pour leur disponibilité, amabilité et leur volonté de m'aider dans la réalisation des essais.

Je remercie également mes amis Rim, Asma, Ibtihel, Sahar et Hajer qui m'ont apporté du support moral tout au long de ce travail et qui ont toujours eu les mots afin de me pousser à donner le meilleur de moi-même.

Aussi, je souhaite avoir un mot particulier pour ma famille qui, avec cette question récurrente, « quand est-ce que tu soutiens ta thèse? », bien qu'angoissante en période fréquente de doutes, m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final. Mes sincères remerciements vont à mes parents, Hattab et Torkia, qui m'ont toujours encouragé dans la poursuite de mes études. Merci à mes sœurs, Sonia et Latifa, à mes frères Mohamed, Sami, Hassen et Karim, à mon beau-frère, Kamel, à mes belles sœurs, Amal et Amel, d'avoir m'écouter et me conseiller toutes ces années et pour leur encouragement continu. Je désire remercier aussi mes beaux-parents,

VI

Abdelkarim et Najet, ainsi que mes belles sœurs, Imen et Houda, et mon beau-frère, Amine, pour leur soutien et leur amour.

Les mots me manquent pour exprimer toute la gratitude que je ressens à l'égard de mon mari, mon meilleur ami et ma raison de vivre, Mohamed Ben Abdallah. Cher mari j'aimerais bien que tu trouves dans ce travail l'expression de mes sentiments de reconnaissance les plus sincères car grâce à ton amour, ton aide et à ta patience avec moi que ce travail a pu voir le jour. Finalement, je dédie cette thèse à mon futur bébé, Yanis, qui m'a grandement motivé à terminer la rédaction avant sa naissance. À toi mon bébé, je te remercie d'avoir été gentil et patient durant mes nuits d'études. Ta présence me tenait compagnie, chacun de tes petits mouvements m'apportait joie et bonheur.

Prédiction de la performance à la fissuration des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement type I et type II

Amel FERJANI

RÉSUMÉ

Le passage répété du poids lourd et les conditions climatiques extrêmes entraînent la dégradation des structures de chaussées, ce qui impose parfois le recours à des techniques de réhabilitation permettant de maintenir la route en état sécuritaire et prolonger sa durée de vie. Depuis les années 1980, les techniques de recyclage, notamment les techniques de retraitement type I et type II, ont commencé à gagner en popularité au Québec. Ces méthodes permettent d'améliorer l'état structural et fonctionnel de la chaussée et répondent aux exigences du développement durable. Bien que ces techniques soient considérées performantes, certains aspects relatifs à la prédiction de leurs performances restent peu maîtrisés.

La fissuration est l'un des modes de dégradation les plus fréquents dans les chaussées réhabilitées, cependant les méthodes de dimensionnement actuelles ne tiennent pas compte de l'existence des fissures dans les structures dégradées. En outre, la compréhension du comportement des matériaux recyclés à froid est nécessaire pour prédire le comportement de ces chaussées. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette thèse qui vise à modéliser et évaluer la performance des chaussées réhabilitées par retraitement type I et type II à la fissuration.

Afin d'atteindre l'objectif de cette thèse, l'étude s'est divisée en trois volets. La première partie concerne la caractérisation, en laboratoire, du comportement des matériaux recyclés à froid utilisés dans les chaussées réhabilitées par retraitement type I et type II (MR7 et MR5, respectivement). L'essai de module complexe a été utilisé pour caractériser le comportement viscoélastique alors que l'essai de flexion semi-circulaire pour déterminer la résistance à la fissuration des MR5 et MR7. La deuxième partie a été consacrée pour modéliser le comportement de ces matériaux en utilisant la méthode des éléments finis. Pour ce faire, un modèle 2D de l'essai SCB a été développé à l'aide du logiciel ABAQUS et calibré selon les résultats expérimentaux. L'initiation et la propagation des fissures ont été modélisées par la méthode des éléments finis étendus. Les résultats numériques ont montré un bon accord avec la propagation des fissures observée en laboratoire. La dernière partie est destinée pour développer des modèles en éléments finis des structures de chaussées et évaluer leurs comportements. Afin de valider l'approche de modélisation, une structure réelle disponible dans la base de données LTPP a été modélisée par la méthode des éléments finis. La comparaison des résultats de modélisation et les mesures de déflexions sur la chaussée a permis de valider cette approche. Finalement, les structures réhabilitées ont été modélisées et évaluées vis-à-vis à la fissuration. Les résultats ont montré que la technique de retraitement type I est sensible à la remontée des fissures existantes alors que la performance du retraitement type II est liée au comportement des MR5.

Mots clés : enrobés recyclés à froid, chaussées réhabilitées, comportement viscoélastique, résistance à la fissuration, méthode des éléments finis étendus, propagation des fissures

Prédiction de la performance à la fissuration des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement type I et type II

Amel FERJANI

ABSTRACT

The repetitive loading from traffic and the extreme weather conditions cause pavement structure failure, that involves pavement rehabilitation to maintain the road in a safe state and extend its life. Since the 1980s, rehabilitation treatments especially, cold-in place recycling (CIR) and full-depth reclamation (FDR), have been gaining momentum in Quebec. These methods improve the structural and functional condition of the pavement and meet the requirements of sustainable development. Although CIR and FDR technics are considered performant for pavement rehabilitation, their cracking performance are not well understood.

Cracking is one of the most frequent deterioration modes in rehabilitated pavements. However, current pavement design methods do not consider the effect of the existence cracks in the pavement. In addition, satisfactory research is yet to be done with regards to gaining further comprehension of the behavior of CIR and FDR materials to predict the rehabilitated pavement performance.

The main objective of this thesis is to evaluate and model the cracking performance of CIR and FDR technics. To achieve this goal, this thesis was oriented along three main axes. The first part covers the characterization of viscoelastic and the fracture properties of CIR and FDR materials using the complex modulus test and the semi-circular bending test (SCB). The second part covers the cracking performance modeling of CIR and FDR materials using the finite element method. A 2D finite element model of the SCB test was developed using ABAQUS software. The crack initiation and propagation were modeled using the extended finite element method (XFEM). The numerical results were validated and showed a good agreement with the crack propagation observed in the laboratory testing. Finally, the rehabilitated pavement structures are modeled to investigate their performance to cracking. In order to validate the modeling approach, a real structure available in the LTPP database has been modeled. The numerical results were validated and showed a good agreement with the deflections measured on pavement. Finally, rehabilitated structures were modeled and evaluated to cracking. The results showed that the CIR structure is sensitive to reflective cracking while the FDR performance is related to the behavior of the FDR materials.

Keywords: cold-recycled asphalt, rehabilitated pavements, viscoelastic behavior, cracking resistance, extended finite element method, crack propagation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTUDE BILIOGRAPHIQUE.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Généralités sur les chaussées bitumineuses	5
1.2.1 La structure de la chaussée	5
1.2.2 Les sollicitations dans les chaussées bitumineuses.....	7
1.2.2.1 L'effet du trafic	7
1.2.2.2 Sollicitations thermiques.....	7
1.2.3 Les enrobés bitumineux	8
1.2.3.1 Les propriétés mécaniques des enrobés dans les structures de chaussée.....	9
1.2.3.2 Le module complexe.....	10
1.2.4 Dégradations des chaussées bitumineuses	11
1.2.4.1 Fissuration par fatigue.....	12
1.2.4.2 Fissuration thermique.....	12
1.2.4.3 Déformations permanentes (Orniérage).....	13
1.2.5 Les techniques de réhabilitation.....	13
1.2.5.1 Les enrobés recyclés à froid.....	14
1.2.5.2 Le retraitement type I.....	15
1.2.5.3 Le retraitement en place type II	16
1.3 Dimensionnement des chaussées bitumineuses	16
1.3.1 Dimensionnement empirique	17
1.3.2 Dimensionnement mécaniste empirique	18
1.4 Modélisation de la performance des chaussées à la fissuration.....	20
1.4.1 Introduction à la mécanique de rupture	21
1.4.1.1 La mécanique de rupture linéaire élastique	22
1.4.1.2 Modèle de zone cohésive (MZC).....	23
1.4.1.3 Essais de caractérisation des propriétés à la rupture des enrobés bitumineux.....	25
1.4.2 Méthodes numériques pour modéliser la fissuration des chaussées	27
1.4.2.1 Méthodes classiques des éléments finis (MEF).....	28
1.4.2.2 Méthode des éléments finis étendus	29
1.5 Conclusion	33
CHAPITRE 2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE.....	35
2.1 Objectifs de la recherche.....	35
2.2 Méthodologie	35
2.2.1 Programme expérimental	37
2.2.1.1 Essai de module complexe sur MR5 et MR7:	37
2.2.1.2 Essai de flexion semi-circulaire (SCB) sur MR5 et MR7.....	37

2.2.1.3	Effet du ciment sur la résistance à la rupture des enrobés recyclés à froid (MR5)	38
2.2.2	Simulation numérique	38
2.2.2.1	À l'échelle des matériaux	38
2.2.2.2	Étude à l'échelle des structures	39
CHAPITRE 3	COMPOTEMENT VISCOÉLASTIQUE DES MATÉRIAUX RECYCLÉS À FROID (MR5 ET MR7)	41
3.1	Introduction	41
3.2	Matériaux	41
3.3	Préparation des éprouvettes	44
3.4	Essai de module complexe	46
3.4.1	Modélisation du comportement viscoélastique : modèle 2S2P1D	48
3.4.2	Réalisation de l'essai	51
3.5	Résultats de l'essai	52
3.6	Conclusion	57
CHAPITRE 4	CHARACTÉRISATION DE LA RÉSISTANCE À LA RUPTURE DES MATÉRIAUX RECYCLÉS À FROID (MR5 ET MR7)	59
4.1	Introduction	59
4.2	Essai de flexion semi-circulaire	59
4.2.1	Préparation des éprouvettes	59
4.2.2	Principe de l'essai SCB	61
4.3	Résultats de l'essai	64
4.4	Conclusion	68
CHAPITRE 5	EFFET DE LA TENEUR EN CIMENT SUR LA RÉSISTANCE À LA FISSURATION DES MR5	71
5.1	Introduction	71
5.2	Problématique de la teneur en ciment dans les MR5	71
5.3	Mélanges testés	72
5.4	Évaluation de la résistance à la fissuration	74
5.4.1	Indice de flexibilité	75
5.4.2	Indice de résistance à la fissuration (CRI)	76
5.5	Analyse des résultats	77
5.6	Conclusion	81
CHAPITRE 6	MODÉLISATION DE L'INITIATION ET LA PROPAGATION DES FISSURES DANS LES MR5 ET MR7	83
6.1	Introduction	83
6.2	Modélisation de la VEL dans ABAQUS	83
6.3	Modélisation de l'initiation et la propagation de fissure	86
6.4	Développement du MEF de l'essai SCB	88
6.4.1	Géométrie	88
6.4.2	Propriétés des matériaux	90
6.4.3	Maillage	91

6.5	Calibration du modèle.....	92
6.6	Vérification du modèle et analyse des résultats.....	95
6.7	Conclusion	98
CHAPITRE 7 MODÉLISATION DES CHAUSSEES BITUMINEUSES		
	PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS	101
7.1	Introduction.....	101
7.2	Modélisation des chaussées par éléments finis.....	102
7.3	L'essai de deflectomètre à masse tombante (FWD)	102
7.4	Description de la section d'étude.....	104
7.5	Modélisation de la structure de chaussée.....	109
7.5.1	Géométrie du modèle.....	109
7.5.2	Définition des propriétés des matériaux	110
7.5.3	Conditions aux limites et chargement.....	111
7.5.4	Maillage	113
7.5.5	Résultats préliminaires.....	114
7.6	Analyse paramétrique	115
7.6.1	Effet de la dimension horizontale du modèle	116
7.6.2	Effet de la dimension verticale du modèle.....	117
7.6.3	Effet du maillage.....	118
7.7	Validation du modèle.....	119
7.8	Comparaison entre les comportements élastique et viscoélastique des enrobés bitumineux	121
7.9	Conclusion	122
CHAPITRE 8 MODÉLISATION ET ÉVALUATION DU COMPORTEMENT		
	DES CHAUSSEES RÉHABILITÉES.....	123
8.1	Introduction.....	123
8.2	Modélisation des chaussées contenant des fissures	123
8.3	Application de la XFEM pour modéliser les chaussées réhabilitées	125
8.3.1	Définition des structures	125
8.3.2	Propriétés des matériaux	126
8.3.3	Développement des modèles des structures.....	128
8.4	Comportement de la structure existante et des chaussées réhabilitées	133
8.4.1	Contraintes critiques	134
8.4.2	Déformations critiques.....	136
8.4.3	Déflexions à la surface des structures.....	137
8.5	Évaluation de la fissuration des techniques de retraitement type I et II à la fissuration	137
8.5.1	Retraitement type I.....	138
8.5.2	Retraitement type II	140
8.6	Comportement des structures réhabilitées sous charges répétées.....	142
8.7	Analyse paramétrique	147
8.7.1	Retraitement type I.....	147
8.7.1.1	Effet du nombre de fissures existantes.....	147

8.7.1.2	Effet de l'ouverture de la fissure existante	149
8.7.1.3	Effet de la longueur de fissure existante	150
8.7.2	Retraitement type II	151
8.8	Conclusion	153
CONCLUSION.....		155
RECOMMANDATIONS		161
ANNEXE I	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	163
ANNEXE II	RESULTATS NUMÉRIQUES.....	217
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		221

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Granulométrie et formulation des MR5 et MR744
Tableau 3.2	Détermination des paramètres du modèle 2S2P1D ($T_{ref}=22^{\circ}C$).....56
Tableau 4.1	Valeurs de COV de l'énergie de déformation en fonction de la longueur de fissure initiale68
Tableau 4.2	Valeurs moyennes des résultats de l'essai SCB pour MR5 et MR768
Tableau 5.1	Granulométrie et formulation des mélanges testés74
Tableau 5.2	Taux de libération d'énergie (J_c) et les valeurs de COV pour différentes teneurs en ciment.....78
Tableau 6.1	Les constantes des séries de Prony de MR5 et MR791
Tableau 6.2	Paramètres de la loi de zone cohésive.....95
Tableau 7.1	Propriétés des matériaux des couches de la chaussée106
Tableau 7.2	Variation du bassin de déflexions et la déformation horizontale à la base de l'enrobé en fonction de la dimension verticale du modèle...118
Tableau 7.3	Variation du bassin de déflexions et la déformation horizontale à la base de l'enrobé en fonction du nombre des éléments.....118
Tableau 8.1	Propriétés des matériaux des structures étudiées127
Tableau 8.2	Résistance à la traction et l'énergie de rupture cohésive des MR5 en fonction de la teneur en ciment152

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Structure d'une chaussée bitumineuse avec terminologies québécoises et françaises Tirée de Bitume Québec (2015).....6
Figure 1.2	Sollicitation en traction et en compression des enrobés lors du passage des véhicules (Doucet & Auger, 2010).....8
Figure 1.3	Comportement mécanique des enrobés bitumineux à température fixe (Di Benedetto & Corté, 2005).....10
Figure 1.4	Mécanisme de fissuration par fatigue dans les chaussées bitumineuses (Priest & Timm, 2006).....12
Figure 1.5	Les sollicitations induites par le trafic sur une chaussée bitumineuse adaptée de (Di Benedetto & Corté, 2005).....13
Figure 1.6	Technique de retraitement type I (Bitume-Québec, 2018)15
Figure 1.7	Technique de retraitement type II (Bitume-Québec, 2018)16
Figure 1.8	Schéma de fonctionnement de la méthode mécaniste empirique adapté de (NCHRP, 2004)20
Figure 1.9	Les trois modes de rupture (Anderson, 2005).....22
Figure 1.10	Principe du modèle de zone cohésive (Baek, 2010)24
Figure 1.11	Essai de flexion 3 points (Wagoner et al., 2005)25
Figure 1.12	Essai de traction compacte en disque (Wagoner et al., 2005)26
Figure 1.13	Essai de flexion semi-circulaire (ASTM, 2016)27
Figure 1.14	Stratégie d'enrichissement des nœuds (Prabel, 2007).....32
Figure 2.1	Logigramme présentant la méthodologie adoptée dans cette thèse36
Figure 3.1	Classification des matériaux utilisés (MR) (Marquis, Bergeron, Pellerin, Bérubé, & Decreon, 1998).....42
Figure 3.2	Granulats recyclés (GBR) et vierges (MG-20) utilisés.....43

Figure 3.3	Courbes granulométriques des GBR et MG-20 utilisés pour la fabrication des MR	43
Figure 3.4	Préparation des éprouvettes pour l'essai de module complexe (a) Compactage à la PCG (b) Carottage des éprouvettes (c) Entreposage des éprouvettes (d) Collage des casques.....	45
Figure 3.5	Représentation du modèle 2S2P1D (Olard & Di Benedetto, 2003)	49
Figure 3.6	Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur le module complexe représenté dans le plan Cole-Cole (Lamothe, 2014).....	50
Figure 3.7	Essai de module complexe.....	52
Figure 3.8	Module complexe dans le plan Cole-Cole	53
Figure 3.9	Module complexe dans l'espace de Black.....	53
Figure 3.10	Courbe isotherme de MR5	54
Figure 3.11	Courbe isotherme de MR7	55
Figure 3.12	Courbes maitresses de la norme de module complexe de MR5 et MR7 ...	56
Figure 3.13	Courbes des modules complexe normalisés dans le plan Cole-Cole	57
Figure 4.1	Préparation des éprouvettes pour l'essai SCB (a) Éprouvettes cylindriques (b) Découpage des éprouvettes semi-circulaires (c) Entaillage des éprouvettes (d) Éprouvette final pour l'essai SCB.....	60
Figure 4.2	Dispositif de l'essai SCB	63
Figure 4.3	Calcul du taux de libération d'énergie critique (a) Exemple de la courbe force-déplacement de l'essai SCB (b) Variation de l'énergie de déformation en fonction de la longueur de fissure (ASTM, 2016).....	64
Figure 4.4	Résultats de l'essai SCB pour MR5 (a) Courbe charge-déplacement (b) Énergie de déformation en fonction de la profondeur de fissure	66
Figure 4.5	Résultats de l'essai SCB pour MR7 (a) Courbe charge-déplacement (b) Énergie de déformation en fonction de la longueur de fissure initiale.....	67
Figure 4.6	Rupture des éprouvettes de l'essai SCB	68
Figure 5.1	Courbe force-déplacement typique dérivée de l'essai SCB adapté de (Ozer et al., 2016).....	76
Figure 5.2	Courbe force-déplacement des MR5 pour différentes teneurs en ciment..	78

Figure 5.3	Indice de flexibilité (FI) et indice de résistance à la fissuration (CRI) pour différentes teneurs en ciment dans la condition sèche.....	80
Figure 5.4	Indice de flexibilité (FI) et indice de résistance à la fissuration (CRI) pour différentes teneurs en ciment dans la condition humide.....	81
Figure 6.1	Modèle de Maxwell (a) Modèle de maxwell simple (b) Modèle de maxwell généralisé (Baek, 2010).....	84
Figure 6.2	Représentation schématique du modèle de zone cohésive (MZC) (Y.-R. Kim, 2011).....	88
Figure 6.3	Dimensions du dispositif de l'essai SCB (ASTM, 2016)	89
Figure 6.4	Géométrie et les conditions aux limites du modèle de SCB	90
Figure 6.5	Maillage du modèle de SCB	92
Figure 6.6	Variation du module d'élasticité E de MR7	93
Figure 6.7	Variation de la résistance à la traction cohésive T_{\max} de MR7	94
Figure 6.8	Variation de l'énergie de rupture cohésive Γ_c de MR7.....	94
Figure 6.9	Calibration des courbes force-déplacement de MR5 et MR7	95
Figure 6.10	Validation du modèle SCB avec une fissure initiale de 38 mm pour MR5 et MR7	96
Figure 6.11	Essai SCB avec une fissure initiale de 25 mm (a) Chemin de fissure numérique (b) Chemin de fissure en laboratoire.....	96
Figure 6.12	(a) L'initiation de fissuration (b) La variable STATUSXFEM de MR7 (fissure de 25 mm)	97
Figure 6.13	(suite) (b) La variable STATUSXFEM de MR7 (fissure de 25 mm)	98
Figure 7.1	Les systèmes de FWD (MTQ, 2013)	103
Figure 7.2	Système de chargement du FWD (Diffiné, 2012)	104
Figure 7.3	Bassin de déflexion dans les structures de chaussées (Diffiné, 2012)....	104
Figure 7.4	Emplacement de la section étudiée (Adaptée de Google Map)	105
Figure 7.5	Structure de chaussée de la section 35-0801 du Nouveau Mexique	106
Figure 7.6	Module de relaxation de l'enrobé (Chatti et al., 2017).....	107

Figure 7.7	Historique de chargement du FWD	108
Figure 7.8	Historique de déflexions mesurées par chaque géophone	108
Figure 7.9	Géométrie du modèle de la structure de chaussée étudiée.....	110
Figure 7.10	Définition des propriétés des matériaux dans ABAQUS.....	111
Figure 7.11	Application des conditions aux limites du modèle	112
Figure 7.12	Définition du chargement du FWD dans ABAQUS.....	113
Figure 7.13	Maillage du modèle.....	114
Figure 7.14	Résultats de déflexions (U2) et de déformations horizontales (E11) dans la structure de chaussée	115
Figure 7.15	Effet de la dimension horizontale du modèle sur le bassin de déflexion (U2).....	116
Figure 7.16	Effet de la dimension horizontale du modèle sur la déformation horizontale (E11) à la base de l'enrobé.....	117
Figure 7.17	Comparaison entre l'historique de déflexion numérique et mesuré dans le géophone situé sous la charge.....	120
Figure 7.18	Comparaison entre le bassin de déflexion numérique et mesuré.....	120
Figure 7.19	Comparaison entre le bassin de déflexion mesuré et calculé avec un comportement élastique et viscoélastique de l'enrobé.....	121
Figure 8.1	Structure de chaussée existante choisie	126
Figure 8.2	Définition des propriétés des matériaux dans ABAQUS.....	129
Figure 8.3	Définition de la fissure de type XFEM dans ABAQUS	130
Figure 8.4	Structure existante.....	131
Figure 8.5	Structure réhabilitée par un planage-resurfaçage.....	131
Figure 8.6	Structure réhabilitée par un retraitement type I	132
Figure 8.7	Structure réhabilitée par un retraitement type II.....	132
Figure 8.8	Maillage du modèle du retraitement type I.....	133

Figure 8.9	Distribution des contraintes de traction dans les structures étudiées a) structure existante b) Planage-resurfaçage c) Retraitement type I d) Retraitement type II.....	135
Figure 8.10	Déformations critiques dans les structures étudiées	136
Figure 8.11	Déflexions à la surface des structures modélisées	137
Figure 8.12	Initiation de la fissure dans les éléments de l'enrobé existant.....	139
Figure 8.13	Propagation des fissures aux éléments de la base de la couche MR7.....	139
Figure 8.14	STATUSXFEM des éléments endommagés.....	140
Figure 8.15	Initiation de la fissuration à la base de la couche MR5	141
Figure 8.16	STATUSXFEM des éléments endommagés.....	141
Figure 8.17	Contrainte de traction à la pointe de la fissure existante	143
Figure 8.18	STATUSXFEM dans le retraitement type I soumis à 10000 répétitions.....	144
Figure 8.19	Déformation horizontale à la base de la couche de surface	144
Figure 8.20	Contrainte de traction à la base de la couche de MR5	145
Figure 8.21	STATUSXFEM dans le retraitement type II soumis à 10000 répétitions.....	146
Figure 8.22	Déformation horizontale à la base de la couche de surface	146
Figure 8.23	Déformation horizontale à la base de couche de MR5	147
Figure 8.24	Fissuration du retraitement type I (a) contenant une fissure existante (b) contenant deux fissures existantes.....	148
Figure 8.25	Effet du nombre de fissures sur le retraitement type I.....	149
Figure 8.26	Effet de l'ouverture de la fissure existante sur le retraitement de type I	150
Figure 8.27	Effet de la longueur de la fissure existante le retraitement de type I.....	151
Figure 8.28	Initiation des fissures dans la couche de surface du retraitement de type II	152

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
COV	Coefficient de variation
CAX4R	Quadrilatère axisymétrique à 4 nœuds
CPE4R	<i>4-node bilinear plain strain elements with reduced integration</i>
DCT	<i>Disk-Shaped Compact Tension</i>
E*	Essai de module complexe
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GBR	Granulats Bitumineux Recyclés
LC	Laboratoire des chaussées
LTPP	<i>Long-Term Pavement Performance</i>
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
LEFM	<i>Linear Elastic Fracture Method</i>
MEF	Méthode des Éléments Finis
MG-20	Matériau granulaire de grosseur nominale de 0-20 mm
MR	Matériaux recyclés
MR5	Matériaux recyclés contenant 50 % de granulats bitumineux recyclés
MR7	Matériaux recyclés contenant 100 % de granulats bitumineux recyclés
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MZC	Modèle de Zone Cohésive
PETT	Principe d'Équivalence Temps-Température
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PG	Performance Grade (Grade de performance d'un bitume)
PTFE	<i>Polytétrafluoroéthylène</i>
RP	Point de référence
SCB	<i>Semi-Circular Bending</i> (flexion semi-circulaire)
SENB	<i>Single-Edge Notched Beam</i>
VEL	Viscoélastique linéaire
XFEM	<i>Extended Finite Element Method</i>

2D	2 dimensions
2S2P1D	<i>2 springs, 2 parabolic elements, 1 dashpot</i>
3D	3 dimensions

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

a	longueur de la fissure initiale (m)
a _T	Facteur de translation
b	Épaisseur de l'éprouvette (m)
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
CRI	Indice de résistance à la fissuration
D	Déflexion (mm)
d _{gb}	Densité du granulat brut
d _{mm}	Densité maximale
E	Module d'élasticité (MPa)
E*	Norme du module complexe (MPa)
E ₀	Module vitreux (MPa)
E ₀₀	Module statique (MPa)
E ₁	Partie réelle du module complexe (MPa)
E ₂	Partie imaginaire du module complexe (MPa)
E(t)	Module de relaxation (MPa)
E11	Déformation horizontale (ABAQUS)
E22	Déformation verticale (ABAQUS)
FI	Indice de flexibilité
f	Fréquence (Hz)
G	Module de cisaillement (MPa)
g _i	Termes adimensionnels dans la série de Prony
h	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
i	Le nombre complexe défini par $i^2 = -1$
J _c	Taux de libération d'énergie critique (kJ/m ²)
k	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
K _c	Ténacité à la rupture (MPa.m ^{1/2})
m	Point d'inflexion de la courbe
P	Force (KN)

P_{\max}	Force maximale (KN)
PG IT	Température intermédiaire de la classe de performance (°C)
PG HT	Limite supérieure de la classe de performance (°C)
PG LT	Limite inférieure de la classe de performance (°C)
S11	Contrainte horizontale (ABAQUS, MPa)
S22	Contrainte verticale (ABAQUS, MPa)
T	Température (°C)
T_{ref}	Température de référence (°C)
U	Énergie de déformation (kJ)
u	Déplacement vertical du rouleau de chargement (mm)
U2	Déplacement vertical (mm)
T	Température (°C)
T_{ref}	Température de référence (°C)
T_{\max}	Contrainte cohésive critique (MPa)
W	Hauteur de l'éprouvette (m)
ω	Pulsation
φ	Angle de phase
β	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
δ	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
τ	Temps caractéristique
τ_i	Temps de relaxation
η	Viscosité Newtonienne
ν	Coefficient de poisson
ε	Déformation
ε_0	Déformation maximale enregistrée
σ	Contrainte (MPa)
σ_0	Contrainte maximale appliquée (MPa)
Γ_c	Énergie de rupture cohésive (kJ / m ²)

INTRODUCTION

Les réseaux routiers sont l'un des plus importants éléments dans le développement économique des pays. Ils facilitent l'échange économique et commercial entre populations, les déplacements des personnes et de leurs biens. Au Québec, le réseau routier comprend environ 325 000 km de routes dont 31 023 km sont sous la responsabilité du Ministère des Transports du Québec (MTQ, 2019). Sur ces dernières, 94 % sont constituées de chaussées bitumineuses (Bitume-Québec, 2010).

L'état des routes au Québec est un sujet très controversé et attire l'intérêt de la société québécoise en raison de son mauvais état. Cette situation est attribuable, entre autres, à l'augmentation du trafic et des charges permises, aux conditions climatiques particulièrement rigoureuses au Québec et à la mise en œuvre des matériaux. Un manque d'entretien a également un impact sur la durabilité des chaussées. Outre la menace de la sécurité des usagers, les retards dans l'entretien et dans la réhabilitation peuvent provoquer des endommagements majeurs et rendre indispensable une réfection totale de la chaussée qui nécessite des travaux très coûteux.

Sous l'effet de la répétition des charges de trafic et les variations thermiques importantes, les chaussées bitumineuses sont exposées à plusieurs types de dégradations notamment l'orniérage, la fissuration par fatigue et la fissuration thermique (Y. Huang, 2004; MTQ, 2013; X. Wang, Li, Zhong, & Xu, 2018). Afin de maintenir les chaussées en état sécuritaire et éviter les travaux de réfection, une réhabilitation de la chaussée est nécessaire. Depuis 1975, le recyclage des enrobés a commencé à gagner en popularité pour la réhabilitation des chaussées. Ces techniques sont considérées de nos jours performantes, elles constituent un des piliers du développement durable des chaussées à travers la maîtrise de l'impact environnemental et la préservation des ressources naturelles. Les techniques de recyclage à froid permettent d'économiser 62% de la consommation des granulats et de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 52% par rapport au revêtement en enrobé à chaud (Xiao, Yao, Wang, Li, & Amirkhanian, 2018).

Au Québec, l'utilisation des techniques de recyclage à froid, notamment le retraitement en place type I et type II, est devenue une pratique très courante dans la réhabilitation des chaussées depuis les années 90 (Bergeron, 2005b). Le retraitement type I (MR7) est une technique de recyclage qui consiste à fragmenter les matériaux du revêtement existant et à incorporer un liant bitumineux au matériau fragmenté pour le traiter et lui donner de la cohésion. Alors que le retraitement en place type II (MR5) est une intervention double qui consiste, en premier temps, à fragmenter l'enrobé sur toute son épaisseur en y incorporant une partie de la fondation granulaire. La deuxième opération permet d'introduire un liant bitumineux, un liant hydraulique ou la combinaison des deux au matériau décohésionné. Pour les deux techniques, les matériaux recyclés obtenus, par procédé en place ou en centrale, sont par la suite épandus mécaniquement et compactés. Ces opérations sont suivies d'un resurfaçage.

Certes, les différentes techniques de réhabilitation permettent d'améliorer l'état structural, mais l'effet de la structure existante et des matériaux recyclés sur le comportement de ces techniques est venu remettre en cause la différence entre le comportement d'une chaussée réhabilitée et celui d'une chaussée neuve. En effet, lorsqu'une technique de réhabilitation est exécutée sur une chaussée existante contenant des fissures, tout mouvement survenu dans les couches sous-jacentes crée des contraintes dans les nouvelles couches et peut ainsi générer la remontée des fissures si les contraintes dépassent la résistance à la fissuration des nouveaux matériaux (Dave, Song, Buttlar, & Paulino, 2007; Elseifi & Al-Qadi, 2005).

Le dimensionnement structural d'une chaussée consiste à déterminer la nature et l'épaisseur des couches de matériaux à mettre en place, permettant de résister aux diverses sollicitations dues au trafic et au climat. Les méthodes de dimensionnement sont généralement réalisées d'une manière empirique qui font appel à des expériences comparant le comportement à long terme de diverses structures pour différentes conditions climatiques et de trafic. Cependant, ces méthodes ne s'appliquent pas à des matériaux, des conditions et des configurations de structure de chaussées différentes de celles de l'expérimentation. De ce fait et avec l'accroissement des charges du trafic, la tendance générale est à l'utilisation des méthodes

mécanistes empiriques. Ces méthodes font appel à une approche analytique qui est complétée par des données empiriques. Elles sont basées sur des modèles mathématiques pour déterminer la réponse d'une chaussée, en termes de contraintes et déformations, soumises aux sollicitations induites par les charges de trafic et les effets climatiques. Elles consistent à évaluer la performance de la chaussée en combinant le comportement de la structure, déterminé analytiquement, avec les dommages observés sur le site. Néanmoins ces méthodes présentent plusieurs inconvénients. En fait, la majorité des outils de dimensionnement se basent sur le modèle multicouche de Burmister dont toutes les couches de la structure sont supposées infinies en plan, constituées de matériaux homogènes, isotropes, et ayant un comportement élastique linéaire (Burmister, 1945; Y. H. Huang, 2004). Cependant, les enrobés bitumineux sont des matériaux de comportement viscoélastique. De plus, les modèles actuels des méthodes mécaniste-empirique ne tiennent pas compte de l'existence de discontinuités et des fissures dans les chaussées.

Actuellement, pour représenter l'évolution de la condition de la chaussée après la réhabilitation, les approches empiriques appliquent un facteur d'équivalence en fonction de l'évaluation de la structure existante (Abaza, 2005; Y. H. Huang, 2004), tandis que les méthodes mécanistes empiriques utilisent des méthodes adaptées aux chaussées neuves (Y. H. Huang, 2004; NCHRP, 2004). Ainsi, il n'existe pas des méthodes mécanistes de prédiction du comportement des chaussées réhabilitées.

L'étude de l'initiation et de la propagation des fissures est importante pour prédire la performance de la chaussée et pour planifier l'entretien approprié (Ameri, Mansourian, Khavas, Aliha, & Ayatollahi, 2011). Plusieurs recherches ont été menées sur la prévision de l'initiation et la propagation des fissures dans les chaussées réhabilitées par un planage-resurfaçage appliqué sur une chaussée existante bitumineuse ou en béton (Dave et al., 2007; Kazimierowicz-Frankowska, 2016; Rashadul Islam, Vallejo, & Tarefder, 2016). Cependant, aucune étude a été réalisée pour examiner la performance à la fissuration des chaussées réhabilitées par les techniques de recyclage à froid. Il est nécessaire dans le contexte actuel de pouvoir modéliser les structures réhabilitées afin de prévoir leur performance à la fissuration.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail de thèse qui vise à modéliser et évaluer le comportement des chaussées réhabilitées en utilisant la méthode des éléments finis (MEF). Cette approche permet de simuler le comportement viscoélastique des matériaux de chaussées, principalement l'initiation et la propagation des fissures (Elseifi, Baek, & Dhakal, 2018). Pour ce faire, l'étude a été divisée en deux volets : 1) une étude à l'échelle des matériaux (MR5 et MR7) et 2) une étude à l'échelle des structures réhabilitées.

Les travaux effectués sont présentés en huit chapitres. Dans l'introduction, on commence par la mise en contexte et la définition de la problématique sur laquelle porte cette thèse. Le premier chapitre présente la revue de littérature alors que le deuxième chapitre est consacré aux objectifs de la recherche et à la méthodologie adoptée. Le chapitre 3 porte sur la caractérisation du comportement viscoélastique linéaire (VEL) des MR5 et MR7 en utilisant l'essai de module complexe, tandis que leurs propriétés à la rupture déterminées à partir de l'essai de flexion semi-circulaire (SCB) sont présentées dans le chapitre 4. Le chapitre 5 est consacrée pour l'étude de l'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la fissuration des MR5 en utilisant l'essai SCB.

Pour définir les caractéristiques des matériaux dans la modélisation des structures, un modèle en éléments finis de l'essai SCB a été calibré selon les résultats expérimentaux. Cette partie est présentée au chapitre 6. La modélisation des structures de chaussées est montrée dans les deux derniers chapitres, soit 7 et 8. Le chapitre 7 présente les étapes de modélisation d'une structure de chaussée réelle disponible dans la base données LTPP par la méthode des éléments finis. Finalement, le chapitre 8 porte sur la modélisation des chaussées réhabilitées suivi de la conclusion.

CHAPITRE 1

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

La gestion d'un réseau routier permet de piloter les étapes indispensables pour maintenir les chaussées en bonne condition, notamment le dimensionnement, l'entretien et la réhabilitation. Afin d'établir le cadre général de cette étude, quelques aspects bibliographiques liés à ces étapes sont présentés dans ce chapitre. On commence d'abord par exposer des généralités sur la structure des chaussées bitumineuses, sur les sollicitations ainsi que sur les enrobés bitumineux. Les différentes dégradations observées sur les chaussées bitumineuses et les techniques de réhabilitation par recyclage à froid sont également présentées. Par la suite, les méthodes de dimensionnement actuelles et ses limites seront brièvement abordées. Dans ce projet, on s'intéresse également à la modélisation de la fissuration des chaussées, donc la mécanique de rupture est présentée. Cette dernière est un domaine si vaste qu'il est difficile de pouvoir en présenter tous les aspects. On insistera particulièrement sur le modèle de zone cohésive qu'on va adapter dans cette étude et les essais de rupture des enrobés bitumineux les plus utilisés dans la littérature. Finalement, on introduit, la méthode des éléments finis étendus, l'approche de modélisation de la fissuration des structures.

1.2 Généralités sur les chaussées bitumineuses

1.2.1 La structure de la chaussée

La fonction principale d'une chaussée est de permettre une circulation sécuritaire des usagers. Du point de vue structural, une chaussée doit résister aux diverses sollicitations, notamment celles dues au trafic et au climat, et elle doit assurer la distribution des efforts induits par ce même trafic dans l'infrastructure. La chaussée est une structure multicouche composée de différents matériaux d'épaisseurs variables, qui ont chacune une fonction bien définie (SETRA, 1994). Au Québec, la fondation et la sous-fondation, qui constituent le corps de la

chaussée (appelé assise en France), sont généralement composées de matériaux granulaires (Figure 1.1). Ces couches contribuent à la rigidité de la structure de chaussée en assurant la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic et la protection de la pénétration du gel. Elles répartissent les contraintes sur le sol support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles (Di Benedetto & Corté, 2005). Les couches granulaires dans les chaussées bitumineuses sont recouvertes d'un enrobé bitumineux constitué de deux ou trois couches selon les sollicitations du trafic. La couche supérieure est constituée de la couche de roulement sur laquelle s'exercent directement les agressions du trafic et du climat. La couche de liaison permet d'assurer l'étanchéité, la protection thermique et limiter la remontée des fissures (Di Benedetto & Corté, 2005). Le revêtement bitumineux apporte ainsi à la chaussée les caractéristiques recherchées pour la sécurité et le confort des usagers et assure la protection du corps de la chaussée vis-à-vis des infiltrations d'eau.

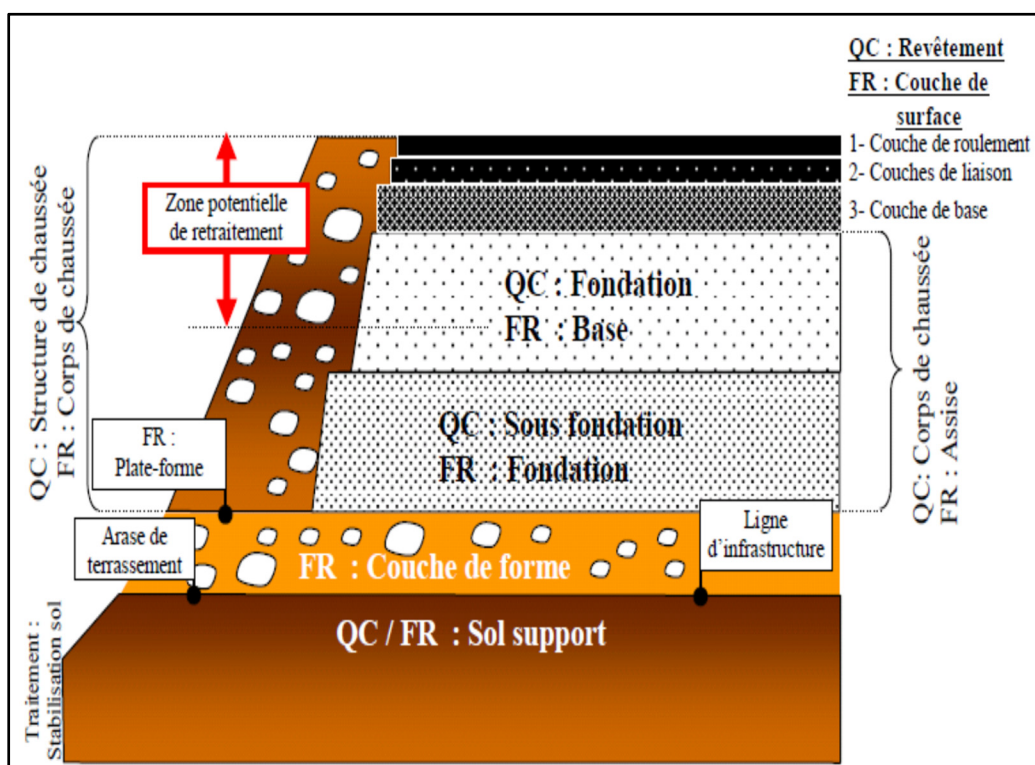


Figure 1.1 Structure d'une chaussée bitumineuse avec terminologies québécoises et françaises Tirée de Bitume Québec (2015)

1.2.2 Les sollicitations dans les chaussées bitumineuses

Les structures routières sont soumises aux diverses sollicitations, dont celles dues au trafic lourd et aux effets générés par les changements climatiques. Ces sollicitations sont des causes probables de plusieurs types de dégradation des chaussées. La rapidité de l'évolution des endommagements est liée aux propriétés et aux épaisseurs des matériaux utilisés et de leur mise en œuvre (LCPC, 1998).

1.2.2.1 L'effet du trafic

L'accroissement du nombre des véhicules qui empruntent les routes du Québec chaque année contribue fortement à l'accélération de mesures des dégradations des chaussées (Légaré, 2005). Sous l'effet des charges roulantes, chaque couche de la chaussée subit des flexions qui entraînent des contraintes de compression en haut de la couche et de traction à la base de la couche (Figure 1.2). Les tractions répétées à la base des couches d'enrobés créent des microfissures qui s'accumulent et se propagent dans tout le revêtement et apparaissent en surface sous forme de fissurations importantes (Di Benedetto & Corté, 2005; M. L. Nguyen, 2009; Perret, 2003).

1.2.2.2 Sollicitations thermiques

Les conditions climatiques rigoureuses au Québec s'expliquent par une grande variation de température entre l'hiver et l'été allant de 60 à 70 degrés (Légaré, 2005). En raison du comportement thermosusceptible des matériaux bitumineux, ces variations thermiques peuvent engendrer la diminution de la rigidité de l'enrobé et entraîner des contraintes importantes dans les couches liées de la chaussée. Ces contraintes avec celles induites par le trafic pouvant entraîner le phénomène de fissuration thermique.

D'autre part, en hiver le sol gèle à une profondeur allant jusqu'à 3 m à certain endroit, ce phénomène peut conduire à l'augmentation considérable et progressive du volume du sol qui engendrera le soulèvement des couches du revêtement (Baaj, 2012).

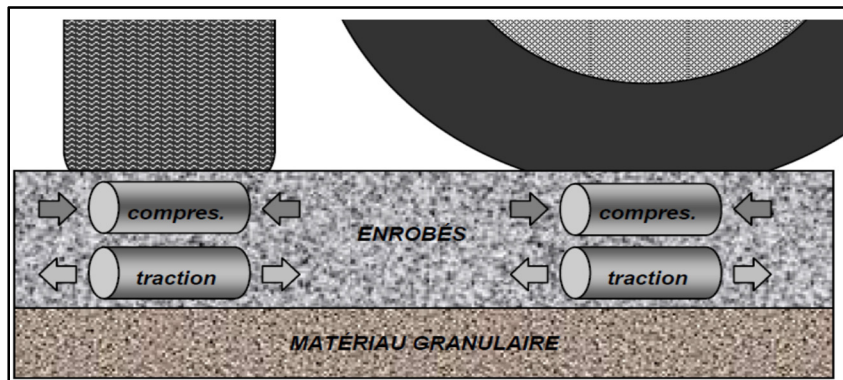


Figure 1.2 Sollicitation en traction et en compression des enrobés lors du passage des véhicules (Doucet & Auger, 2010)

1.2.3 Les enrobés bitumineux

Les premières routes recouvertes en enrobés bitumineux sont apparues au Canada en 1888 à Toronto et en 1889 à Montréal. Elles offrent aux usagers une surface de roulement confortable et sécuritaire, imperméabilise et transmettent la charge des véhicules aux couches sous-jacentes. Un enrobé bitumineux est un mélange composé de granulats, d'un liant bitumineux et éventuellement d'additifs (Bitume-Québec, 2010) :

- **Les granulats** : l'enrobé bitumineux est constitué d'environ 95 % en masse de granulats, donc le choix de ce dernier est très important. Cette importance va directement affecter les caractéristiques mécaniques et fonctionnelles du mélange bitumineux. Un granulat désigne un ensemble de particules sans cohésion de diamètres compris entre 0 et 125 mm, provenant de roches consolidées ou de matériaux recyclés. Les caractéristiques des granulats sont déterminées en fonction de leur résistance mécanique (résistance à l'usure, aux chocs et à la fragmentation) (MTQ, 2011).

- **Le liant bitumineux** : le bitume constitue environ 5 % massique de l'enrobé bitumineux, son rôle est d'enrober le squelette granulaire et conférer la cohésion et l'imperméabilité des enrobés, il contribue également à la rigidité et à la résistance aux déformations des enrobés. C'est un produit visqueux constitué principalement de composés hydrocarbonés et de leurs dérivés, obtenu par raffinage d'un pétrole brut avec ou sans additifs (Di Benedetto & Corté, 2005). Le bitume possède un comportement visqueux ou élastique selon la température et les charges imposées, il confère ainsi la propriété viscoélastique à l'enrobé. Cette propriété rend les enrobés bitumineux à 100% recyclables, car le bitume conserve ces propriétés viscoélastiques lors de la fabrication de nouveaux enrobés (Bitume-Québec, 2010).

1.2.3.1 Les propriétés mécaniques des enrobés dans les structures de chaussée

Le revêtement bitumineux doit supporter les charges dues au trafic, être confortable et sécuritaire et protéger les diverses couches de la fondation contre les charges et les agents atmosphériques (Langlois, 2005). Lors du passage des véhicules, la partie supérieure de la couche d'enrobé est soumise à des contraintes de compression alors que la partie inférieure est soumise à des contraintes de traction.

Les enrobés bitumineux ont un comportement complexe. Il existe quatre principaux types de comportements classés en fonction de l'amplitude de déformation $|\epsilon|$ et du nombre de chargements N comme présenté dans la Figure 1.3 (Di Benedetto & Corté, 2005) :

- **Comportement fortement non linéaire** : ce comportement apparaît avec un faible nombre de chargements et sous l'action de quelques % de déformations.
- **Comportement viscoélastique linéaire** : ce comportement est considéré pour des chargements comprennent des petites déformations (10^{-4} m/m) et quelques centaines de cycles.
- **La fatigue** : c'est un phénomène d'endommagement des enrobés bitumineux développé sous l'action des faibles déformations et pour plusieurs dizaines de milliers de cycles de chargement.

- **L'orniérage** : c'est un endommagement qui résulte de l'accumulation des déformations permanentes à la surface de l'enrobé, développé sous l'action des cycles de chargement et des déformations d'amplitudes légèrement inférieures à ceux entraînant la rupture.

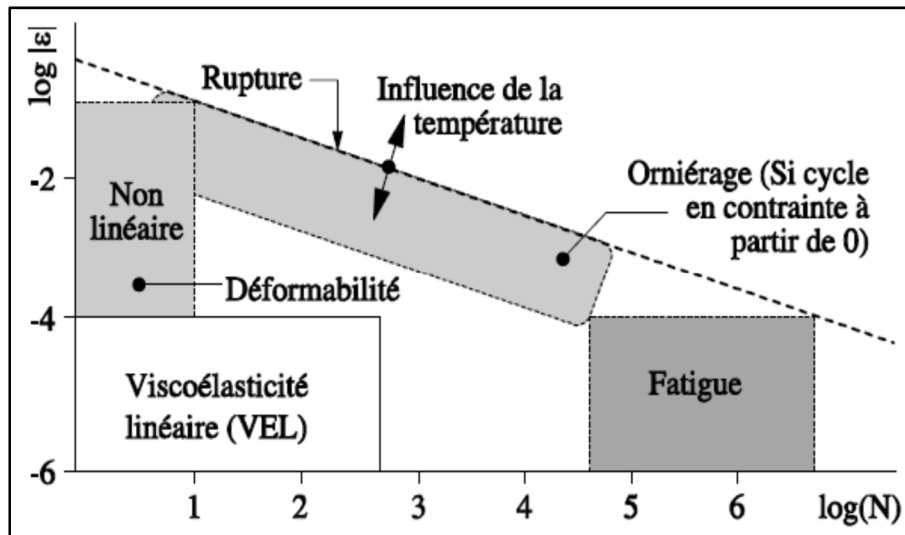


Figure 1.3 Comportement mécanique des enrobés bitumineux à température fixe (Di Benedetto & Corté, 2005)

1.2.3.2 Le module complexe

Comme on a mentionné précédemment, le comportement des enrobés est fortement lié à la température et la fréquence de chargement, du fait de la composante visqueuse du comportement visqueux du liant bitumineux. On utilise l'essai de module complexe (E^*) pour caractériser le comportement viscoélastique linéaire (VEL) des enrobés. L'essai consiste à soumettre, en conditions isothermes, une éprouvette d'enrobé à des sollicitations cycliques de forme sinusoïdale et de fréquences variées. L'essai peut être effectué en mode contrainte ou en mode déformation contrôlée et doit être réalisé à petites déformations où l'enrobé se comporte principalement comme un matériau viscoélastique linéaire (Di Benedetto & Corté, 2005). Il existe plusieurs essais pour déterminer le module complexe voire les essais de traction ou compression, directe ou indirecte, ainsi que les essais de flexion. L'essai de traction compression est le plus simple à exploiter pour déterminer le module complexe d'un enrobé

étant donné que son mode de chargement est homogène (la contrainte est uniforme dans toute l'éprouvette) permet de calculer l'état de contrainte et de déformation directement dans l'axe de sollicitation (Doucet & Auger, 2010).

La norme du module complexe $|E^*|$ correspond au rapport entre l'amplitude de la contrainte sinusoïdale et l'amplitude de la déformation sinusoïdale. Cette valeur est une approximation du module élastique d'un matériau viscoélastique, qui peut être utilisée pour le dimensionnement des chaussées lorsque les lois de l'élasticité sont employées. En outre, la réponse du matériau sous sollicitation est caractérisée par un angle de déphasage (ϕ) qui varie entre 0° pour un matériau purement élastique et 90° pour un matériau purement visqueux (Doucet & Auger, 2010).

Plusieurs modèles de calcul rhéologique ont été développés permettant de calculer le module complexe sur une plage de température et de fréquence. Ces modèles utilisent la combinaison de ressorts (élément élastique) et d'amortissements linéaire et non linéaire (éléments visqueux newtoniens et autres) (Olard & Di Benedetto, 2003). De nombreuses expressions analytiques sont ainsi proposées comme les séries de Prony ou de Dirichlet. Ces dernières représentations se basent sur la décomposition exponentielle (M. L. Nguyen, 2009). Ces modèles sont présentés dans le chapitre 3 et 6.

1.2.4 Déggradations des chaussées bitumineuses

Les dégradations des chaussées se classent en deux grandes familles : les dégradations superficielles et les dégradations structurales. Les premières apparaissent dans le revêtement en lui affectant ses qualités superficielles alors que les dégradations structurales se manifestent au sein de la structure de la chaussée ou dans son sol support (LCPC, 1998). Les dégradations structurales les plus importantes et les plus préjudiciables pour la structure de la chaussée sont la fissuration et l'orniérage (SETRA, 1994; St-Laurent, 1995). En outre, l'analyse et le dimensionnement des chaussées se basent sur l'évaluation de ces dégradations (NCHRP, 2004).

1.2.4.1 Fissuration par fatigue

La fatigue est l'un des principaux modes de dégradation des chaussées bitumineuses. Ce mode d'endommagement conduit à l'apparition et la croissance des fissures engendrées par la répétition d'un grand nombre de sollicitations (Priest & Timm, 2006). En effet, le passage des véhicules provoque des contraintes et des déformations à la base de la couche bitumineuse. La répétition de ces efforts engendre l'apparition et la propagation des microfissures qui conduit à l'infiltration de l'eau dans les couches non liées et provoque une détérioration structurale. La déformation horizontale en traction à la base de la couche bitumineuse est utilisée pour évaluer la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Figure 1.4) (Huang, 1993).

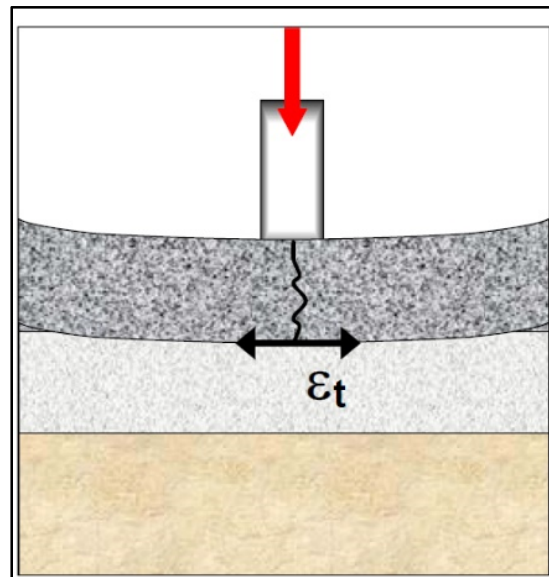


Figure 1.4 Mécanisme de fissuration par fatigue dans les chaussées bitumineuses (Priest & Timm, 2006)

1.2.4.2 Fissuration thermique

Comme on a souligné précédemment la sensibilité des enrobés bitumineux aux variations thermiques, la fissuration thermique est causée par la contraction de l'enrobé. En fait, les sollicitations dues aux changements de température affectent le comportement des matériaux

et engendrent des contraintes et des déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques qui peuvent provoquer et faire se propager des fissures avec les cycles thermiques, surtout à basse température (Lefeuvre, 2001). Ce type d'endommagement est souvent rencontré dans les pays où les conditions climatiques hivernales sont sévères (Baaj, 2012).

1.2.4.3 Déformations permanentes (Orniérage)

L'orniérage est l'un des principaux modes de dégradations des chaussées bitumineuses qui entraîne des problèmes de sécurité et de confort au roulement. Lors du passage d'une charge, des efforts de compression et de cisaillement se manifestent dans les couches de la chaussée (Figure 1.5). Ces efforts créent des déformations permanentes qui s'accumulent et entraînent l'orniérage à la surface de la chaussée. Ce phénomène s'observe, généralement sur les chaussées à fort trafic, sous forme d'une trace permanente sur les pistes des roues.

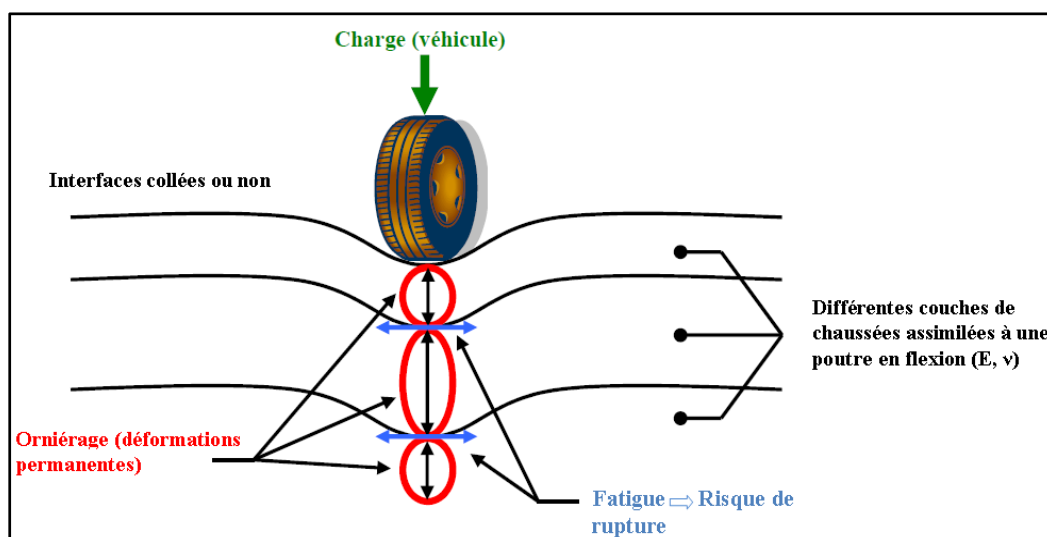


Figure 1.5 Les sollicitations induites par le trafic sur une chaussée bitumineuse adaptée de (Di Benedetto & Corté, 2005)

1.2.5 Les techniques de réhabilitation

Pour choisir la technique de réhabilitation qui permet de corriger les dégradations et assure la remise en état d'une chaussée, il faut établir un bilan de l'état de la chaussée qui comporte un

maximum de données visant l'identification des tronçons de la route, notamment les relevés de dégradations et d'uni, l'historique de construction et de réhabilitation, les parcours et la fréquence du trafic. Le bilan de l'état de la chaussée comporte aussi des investigations pour identifier la nature et l'étendue des dégradations (inspection visuelle), des relevés de la capacité structurale pour déterminer la rigidité et les épaisseurs des couches (forage, carottage, l'essai de deflectomètre à masse tombante (FWD)) ainsi que des essais au laboratoire réalisés sur les matériaux existants (AIPCR, 2003).

La réhabilitation d'une chaussée présente une amélioration structurelle ou fonctionnelle qui produit une extension de la durée de vie en renouvelant l'état de la chaussée et la qualité de roulement. Autrement, la réhabilitation est l'acte de réparation des parties d'une chaussée existante pour réinitialiser le processus de détérioration. Par exemple, enlever et remplacer la couche de roulement dans un revêtement offre un nouveau processus de détérioration qui recommence.

Depuis 1975, le recyclage des enrobés a commencé à gagner en popularité pour la réhabilitation des chaussées. Ces techniques sont considérées de nos jours comme un concept puissant, elles constituent un des piliers du développement durable des chaussées à travers la maîtrise de l'impact environnemental et la préservation des ressources naturelles. Les techniques de recyclage à froid permettent d'économiser 62% de la consommation des granulats et de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 52% par rapport au revêtement en enrobé à chaud (Xiao et al., 2018). Au Québec, l'utilisation des techniques de recyclage à froid notamment le retraitement en place type I et type II est devenue une pratique très courante dans la réhabilitation des chaussées depuis les années 90 (Bergeron, 2005b).

1.2.5.1 Les enrobés recyclés à froid

Les enrobés recyclés à froid sont des matériaux composés d'un squelette granulaire qui contient des granulats bitumineux recyclés, traités par un liant bitumineux qui peut être une émulsion ou une mousse de bitume. Le recyclage à froid peut être effectué en centrale ou

exécuté directement en place. Ces enrobés se classifient selon les proportions des granulats bitumineux recyclés (GBR), des granulats vierges et du béton de ciment dans le mélange. Le ciment accélère le processus de durcissement et peut contribuer aux propriétés mécaniques et à la durabilité du mélange. Cependant, une trop grande quantité de ciment pourrait être problématique pour ces mélanges.

1.2.5.2 Le retraitement type I

C'est une technique de recyclage qui consiste à décohesionner les matériaux du revêtement existant sur une profondeur comprise entre 90 mm et 100 mm, puis dans la même opération, à incorporer un liant bitumineux au matériau fragmenté pour le traiter et lui donner une certaine cohésion. Le matériau obtenu (MR7) est par la suite épandu mécaniquement et compacté (Figure 1.6). Cette opération est suivie d'un resurfaçage où les caractéristiques de la couche de recouvrement sont déterminées lors du dimensionnement structural. Le retraitement en place permet d'éliminer le patron de fissures sur l'épaisseur décohesionnée (MTQ, 1997). Selon des suivis effectués sur des sections d'essai au Québec, cette technique peut ralentir le phénomène de remontée des fissures. La performance de cette intervention est liée au taux de fissuration existant, au trafic et aux conditions de mise en œuvre. Par exemple, une température trop basse ou des précipitations fréquentes au moment de la mise en place ne permettent pas une bonne dispersion de la mousse de bitume dans le mélange et la cure des matériaux traités à l'émulsion (AIPCR, 2003).

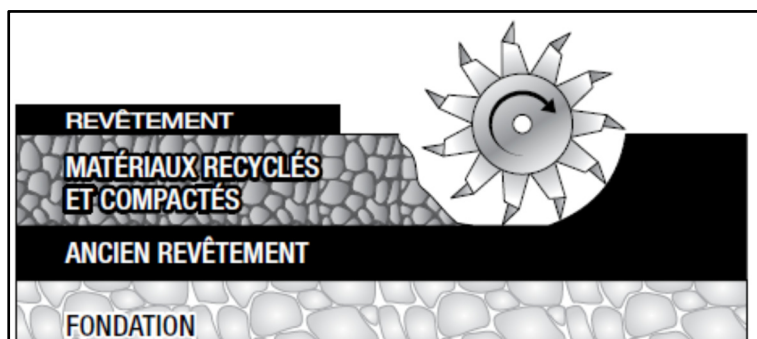


Figure 1.6 Technique de retraitement type I
(Bitume-Québec, 2018)

1.2.5.3 Le retraitement en place type II

C'est une intervention double qui consiste en premier temps à décohésionner l'enrobé sur toute son épaisseur en y incorporant une partie de la fondation granulaire. Le matériau obtenu est par la suite mis en forme et compacté pour former une nouvelle fondation. La deuxième opération permet d'introduire un liant hydrocarboné, hydraulique, ou une combinaison des deux, au matériau décohésionné. Le matériau retraité obtenu (MR5) est nivelé et compacté. Ces opérations sont suivies d'un resurfaçage (Figure 7). Le traitement de la couche de base granulaire et du revêtement dégradé permet de former une couche de base plus résistante et d'éliminer complètement les fissures présentes dans la partie supérieure de la chaussée (AIPCR, 2003). De ce fait cette technique est considérée bien adaptée pour réparer les endommagements par fatigue et les fissures thermiques (Bergeron, 2005a). Cependant, les déformations permanentes dans les couches granulaires accumulées durant la période de service de la chaussée peuvent influencer la performance de cette intervention. En outre, une portance trop faible du support peut engendrer des difficultés de l'avancement des machines de retraitement entraînant ainsi un mauvais compactage (AIPCR, 2003).

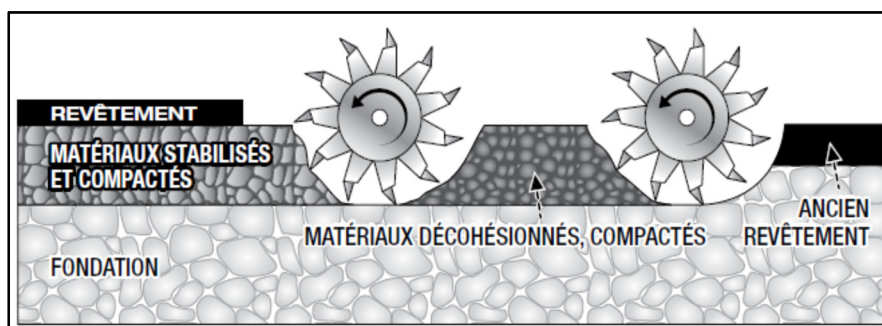


Figure 1.7 Technique de retraitement type II (Bitume-Québec, 2018)

1.3 Dimensionnement des chaussées bitumineuses

Le dimensionnement structural d'une chaussée consiste à déterminer la nature et l'épaisseur des couches de matériaux à mettre en place, permettant de résister aux diverses sollicitations

dues au trafic et au climat. Les principaux types de méthodes de dimensionnement utilisées actuellement sont : les méthodes empiriques et les méthodes mécanistes empiriques.

1.3.1 Dimensionnement empirique

Dans la plupart des régions du monde, le dimensionnement des chaussées est basé principalement sur l'expérience. Il s'agit des méthodes de dimensionnement empirique. Ces méthodes sont basées sur l'observation du comportement en grand nombre de chaussées existantes. Certaines méthodes ont été construites spécifiquement pour l'élaboration de la méthode. Elles permettent des corrélations entre les conditions de trafic et climatiques à supporter, le type de structure et les épaisseurs des couches à adopter (Y. Huang, 2004).

La méthode AASHTO est un bon exemple représentatif des méthodes empiriques et qui présente la base de la plupart des méthodes de dimensionnement actuelles en Amérique. Cette méthode est basée sur les essais AASHO réalisés de 1956 à 1960 à Ottawa et en Illinois. Ces essais comportent des sections de chaussées bitumineuses et rigides qui ont été soumises à des charges roulantes dans des conditions climatiques bien définies et avec des matériaux spécifiques. La méthode a subi plusieurs évolutions entre 1972 et 1993. En effet, les différentes équations adoptées ont été modifiées et développées pour y incorporer les résultats d'autres études et généraliser l'applicabilité des procédures de conception sous des conditions différentes (AASHTO, 1993; Y. Huang, 2004). Au ministère des Transports du Québec, la méthode AASHTO a été adoptée en 1992 comme méthode de dimensionnement structural des chaussées bitumineuses (St-Laurent, 2001). Cependant, cette méthode empirique ne s'applique pas à des matériaux, des conditions et des configurations de structure de chaussées différentes de celles de l'expérimentation.

1.3.2 Dimensionnement mécaniste empirique

Aux États Unis, à partir de 1943, différentes méthodes de calcul analytiques se sont développées parallèlement aux études expérimentales réalisées dans les méthodes empiriques, il s'agit des méthodes mécanistes empiriques. Ces méthodes permettent de dimensionner les chaussées plus correctement que les méthodes empiriques et peuvent améliorer la fiabilité de la conception (AASHTO, 1993). Elles sont basées sur des modèles mathématiques pour déterminer la réponse de la chaussée, en termes de contraintes et déformations, soumises aux sollicitations induites par les charges de trafic et les effets climatiques. Au moyen de modèles de performance elles ont également la capacité de prédire la performance des chaussées en combinant la réponse de la structure, déterminé analytiquement, avec les dommages observés sur le site ou en laboratoire. La Figure 1.8 présente le processus adopté par cette approche (NCHRP, 2004). Selon le guide de dimensionnement mécaniste empirique, cette méthode procède généralement comme suit :

- Pré-dimensionnement de la structure (choisir les épaisseurs des couches) et collecte des données nécessaires au calcul tel que les charges de trafic, les conditions climatiques et les propriétés des matériaux de la structure de chaussée et du sol support.
- Modélisation et calcul de la réponse de la chaussée soumise au chargement en déterminant les contraintes, les déformations et les déflexions critiques causées par les différentes sollicitations. En se basant sur les résultats de calcul, les modèles de performance prévoient les dégradations (la fatigue, l'orniérage, la fissuration thermique et la rugosité) cumulées durant la durée de vie espérée. Les modèles de performance doivent être calibrés à l'aide des observations réelles de la chaussée.
- Sélection du niveau de fiabilité et vérification des critères de performance. Si le pré dimensionnement ne répond pas aux critères de performance souhaités, il faudra répéter le processus de nouveau.

Les méthodes mécanistes empiriques ont été développées pour améliorer la conception des chaussées et afin de répondre aux limites des méthodes empiriques. Elles permettent d'évaluer les conséquences des nouvelles conditions de charge en utilisant des procédures mécanistes

pour modéliser les effets de l'accroissement des charges de trafic, des pressions des pneus et des changements de la configuration des essieux (AASHTO, 1993). La plupart des outils de dimensionnement mécaniste empirique se base sur le modèle de Burminster pour calculer la réponse de la chaussée. Ce modèle permet de caractériser le comportement d'une structure chaussée à n couches reposant sur un massif élastique infini sollicité par une charge circulaire uniformément répartie. De plus, ces outils sont limités pour prendre en compte les discontinuités, les décollements entre couches et les propriétés à la rupture des matériaux.

Actuellement, ces méthodes sont utilisées aussi pour dimensionner les chaussées réhabilitées (Y. H. Huang, 2004; NCHRP, 2004). Cependant, l'existence de plusieurs facteurs ayant un impact sur l'évolution des dégradations dans les chaussées réhabilitées, notamment les propriétés des matériaux recyclés, les fissures existantes, l'état des interfaces entre les couches et les déformations permanentes dans les couches sous-jacentes est venue remettre en cause la différence entre la performance d'une chaussée réhabilitée et une chaussée neuve (NCHRP, 2004).

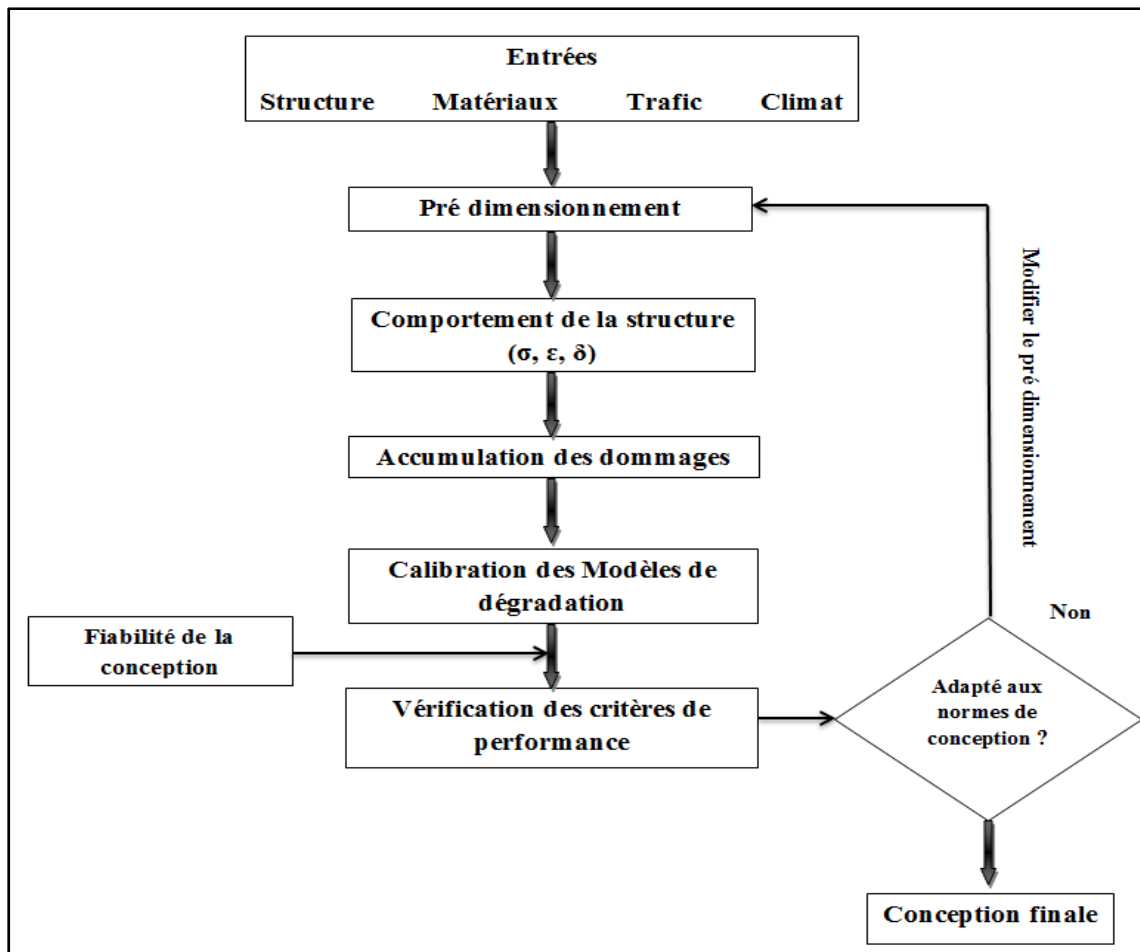


Figure 1.8 Schéma de fonctionnement de la méthode mécaniste empirique adapté de (NCHRP, 2004)

1.4 Modélisation de la performance des chaussées à la fissuration

La fissuration est l'un des modes de dégradations le plus fréquents dans les chaussées, qui peut être définie dans plusieurs types en fonction de leur nature, les causes et la direction de propagation.

La remontée des fissures est un mécanisme de défaillance très courant dans les chaussées réhabilitées, causée par des fissures nouvelles ou existantes dans les couches sous-jacentes qui se propagent sous l'effet des sollicitations mécaniques et thermiques (Elseifi & Al-Qadi, 2005). Cependant, comme il a été mentionné précédemment, les méthodes de dimensionnement ne

tiennent pas compte des propriétés à la rupture des matériaux utilisés et l'existence de discontinuités ou de fissures dans les structures de chaussée. Ceci peut s'avérer une source d'incertitudes quant à la durée de vie des chaussées réhabilitées. La section suivante présente les concepts et les méthodes numériques permettant de modéliser la fissuration dans les structures.

1.4.1 Introduction à la mécanique de rupture

Deux approches peuvent être utilisées pour étudier la rupture des matériaux. La mécanique d'endommagement est utilisée lorsqu'on s'intéresse à la dégradation du matériau d'un point de vue micro-mécanique. Cette approche permet de décrire en continu la dégradation progressive du matériau due à l'apparition, à la croissance, puis à la coalescence de microfissures présentées dans le matériau. Lorsque les microfissures se propagent pour parvenir à de grandes tailles provoquant la ruine du matériau, la mécanique d'endommagement n'est plus valable d'où l'utilisation de la mécanique de rupture (Nasser, 2016). La mécanique de rupture est l'un des outils les plus puissants pour étudier le phénomène de fissuration, elle examine le comportement du matériau à la suite de l'initiation et la propagation de fissure (Y.-R. Kim, 2011). On distingue trois modes de rupture tels que présenté à la Figure 1.9 (Anderson, 2005) :

- **Mode I** ou mode d'ouverture : est considéré comme étant le plus fréquent en mécanique de rupture qui se produit lorsque la contrainte de traction est normale au plan de fissure.
- **Mode II** ou mode de cisaillement plan : si la contrainte de cisaillement est normale au front de la fissure.
- **Mode III** ou mode de cisaillement anti-plan : se produit lorsque la contrainte de cisaillement agit parallèlement au front de la fissure.

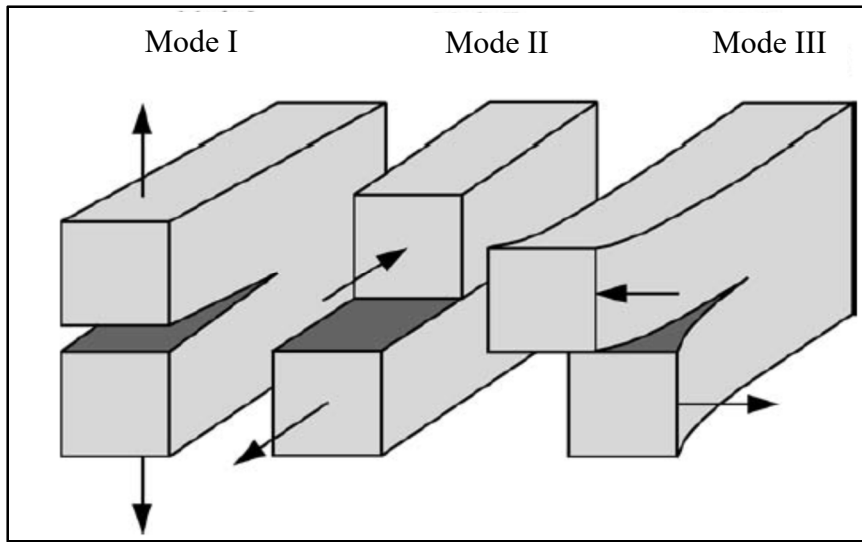


Figure 1.9 Les trois modes de rupture (Anderson, 2005)

1.4.1.1 La mécanique de rupture linéaire élastique

En 1920, Griffith a exposé la base de la mécanique de rupture linéaire élastique pour étudier les fissures macroscopiques. Dans la mécanique de rupture linéaire élastique (*Linear Elastic Fracture Mechanic* : LEFM), le matériau est supposé non hétérogène (milieu continu) avec un comportement élastique linéaire et isotrope et la fissure est plane et possède un front rectiligne. Cette théorie de rupture est valable seulement pour les matériaux fragiles. En 1948, Irwin a modifié la théorie de Griffith pour que l'approche soit applicable aux matériaux ductiles en incluant l'approche énergétique. La résolution du problème élastique fournit l'état de contrainte et les déplacements en chacun des points au voisinage de l'extrémité de la fissure. Par la suite, Irwin a montré que les déplacements et les contraintes dans la zone située en pointe de fissure peuvent être décrits à l'aide des facteurs d'intensité de contraintes reliés aux taux de restitution d'énergie, caractérisant l'état de sollicitation de la région dans laquelle la rupture se produit (Irwin, 1957). Lorsque le facteur d'intensité de contrainte atteint une valeur critique (la ténacité), la fissure se propage. De manière équivalente avec l'approche énergétique, la propagation s'obtient lorsque le taux de restitution d'énergie atteint la valeur critique (Anderson, 2005; Di Benedetto & Corté, 2005; M. L. Nguyen, 2009).

L'approche de la mécanique de rupture linéaire élastique a été utilisée pour évaluer la fissuration dans les matériaux et les chaussées bitumineux en premier par Majidzadeh et al. en 1971 (Y.-R. Kim, 2011; Majidzadeh, 1976), puis plusieurs recherches ont évalué les propriétés à la rupture des enrobés bitumineux (K. W. Kim, Kweon, Doh, & Park, 2003; Mull, Stuart, & Yehia, 2002). La limitation principale de cette approche est la singularité de contrainte en fond de fissure. En effet, la LEFM est limitée à l'objet fissuré ayant une très petite zone plastique autour de la pointe de la fissure (Y.-R. Kim, 2011) alors que l'enrobé bitumineux est un matériau viscoélastique quasi-fragile hétérogène où la zone plastique est relativement grande par rapport aux matériaux élastiques fragiles.

1.4.1.2 Modèle de zone cohésive (MZC)

Pour pallier les limites de la LEFM, le modèle de zone cohésive (MZC) a été proposé par Dugdale et Barenblatt (Barenblatt, 1962; Dugdale, 1960) pour décrire l'initiation et la propagation de fissuration dans les conditions mécaniques complexes (les matériaux hétérogènes composites, comportement non-linéaire, chargement complexe...). Le MZC supprime la singularité de contrainte à la pointe de fissure et fournit un outil puissant qui peut être adapté à la simulation numérique par la méthode des éléments finis. Le modèle considère l'existence d'une zone de transition d'une longueur caractéristique en pointe de fissure à l'intérieur de laquelle la rupture se produit comme étant un phénomène progressif. La fissuration est gérée par une contrainte cohésive qui s'exprime en fonction de l'écartement des lèvres de la fissure en train de se créer (Figure 1.10). La contrainte cohésive est appliquée sur la zone de transition entre le matériau sain et la fissure réelle. L'ouverture normale de la fissure augmente la contrainte cohésive normale jusqu'à une valeur critique. Au-delà de cette valeur, la contrainte diminue et tend vers 0 lorsque l'ouverture tend vers l'infini (Im, Ban, & Kim, 2014; Y.-R. Kim, 2011; Lancaster, Khalid, & Kougioumtzoglou, 2013).

Le MZC a reçu une attention accrue pour modéliser la fissuration des matériaux et chaussées bitumineux. Le modèle a été utilisé en premier par Jenq et al. (1993) pour évaluer la résistance à la fissuration et la propagation dans les recouvrements bitumineux. Paulino et al. (2004) ont

utilisé le MZC pour modéliser l'initiation et la propagation de fissures dans les enrobés bitumineux à basse température ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Le modèle a été calibré en fonction des résultats expérimentaux de l'essai de flexion à 4 points et ensuite validé en utilisant l'essai de traction indirecte afin de vérifier l'utilisation du MZC dans la FEM. Kim al. (2010) ont également évalué l'effet des propriétés viscoélastiques sur le comportement à la rupture des mélanges bitumineux à l'aide du MZC dans un modèle éléments finis. Elseifi el al. (2012) ont utilisé l'essai SCB à température intermédiaire pour évaluer la performance à la rupture des enrobés bitumineux contenant 40% de granulats recyclés. Les résultats expérimentaux ont été ensuite simulés à l'aide d'un modèle d'éléments finis 3D et le modèle des éléments cohésifs.

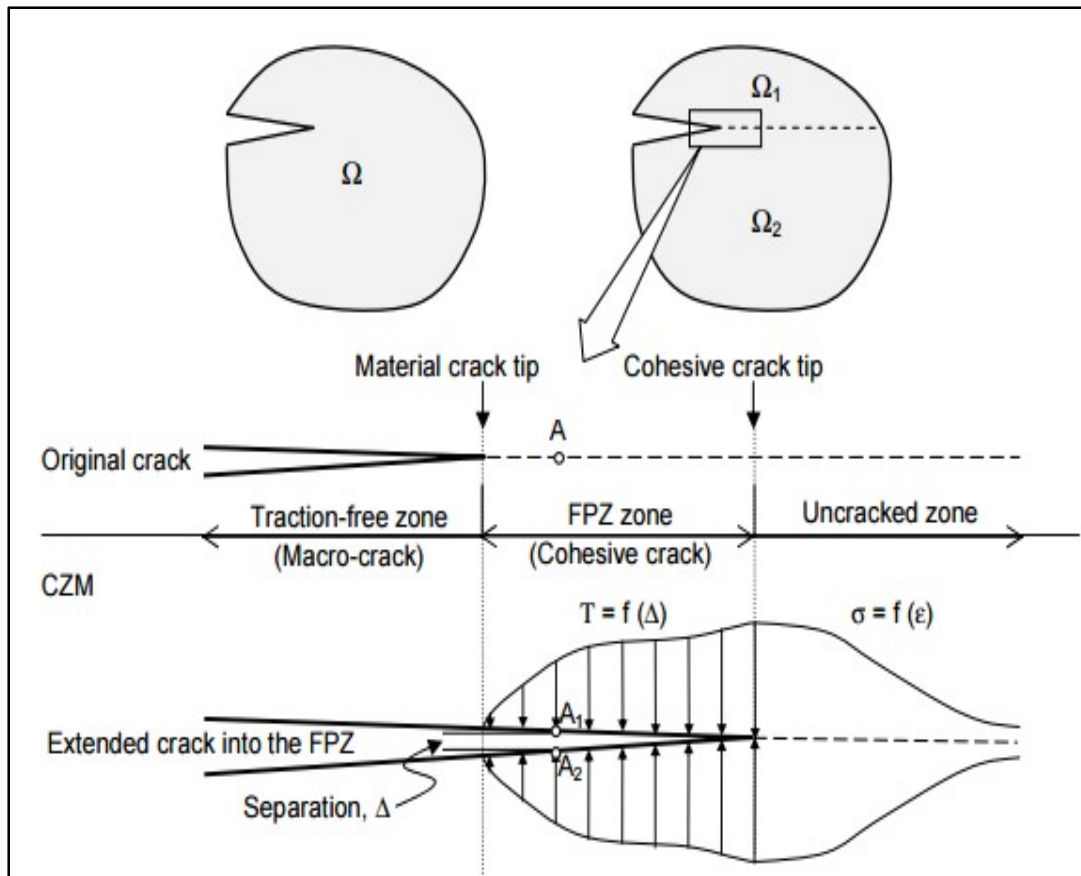


Figure 1.10 Principe du modèle de zone cohésive (Baek, 2010)

1.4.1.3 Essais de caractérisation des propriétés à la rupture des enrobés bitumineux

Pour caractériser les propriétés à la rupture des enrobés bitumineux, plusieurs essais ont été utilisés. La plupart des études considèrent le mode I de rupture qui correspond à un déplacement perpendiculaire sur le plan de la fissure. Les essais les plus courants sont l'essai de flexion 3 points, l'essai de traction en disque, et l'essai de flexion semi-circulaire (A. D. Carter, Hugh & MacInnis, 2018; Elseifi et al., 2012; Molenaar, Scarpas, Liu, & Erkens, 2002; Saha & Biligiri, 2015) :

- **Essai de flexion 3 points** : l'essai, souvent appelé en anglais *Single-Edge Notched Beam* (SENB), permet de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. L'éprouvette est une poutre initialement entaillée reposant sur deux appuis simples (Figure 1.11). La sollicitation est appliquée au centre de la poutre en mode de contrainte ou de déformation imposée jusqu'à rupture (ASTM, 2012). Wagoner et al. (2005), ont proposé l'essai SENB pour déterminer l'énergie de rupture des enrobés bitumineux. Song et al. (2006) et Kim et al. (2010) ont utilisé la méthodologie proposée par Wagoner et al. (2005) pour calibrer les paramètres du MZC dans un modèle en éléments finis. Cependant, la fabrication des éprouvettes en laboratoire pour cet essai est peu pratique et il est difficile de les obtenir à partir de carottages sur la chaussée.

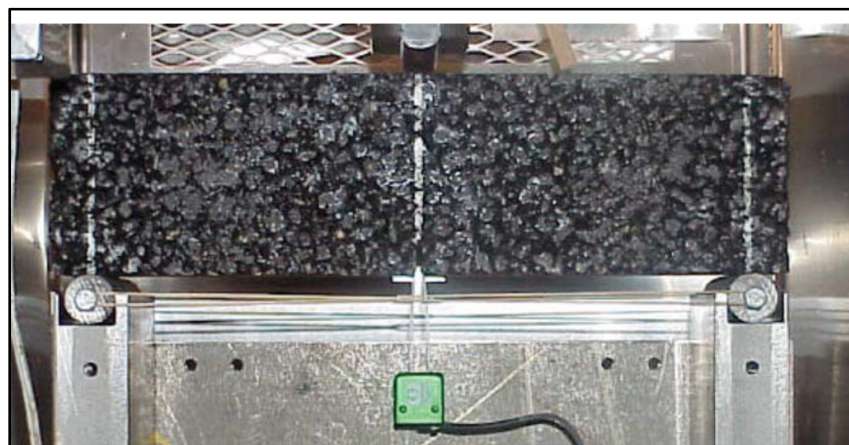


Figure 1.11 Essai de flexion 3 points (Wagoner et al., 2005)

- Essai de traction compacte en disque :** L'essai DC(T) (*Disk-Shaped Compact Tension*) a été utilisé en premier pour les matériaux métalliques et récemment a été adapté au matériaux bitumineux (Wagnoner, Buttlar, & Paulino, 2005). La Figure 1.12 présente la géométrie de l'éprouvette d'essai. La rupture se produit sur l'entaille initiale comme montrée dans la Figure 1.12. La charge appliquée et le déplacement de l'ouverture de fissure sont mesurés. L'énergie de rupture est égale à l'aire sous la courbe de déplacement de l'ouverture de fissure, divisée par la surface de la rupture. Les éprouvettes de cet essai peuvent facilement s'obtenir à partir de carottages sur la chaussée ou par fabrication en laboratoire.

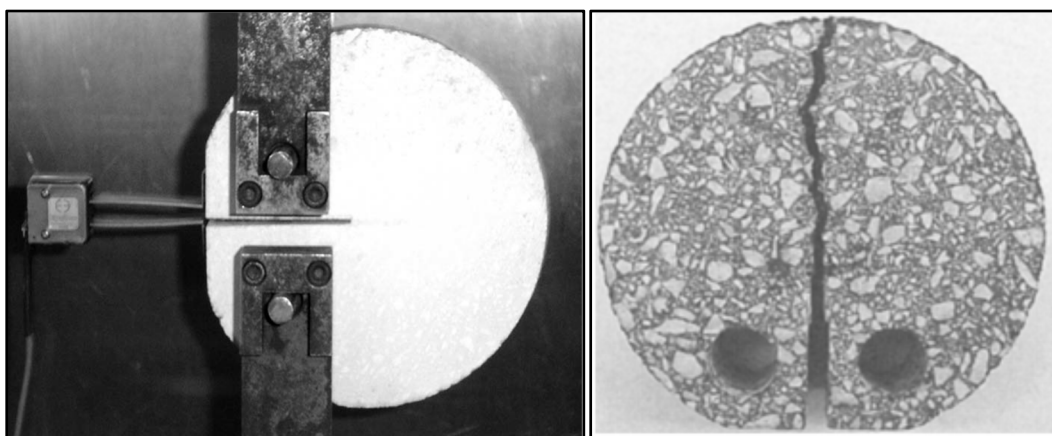


Figure 1.12 Essai de traction compacte en disque (Wagnoner et al., 2005)

- Essai de flexion semi-circulaire :** l'essai SCB (*Semi-circular Bending*) suit le même principe que l'essai de flexion 3 points, mais il est réalisé sur des éprouvettes semi-circulaires avec des entailles initiales (Figure 1.13). Plusieurs études ont utilisé l'essai SCB pour déterminer la résistance à la rupture des matériaux bitumineux (X.-J. Li & Marasteanu, 2010; Mahmoud, Saadeh, Hakimelahi, & Harvey, 2014; Mohammad, Kim, & Elseifi, 2012; Molenaar et al., 2002). Les éprouvettes peuvent être obtenues sur place par carottage directement sur la chaussée ou par la procédure de compactage giratoire des éprouvettes fabriquées en laboratoire. L'essai SCB est avantageux par rapport aux autres essais en raison de sa configuration simple, de son aspect économique au niveau de la

fabrication des éprouvettes ainsi que sa répétabilité. Selon les études réalisées, l'essai SCB peut identifier les caractéristiques de rupture des enrobés bitumineux en fonction des températures d'essai, des matériaux utilisés dans les mélanges et des conditions de chargement. X. Li, Marasteanu, Iverson, et Labuz (2006) ont utilisé des techniques d'émission acoustique incorporées aux essais SCB pour obtenir des informations pertinentes sur le processus de rupture dans les enrobés bitumineux.



Figure 1.13 Essai de flexion semi-circulaire (ASTM, 2016)

1.4.2 Méthodes numériques pour modéliser la fissuration des chaussées

Les méthodes mécanistes-empiriques sont utilisées pour prédire le comportement et la performance des chaussées en utilisant la théorie multicouche élastique pour simuler des chaussées soumises à un chargement (Erlingsson, 2004; Y. Huang, 2004). Cependant, ces méthodes ont des limites en ce qui concerne la simulation de la fissuration. Depuis le début des années 90, les chercheurs ont utilisé la méthode des éléments finis pour modéliser les chaussées. Cette méthode peut prendre en compte plusieurs paramètres tels que le chargement

cyclique, les fissures, le comportement viscoélastique et le comportement non linéaire des matériaux (Elseifi et al., 2018).

1.4.2.1 Méthodes classiques des éléments finis (MEF)

Les sciences de l'ingénieur permettent de décrire le comportement de systèmes physiques au moyen des équations aux dérivées partielles. Actuellement, la méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus utilisées pour résoudre ces équations en les transformant en équations algébriques. Ceci en faisant appel aux lois de la physique, aux méthodes numériques et aux outils informatiques pour exécuter efficacement les calculs sur l'ordinateur (Dhatt, Touzot, & Lefrançois, 2005).

Le principe de la méthode des éléments finis consiste à discrétiser le problème en décomposant le domaine à étudier en éléments de forme géométrique simple (triangles, quadrilatères...) interconnectés entre eux par des nœuds. La méthode utilise une approximation par éléments finis des fonctions inconnues, ceci conduit à la définition des matrices globales et élémentaires (Dhatt et al., 2005; Oudin, 2008). La démarche de la méthode des éléments finis peut être récapitulée dans les étapes suivantes (Desai, 1979) :

- Discrétiser la structure en un nombre approprié de petits éléments ;
- Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire $[k_e]$ reliant les degrés de liberté nodaux $\{u_e\}$ et les forces $\{f_e\}$ appliquées aux nœuds : $[k_e] \{u_e\} = \{f_e\}$
- Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global $[K] \{U\} = \{F\}$ de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds ;
- Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites ;
- Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds ;
- Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.

La méthode des éléments finis a été appliquée pour analyser les chaussées bitumineuses en premier par Duncan (1968). La FEM a été utilisée pour simuler différentes situations de chaussées non modélisables à l'aide de la théorie multicouches élastique. Elseifi et al. (2006) et Carvalho (2012) ont développé des modèles 3D en éléments finis pour étudier l'effet de la vitesse de chargement et les propriétés des enrobés bitumineux sur la profondeur des ornières.

La précision des résultats de la résolution par la MEF dépend de plusieurs facteurs, notamment le maillage (dimensions des éléments), le type des éléments, l'endroit de l'évaluation des résultats, et les conditions aux limites (Elseifi et al., 2018). En cas de modélisation des discontinuités, le maillage doit ainsi se conformer à la géométrie. Une technique de remaillage est habituellement utilisée pour modéliser la fissuration par la méthode des éléments finis classiques. Cette approche consiste à remailler la zone au voisinage de la fissure en alignant les bords des éléments avec les lèvres de la fissure. Il faut avoir un maillage suffisamment fin lors de la propagation de la fissure et les calculs doivent être répétés à chaque nouveau maillage. En outre, les algorithmes de remaillage sont généralement complexes et délicats à mettre en œuvre. Cette technique peut conduire à des coûts numériques importants surtout pour des problèmes tridimensionnels ou lors d'une propagation dynamique.

1.4.2.2 Méthode des éléments finis étendus

La méthode des éléments finis étendus, souvent appelée en anglais *Extended Finite Element Method* (XFEM), a été introduite par Belytschko et Black (1996). Cette approche a été développée pour pallier les problèmes liés au maillage dans les cas des modélisations contenant des discontinuités. XFEM est basée sur la technique de partition de l'unité introduite par Melenk et Babuska (Babuška & Melenk, 1997), qui permet d'enrichir une approximation d'éléments finis à l'aide des fonctions incorporées dans la matrice d'éléments finis globale. Les fonctions d'enrichissement sont capables de représenter ce qui passe au niveau de la fissure en se libérant du maillage, ainsi il n'est plus nécessaire de faire coïncider les surfaces de discontinuités avec le maillage et les fissures peuvent être placées n'importe où dans le matériau (Moës & Belytschko, 2002; Rashadul Islam et al., 2016). En effet, les éléments

coupés par une fissure sont enrichis et possèdent des degrés de liberté supplémentaires qui permettent de représenter un champ de déplacement discontinu de part et d'autre de celle-ci. Les éléments peuvent être aussi enrichis par des fonctions asymptotiques en pointe de fissure afin d'améliorer la précision des calculs.

- **Principe de la partition de l'unité**

Soit un domaine Ω discrétisé par un ensemble d'éléments de N nœuds. Si N_i l'ensemble de fonctions s'appuyant sur cet ensemble et U_i les vecteurs de déplacement nodaux, on peut exprimer l'approximation éléments finis standards du champ du vecteur déplacement total \bar{u} de la façon suivante (Babuška & Melenk, 1997) :

$$\bar{u} = \sum_{i \in N} N_i(x) U_i \quad (1.1)$$

Si les fonctions N_i constituent une partition de l'unité dans le domaine Ω en vérifiant l'équation suivante :

$$\sum_{i \in N} N_i(x) = 1 \quad \forall x \in \Omega \quad (1.2)$$

On peut enrichir l'approximation de U avec une fonction d'enrichissement $\Phi(x)$ de la façon suivante :

$$\bar{u} = \sum_{i \in N} N_i(x) U_i + \sum_{i \in N_e} N_i(x) \Phi(x) U_i^e \quad (1.3)$$

Où N_e l'ensemble des nœuds auxquels on choisit de placer des degrés de liberté enrichis U_i^e .

Si la discontinuité ne peut pas être capturée à l'aide d'une seule fonction, on peut choisir d'utiliser plusieurs fonctions d'enrichissement selon le problème traité. Dans le cas de la modélisation de la fissure par la XFEM, on distingue deux types d'enrichissement. Un enrichissement pour la discontinuité du champ de déplacement au passage de la fissure loin de la pointe, et un enrichissement pour caractériser la singularité du champ de déplacement autour de la pointe de fissure (Figure 1.14).

- **Prise en compte de discontinuités**

La fonction d'enrichissement permettant de prendre en compte les discontinuités du champ de déplacement est la fonction discontinue H (ou appelée *Heaviside step function*) définie sous la forme suivante (Ling, Tao, Qian, & Fu, 2018; X. Wang et al., 2018) :

$$H(x) = \begin{cases} +1 & \text{si } x \text{ est au dessus de } \Gamma \\ -1 & \text{si } x \text{ est au dessous de } \Gamma \end{cases} \quad (1.4)$$

Où Γ est l'entité géométrique représentant la discontinuité et x le vecteur position d'un point de Ω . Ainsi, l'expression de l'approximation éléments finis étendus du champ de déplacement revient de la forme suivante :

$$\bar{u} = \sum_{i \in N} N_i(x) U_i + \sum_{i \in N_e} N_i(x) H(x) U_i^e \quad (1.5)$$

- **Modélisation de singularités dues à la présence de fissures**

Les fonctions d'enrichissement capables de capturer la singularité du champ de déplacement d'une fissure sont exprimées de la façon suivante (Moës & Belytschko, 2002) :

$$[B_\alpha] = \sqrt{r} \left[\sin \frac{\theta}{2}, \cos \frac{\theta}{2}, \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta, \cos \frac{\theta}{2} \cos \theta \right] \quad (1.6)$$

Où (r, θ) sont les coordonnées, dans le repère local lié au front de la fissure, d'un point appartenant à un plan normal au front.

Finalement l'approximation s'écrit :

$$\bar{u} = \sum_{i \in N} N_i(x) U_i + \sum_{i \in N_{cut}} N_i(x) H(x) a_i + \sum_{i \in N_{front}} \sum_{\alpha} N_i(x) B_{\alpha}(x) b_{i,\alpha} \quad (1.7)$$

Où N_{front} sont les nœuds enrichis dont le support contient le front de la fissure et N_{cut} sont les nœuds dont le support est complètement coupé par la surface de la fissure.

a_i et $b_{i,\alpha}$ sont les degrés de liberté enrichis associés aux fonctions de discontinuités et de singularités, respectivement.

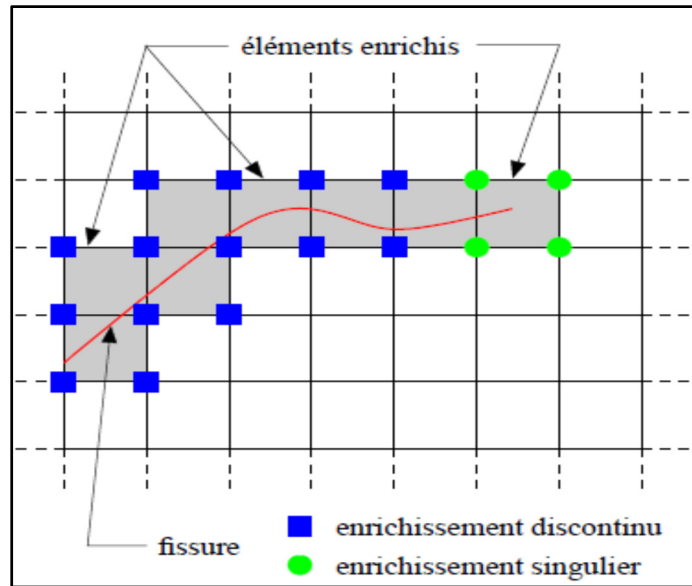


Figure 1.14 Stratégie d'enrichissement des nœuds (Prabel, 2007)

De nombreux chercheurs ont utilisé la XFEM pour modéliser la propagation des fissures dans les enrobés et les chaussées bitumineuses. L'avantage de la XFEM est que les fissures peuvent

s'initier et se propager en fonction de la distribution des contraintes et des critères de rupture définis sans avoir à définir le chemin de propagation et indépendamment du maillage (Lancaster et al., 2013; Ling et al., 2018; Mahmoud et al., 2014; X. Wang et al., 2018). Im et al. (2014) ont utilisé le concept du modèle de la zone cohésive et la XFEM pour caractériser les propriétés de rupture en mode I et en mode II des enrobés avec granulats fins. Les résultats numériques ont été calibrés en utilisant les résultats de l'essai SCB. Mahmoud et al. (2014) ont également modélisé la propagation des fissures dans l'essai SCB en utilisant la XFEM et le MZC. Ling et al. (2018), ont utilisé la XFEM pour investiguer l'influence des géotextiles sur la propagation des fissures thermiques dans les chaussées stabilisées en ciment contenant des fissures. Wang et al. (2014), ont modélisé le phénomène de fissuration de haut vers le bas (top-down) dans les chaussées bitumineuses en utilisant la XFEM et le MZC intégrés dans le logiciel ABAQUS. Jusqu'à présent, aucun travail n'a été fait sur la modélisation de l'initiation et la propagation des fissures dans les chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement type I et type II.

1.5 Conclusion

Les dégradations des chaussées sont actuellement une préoccupation majeure liées à des facteurs extérieurs et se traduisent par différents phénomènes. Ainsi, Il est nécessaire de favoriser l'entretien et la réhabilitation des chaussées. En fait, un manque d'entretien ou un mauvais choix de l'intervention peuvent influencer la vie de la chaussée et menacer la sécurité des usagers. La réhabilitation des chaussées, notamment par les techniques de retraitement type I et type II, est une solution qui peut garantir un meilleur état à la chaussée dégradée. Il s'avère nécessaire de susciter beaucoup d'attention sur la conception de ces chaussées. Cependant, il n'existe pas de méthodes de dimensionnement adaptées aux chaussées réhabilitées et les méthodes utilisées actuellement ne tiennent pas compte de la structure existante et du comportement des matériaux recyclés utilisés. Il est important d'évaluer le comportement de ces chaussées et prévoir l'évolution des dégradations afin de planifier les stratégies d'entretien et de réhabilitation les plus appropriées. Pour ce faire, il s'avère nécessaire d'évaluer les propriétés des matériaux utilisés dans ces chaussées.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Objectifs de la recherche

Suite à l'étude bibliographique, il ressort un élément marquant, soit une problématique au niveau du dimensionnement des chaussées réhabilitées. En effet, les outils utilisés actuellement sont adaptés aux chaussées neuves et ne peuvent pas tenir compte des propriétés à la rupture des matériaux recyclés ainsi que les fissures existantes. L'objectif principal de cette thèse est d'évaluer et de modéliser le comportement des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement type I (donc matériaux de type MR7) et type II (matériaux de type MR5) dans un contexte canadien en utilisant la méthode des éléments finis.

Les sous objectifs spécifiques du projet sont les suivantes :

- Caractérisation du comportement viscoélastique des matériaux recyclés à froid utilisés dans les chaussées réhabilitées (MR5 et MR7).
- Caractérisation des propriétés à la rupture des MR5 et MR7.
- Modélisation de l'initiation et la propagation des fissures dans les matériaux MR5 et MR7.
- Évaluation du comportement mécaniste des chaussées réhabilitées.

2.2 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs de cette thèse, on a adopté une démarche qui porte d'une part sur l'évaluation du comportement en laboratoire et numérique des enrobés recyclés à froid utilisés dans les chaussées réhabilitées et d'autre part sur la modélisation numérique des structures de chaussées.

Tel que présenté dans le logigramme ci-dessous (Figure 2.1), on a recours à deux essais en laboratoire. L'essai de module complexe pour caractériser le comportement viscoélastique linéaire (VEL) ainsi que l'essai de flexion semi-circulaire (SCB) pour déterminer les propriétés à la rupture des MR5 et MR7. Avant la modélisation des structures de chaussées, on doit

commencer par simuler le comportement à l'échelle des matériaux. Pour ce faire, on a développé un modèle en éléments finis (MEF) de l'essai SCB où on a défini le comportement viscoélastique en utilisant les séries de Prony déterminées à partir de l'essai de module complexe. Tandis que les propriétés à la rupture ont été définies en utilisant le modèle de zone cohésive (MZC). Le modèle MEF a été calibré afin de déterminer les paramètres de VEL et MZC permettant de définir le comportement des matériaux dans le MEF des chaussées. Afin d'évaluer le comportement des chaussées réhabilitées, les structures ont été modélisées moyennant le logiciel ABAQUS. Les dimensions et le maillage des modèles ont été déterminés selon une analyse paramétrique.

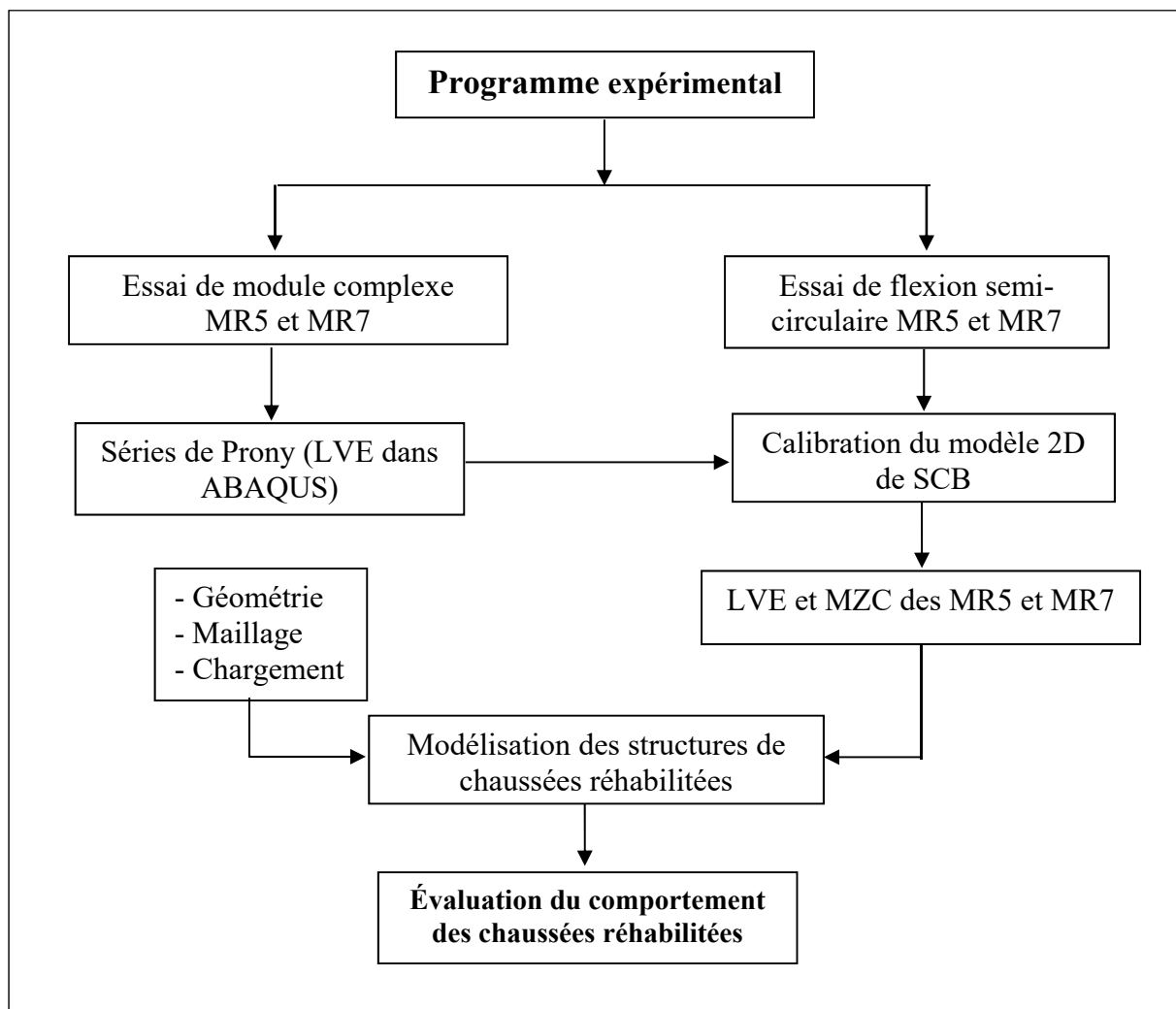


Figure 2.1 Logigramme présentant la méthodologie adoptée dans cette thèse

2.2.1 Programme expérimental

2.2.1.1 Essai de module complexe sur MR5 et MR7

Comme il a été mentionné précédemment, la majorité des outils de dimensionnement supposent que tous les matériaux ont un comportement élastique linéaire. Tandis que le comportement des enrobés bitumineux est fort lié à la température et la fréquence de chargement, du fait du comportement visqueux du liant hydraulique (Di Benedetto & Corté, 2005). Afin d'évaluer correctement la performance des chaussées réhabilitées, il est important de caractériser le comportement des matériaux utilisés. Au cours de leur durée vie, on distingue deux phases dans le comportement des matériaux recyclés à froid. Au début, les mélanges se comportent comme les matériaux granulaires non lié. Par la suite, leur comportement est similaire à celui des matériaux viscoélastiques (Pérez, Medina, & del Val, 2013). L'objectif de ce volet est de vérifier et caractériser le comportement viscoélastique linéaire (VEL) des MR5 et MR7 en utilisant l'essai de module complexe (E^*). La mesure du E^* permet une évaluation de la rigidité de l'enrobé sur un large spectre de températures et de fréquences de sollicitation pour une caractérisation complète de la rhéologie en petites déformations. Par la suite, les résultats de E^* ont été calés avec le modèle de rhéologie analogique à spectre continu 2S2P1D (2 *Springs*, 2 *Parabolic creep elements* and 1 *Dashpot*) afin d'étendre les résultats de module aux basses et hautes fréquences non réalisés en laboratoire.

2.2.1.2 Essai de flexion semi-circulaire (SCB) sur MR5 et MR7

La fissuration est considérée comme l'un des principaux modes de dégradation observés sur les chaussées bitumineuses. Ceci affecte principalement la qualité de roulement et la durabilité à long terme de la chaussée. La mécanique de la rupture est l'un des outils les plus puissants pour étudier la performance des structures à l'initiation et la propagation des fissures (Saha & Biligiri, 2015). Actuellement, les propriétés à la rupture des enrobés bitumineux peuvent être évaluées en laboratoire à l'aide de différents essais (Elseifi et al., 2012; Molenaar et al., 2002; Saha & Biligiri, 2015). Dans cette étude, l'essai de flexion semi-circulaire a été utilisé pour caractériser la résistance à la rupture des MR5 et MR7. En effet, l'essai SCB est avantageux

en raison de sa simplicité en termes de préparation des éprouvettes, de la configuration de l'essai ainsi que de la reproductibilité et la répétabilité (Y.-R. Kim, 2011; Ozer et al., 2016). De plus, il est moins coûteux et peut être effectué sur des éprouvettes cylindriques compactées à la presse à cisaillement giratoire (PCG) ou prélevés sur le terrain (Ozer et al., 2016). L'essai SCB a été réalisé selon la norme ASTM D8044-16. Cet essai évalue la résistance à la rupture des enrobés bitumineux à température intermédiaire en utilisant l'énergie de rupture critique. L'essai consiste à soumettre des éprouvettes semi-circulaires avec des fissures initiales de profondeur 25, 32 et 38 mm en flexion à un déplacement de 0,5 mm/min. Pour augmenter la précision des résultats, il faut tester quatre éprouvettes pour chaque profondeur de fissure. Ainsi un total de 12 éprouvettes semi-circulaires a été testé.

2.2.1.3 Effet du ciment sur la résistance à la rupture des enrobés recyclés à froid (MR5)

Les matériaux recyclés à froid MR5 sont constitués de 50% de GBR et de 50% de granulats vierges. Pour assurer la cohésion, le mélange est souvent traité avec l'émulsion ou la mousse de bitume. Puis le ciment est ajouté au mélange afin d'accélérer le temps de cure. Cependant, une grande quantité de ciment pourrait être problématique pour les MR5. L'objectif de ce volet est d'évaluer l'effet de la proportion de ciment sur la résistance à la rupture des matériaux recyclés (MR5). Cinq proportions de ciment ont été ajoutées aux mélanges: 1%, 2%, 3%, 4% et 5%. Le test de flexion semi-circulaire (SCB) a été utilisé pour évaluer la résistance à la rupture des mélanges. Un total de 120 éprouvettes a été testé à une température intermédiaire dont 60 éprouvettes à l'état humide pour étudier la sensibilité à l'humidité.

2.2.2 Simulation numérique

2.2.2.1 À l'échelle des matériaux

Avant de faire une modélisation à l'échelle de la structure de chaussée, une modélisation à l'échelle du matériau a d'abord été effectuée. Ainsi, l'objectif de cette partie consiste à modéliser le comportement viscoélastique puis de simuler l'initiation et la propagation des fissures des matériaux MR5 et MR7 en utilisant le logiciel ABAQUS.

- Modélisation du comportement VEL

Dans la théorie de viscoélasticité linéaire, il existe diverses descriptions de propriétés mécaniques en fonction du temps (ou la fréquence) et de la température telles que le module de relaxation (ou de fluage) et le module complexe. En petites déformations, ABAQUS définit le comportement des matériaux viscoélastiques dans le domaine temporel (Systèmes 2013). Le module de relaxation des MR5 et MR7 testés a été déterminé à partir des résultats de l'essai de module complexe en utilisant la méthode de conversion numérique de Park et Schapery (1999). À partir du module de relaxation, les séries de Prony ont été déterminées en utilisant ABAQUS.

- Modélisation de la fissuration

Afin de modéliser la performance des chaussées réhabilitées, il est important de modéliser correctement la fissuration à l'échelle des matériaux. Pour ce faire, les résultats expérimentaux de l'essai SCB ont été utilisés pour calibrer un modèle en éléments finis 2D développé moyennant de Logiciel ABAQUS. La modélisation de l'initiation et la propagation des fissures dans le modèle ont été réalisées en utilisant le modèle de zone cohésive et la méthode des éléments finis étendus intégrés dans le logiciel. Les résultats des éprouvettes SCB testés avec des fissures initiales de 25 mm et 32 mm ont été utilisés pour obtenir les propriétés à la rupture des mélanges (résistance de la zone cohésive et énergie de rupture) en assurant un bon accord entre les résultats expérimentaux et numériques, alors que les résultats des éprouvettes avec une fissure initiale de 38 mm ont été utilisés pour valider le modèle.

2.2.2.2 Étude à l'échelle des structures

- Étude de cas en vue de vérification de l'approche MEF au niveau de la structure

La base de données LTPP a été utilisée pour développer le modèle en éléments finis afin de valider la démarche de modélisation utilisée dans cette étude. La section 35-0801 dans l'état du Nouveau-Mexique a été choisie en raison de la disponibilité des données telles que les propriétés des matériaux, la structure de la chaussée ainsi que les résultats de l'essai du déflectomètre à masse tombante (FWD) (Chatti et al., 2017; LTPP, 2019). Il s'agit d'une

structure construite d'une fondation granulaire d'épaisseur 246 mm recouverte d'un enrobé bitumineux d'épaisseur 107 mm. La structure de chaussée repose sur un sol d'épaisseur 4371 mm situé sur une couche rigide semi infinie. Le module de relaxation de l'enrobé mesuré sur la section a été utilisé pour modéliser le comportement viscoélastique de la couche d'enrobé. La structure de chaussée a été soumise à un historique de chargement du FWD de 60 ms.

- Modélisation de structures des chaussées réhabilitées

L'objectif de ce volet consiste à modéliser et analyser le comportement des chaussées réhabilitées en se basant sur les résultats des parties précédentes. Une structure existante et trois structures de chaussées réhabilitées par un planage-resurfaçage, le retraitement de type I et II ont été modélisées dans ABAQUS selon l'approche décrite dans la partie précédente. Les matériaux ont été définis selon les résultats des essais de laboratoire et numérique. L'initiation et la propagation des fissures dans les structures ont été modélisées en utilisant la méthode des éléments finis étendus (XFEM) et le modèle de zone cohésive adoptés dans le chapitre 6. Au début, les structures de chaussées sont soumises à un chargement simulant l'essai FWD afin d'identifier les contraintes et les déformations critiques dans les chaussées. L'initiation et la propagation des fissures dans les chaussées réhabilitées par retraitement type I et type II ont été évalués. Puis, l'effet des fissures existantes sur le comportement de la structure du retraitement type I et l'effet du ciment sur le retraitement type II ont été investigués.

CHAPITRE 3

COMPORTEMENT VISCOÉLASTIQUE DES MATÉRIAUX RECYCLÉS À FROID (MR5 ET MR7)

3.1 Introduction

Les techniques de retraitement sont des techniques bien adaptées pour la réhabilitation des chaussées. Elles permettent de maintenir un niveau de performance acceptable et présentent des alternatives économiques et écologiques. Afin d'évaluer correctement la performance des chaussées réhabilitées, il est important de caractériser le comportement des matériaux utilisés. L'objectif de ce chapitre consiste à caractériser le comportement viscoélastique linéaire des matériaux recyclés à froid utilisés dans les chaussées réhabilitées soient MR5 et MR7. Pour ce faire l'essai de module complexe (E^*) a été utilisé. Dans ce chapitre, on commence par la présentation des matériaux utilisés et des mélanges bitumineux testés. Par la suite, un descriptif de la préparation des éprouvettes ainsi que la réalisation de l'essai sont montrés. Puis on présente les résultats de l'essai et le calage de ces résultats avec le modèle 2S2P1D.

3.2 Matériaux

Les matériaux recyclés (MR) se classifient selon les proportions des granulats bitumineux recyclés (GBR), des granulats vierges et du béton de ciment dans le mélange. Selon la norme de classification du Québec NQ 2560-600, on distingue sept classes de matériaux recyclés comme présentés dans la Figure 3.1. Les MR7 peuvent contenir entre 85 à 100% de GBR alors que les MR5 incluent 35% à 50% de GBR (A. Carter, Feisthauer, Lacroix, & Perraton, 2010). Le bitume est incorporé dans le mélange soit sous forme d'émulsion ou de mousse de bitume.

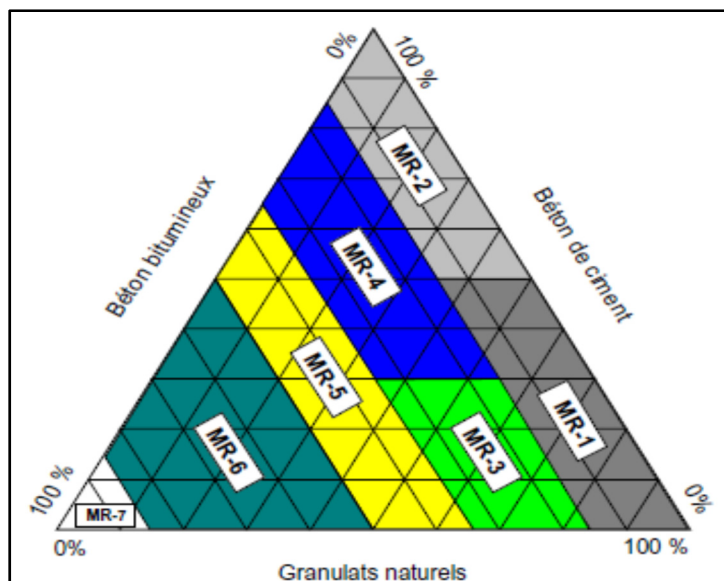


Figure 3.1 Classification des matériaux utilisés (MR)
(Marquis, Bergeron, Pellerin, Bérubé, & Decreon, 1998)

Dans cette étude, on a utilisé des GBR (Figure 3.2) issus de la carrière Saint Patrick située à Montréal. Les GBR (0/10 mm) ont une teneur de bitume de 3%, ayant une pénétration de 19 (0,1 mm) à 25°C, mesurés selon la norme ASTM D3607-10 (ASTM, 2010). Les granulats vierges sont des granulats de calcaire de type MG-20 de grosseur nominale de 0-20 mm (Figure 3.2), qui sont utilisés couramment dans les couches de fondation des chaussées bitumineuses au Québec. La Figure 3.3 présente la granulométrie des GBR et MG-20 utilisés. Une émulsion cationique de bitume avec une lente rupture CSS-1 contenant 62,8% de bitume (PG 64-28) a été utilisée. Le ciment est de type GU (utilisation générale) avec une résistance à la compression de 43,3 MPa à 28 jours. Dans le cadre du programme expérimental, deux mélanges ont été testés soient un MR7 à 100% de GBR et un MR5 comportant 50% de GBR et 50% de MG-20. La formulation des mélanges a été basée sur la formulation issue des travaux antérieurs effectués au LCMB selon les spécifications du ministère des Transports du Québec LC 26-002 (MTQ, 2001). Le tableau 3.1 présente la granulométrie et la formulation des MR5 et MR7.



Figure 3.2 Granulats recyclés (GBR) et vierges (MG-20) utilisés

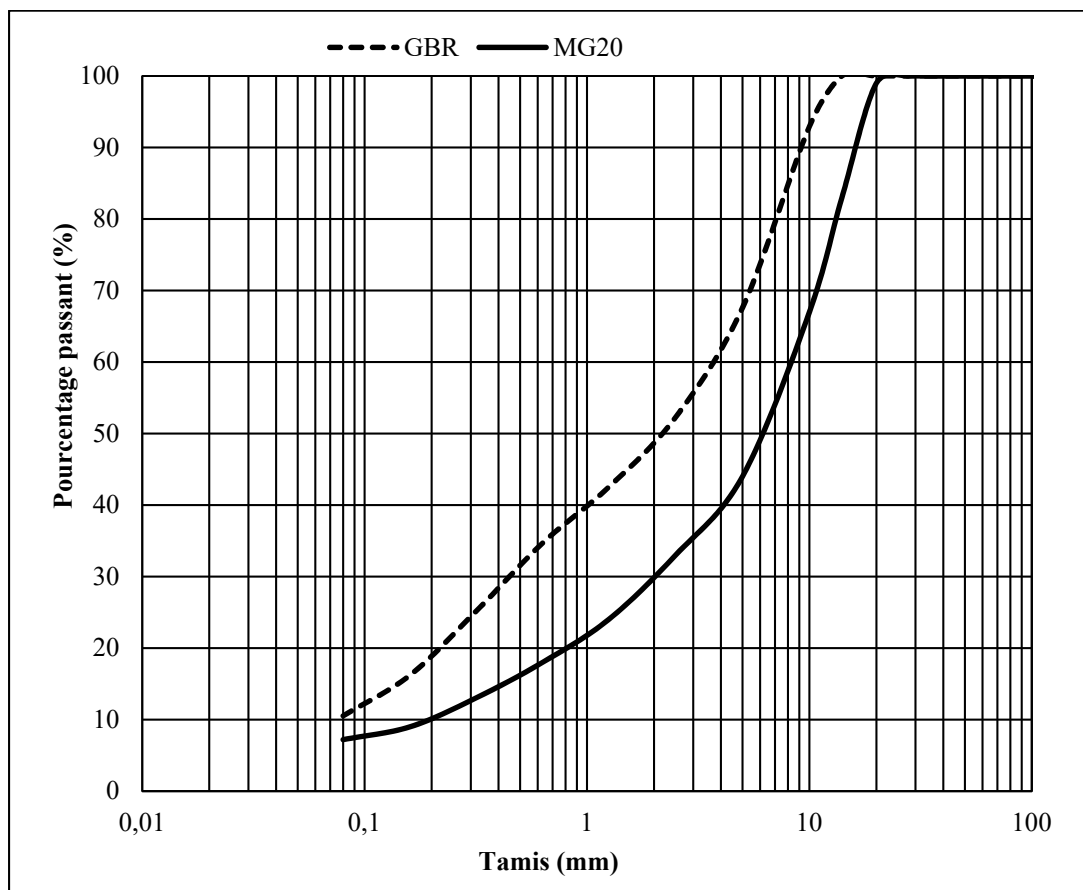


Figure 3.3 Courbes granulométriques des GBR et MG-20 utilisés pour la fabrication des MR

Tableau 3.1 Granulométrie et formulation des MR5 et MR7

Mélange	MR5	MR7
Granulométrie		
Tamis (mm)	Pourcentage passant (%)	
28	100	100
20	95	100
14	89	100
10	74	99
5	48	70
2,5	29	48
1,25	23	33
0,63	12	20
0,315	6,4	9,8
0,16	3,7	4,8
0,08	2,3	3,2
Formulation		
GBR (%)	50	100
MG-20 (%)	50	0
Bitume résiduel dans les GBR (%)	3,0	3,0
Émulsion de bitume ajoutée (%)	3,0	1,33
Bitume total (%)	3,3	3,8
Ciment (%)	1,0	1,0
Teneur en eau (%)	5,0	6,5
Teneur en vides (%)	14,4	8,9

3.3 Préparation des éprouvettes

Après homogénéisation des GBR et MG-20, on mélange les agrégats et on rajoute successivement le ciment, l'eau et l'émulsion. L'ensemble est mélangé manuellement à l'aide d'une cuillère métallique à une température ambiante jusqu'à obtenir un mélange homogène. La quantité d'enrobé préparée pour chaque éprouvette est ensuite versée dans un moule de diamètre 150 mm. Puis, les éprouvettes ont été compactées à l'aide de la presse à cisaillement giratoire PCG (Figure 3.4 a). Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'étuve à 38 ± 2 °C pendant 10 jours pour la cure des mélanges. Après la cure, des éprouvettes de 75

mm de diamètre sont carottés dans les éprouvettes cylindriques comme montrées dans la Figure 3.4 b. Les éprouvettes sont coupées et meulées pour obtenir une longueur de 120 mm. Afin d'éviter les risques de fluage avant l'essai, les éprouvettes sont allongées pendant deux semaines dans un lit de sable placé dans le laboratoire à température ambiante (25 °C) (Figure 3.4 c).

La dernière étape consiste à coller des casques en aluminium aux extrémités planes de chaque éprouvette à l'aide d'une quantité précise d'époxy. Le centrage des casques d'aluminium sur les éprouvettes est assuré par un banc de collage (Figure 3.4 d). Les casques sont utilisés pour fixer les éprouvettes au système d'attache de la presse hydraulique et transmettre les sollicitations mécaniques au matériau.



Figure 3.4 Préparation des éprouvettes pour l'essai de module complexe (a) Compactage à la PCG (b) Carottage des éprouvettes (c) Entreposage des éprouvettes (d) Collage des casques

3.4 Essai de module complexe

L'essai de module complexe est utilisé pour caractériser le comportement viscoélastique linéaire (VEL) des matériaux bitumineux en petites déformations. Le principe de l'essai consiste à soumettre le matériau à des sollicitations sinusoïdales sous différentes combinaisons de températures et de fréquences. La réponse d'un matériau VEL soumis à une sollicitation sinusoïdale cyclique, de fréquence f (Hz), est aussi sinusoïdale. Le caractère viscoélastique tend à introduire un décalage de temps entre la sollicitation et la réponse qui correspond à l'angle de phase ϕ_E (rad) (Di Benedetto & Corté, 2005). Les contraintes et les déformations, respectivement, s'écrivent sous la forme suivante :

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi_E) \quad (3.2)$$

Où :

ω : pulsation ($\omega = 2\pi f$),

t : le temps,

σ_0 : la contrainte maximale appliquée, et

ε_0 : la déformation maximale enregistrée.

L'angle de phase ϕ_E donne une idée de la prédominance élastique ou visqueuse du matériau. Si sa valeur égale à 0° le matériau est purement élastique alors que la valeur 90° correspond à un matériau purement visqueux.

Le module complexe E^* , exprime la rigidité du matériau viscoélastique sous chargement cyclique, est un nombre complexe défini par le ratio des amplitudes complexe de la contrainte et la déformation et se note comme suit :

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi_E)}} = |E^*| e^{i\phi_E} = E_1 + iE_2 \quad (3.3)$$

Où :

$$E_1 = |E^*| \cos \phi_E \quad (3.4)$$

$$E_2 = |E^*| \sin \phi_E \quad (3.5)$$

E^* : le module complexe (MPa),

$|E^*|$: la norme du module complexe (MPa), $|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$,

E_1 : la partie réelle du module complexe (ou module d'élasticité) (MPa),

E_2 : la partie imaginaire du module complexe (ou module de perte) (MPa), et

i : un nombre imaginaire ($i^2 = -1$).

Les résultats expérimentaux de l'essai de module complexe sont exprimés par la représentation de ses composantes ($|E^*|$, ϕ_E , E_1 et E_2) en fonction de la température et la fréquence. Les courbes isothermes et isochrones sont obtenues en traçant la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence et de la température, respectivement. Ces courbes peuvent être utilisées pour le calcul de dimensionnement des chaussées puisqu'elles permettent d'estimer la susceptibilité cinétiques et thermiques des enrobés. Le module complexe peut être représenté dans le plan complexe (ou appelé le plan de Cole-Cole) en traçant E_2 en fonction de E_1 et dans l'espace de Black où ϕ_E est exprimé en fonction de $|E^*|$. Lorsque ces deux courbes se présentent sous la forme d'une courbe unique, le matériau présente un comportement thermorhéologique simple et obéit au principe d'équivalence temps-température (PETT) qui permet d'énoncer que l'augmentation de la fréquence de sollicitation a un effet équivalent à une diminution de la température. L'utilisation du PETT permet d'établir les courbes maitresses, obtenues par translation parallèle à l'axe de fréquence de chaque isotherme afin de construire une courbe unique pour une température de référence T_{ref} . Des coefficients de translation a_T sont déterminés pour tracer une courbe maitresse dans son ensemble à une

température de référence. La fonction de William, Landel et Ferry (WLF) est souvent utilisée pour déterminer le coefficient a_T en fonction de la température T (Équation 3.6). Les courbes maitresses permettent de prévoir les caractéristiques rhéologiques du matériau étudié à des fréquences intéressantes dans la pratique mais inatteignables expérimentalement (A. Carter, 2002).

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (3.6)$$

C_1 et C_2 sont des constantes qui varient en fonction du matériau testé.

3.4.1 Modélisation du comportement viscoélastique : modèle 2S2P1D

Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles de calcul rhéologique permettant de prédire le comportement des enrobés en petites déformations. Ces modèles permettent de calculer le module complexe sur une plage de températures et de fréquences. Le modèle 2S2P1D est utilisé dans le cadre de cette thèse pour simuler le comportement VEL des MR5 et MR7. Le modèle 2S2P1D, basé sur le modèle Huet-Sayegh, permet une meilleure modélisation des résultats à basses fréquences et hautes températures des bitumes et des enrobés (Olard & Di Benedetto, 2003). Le modèle est constitué de 2 ressorts (*Springs*), 2 amortisseurs paraboliques (*Parabolic*) et un amortisseur linéaire (*Dashpot*), tel que présenté dans la Figure 3.5.

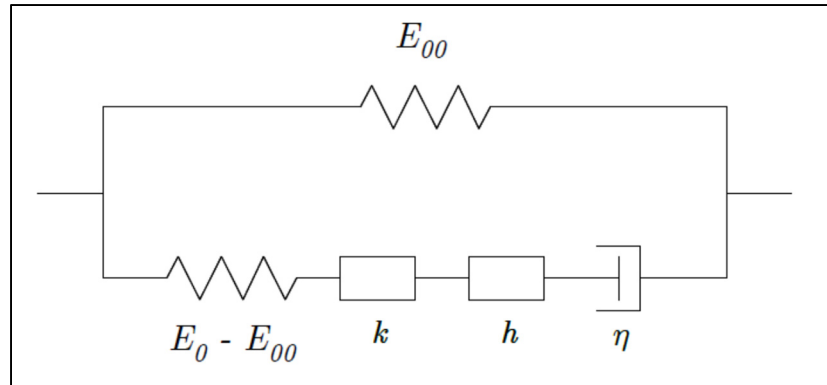


Figure 3.5 Représentation du modèle 2S2P1D (Olard & Di Benedetto, 2003)

À une température donnée, ce modèle possède 7 constantes et le module complexe est déterminé par la formule suivante :

$$E_{2S2P1D}^*(i\omega\tau_E) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (3.7)$$

Où:

h, k : paramètres (constantes) des éléments paraboliques du modèle ($0 < k < h < 1$),

δ : constante de calibration,

E_{00} : module statique lorsque $\omega \rightarrow 0$,

E_0 : module vitreux lorsque $\omega \rightarrow \infty$,

β : constante qui dépend de la viscosité de l'amortisseur $\eta = (E_{00} - E_0) / \beta\tau_E$,

τ_E : temps caractéristique dont la valeur dépend uniquement de la température et déterminé selon l'équation suivante:

$$\tau_E(T) = a_T(T) \times \tau_{0E} \quad (3.8)$$

Où

$\tau_{0E} = \tau_E$ à la température de référence T_{ref} .

Pour déterminer les sept paramètres (E_{00} , E_0 , k , h , δ , β et τ_{0E}) du modèle 2S2P1D, le modèle est calibré selon les résultats de l'essai de module complexe. La calibration du modèle est effectuée manuellement avec un fichier Excel en minimisant l'écart entre le module complexe du modèle et celui des résultats expérimentaux. Les constantes sont ajustées dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black (Figure 3.6). E_{00} correspond à la valeur limite atteinte par le module lorsque la fréquence tend vers zéro. E_0 , le module vitreux, est la limite supérieure du module complexe lorsque la fréquence tend vers l'infini. Les valeurs des constantes h , k et δ influent sur la forme de la courbe dans le plan Cole-Cole. k représente la pente à basse température, h la pente à haute température, δ le facteur influençant le point maximum de la courbe alors que le paramètre β est lié à la rhéologie du bitume. La valeur de τ_E est ajustée à chaque isotherme T .

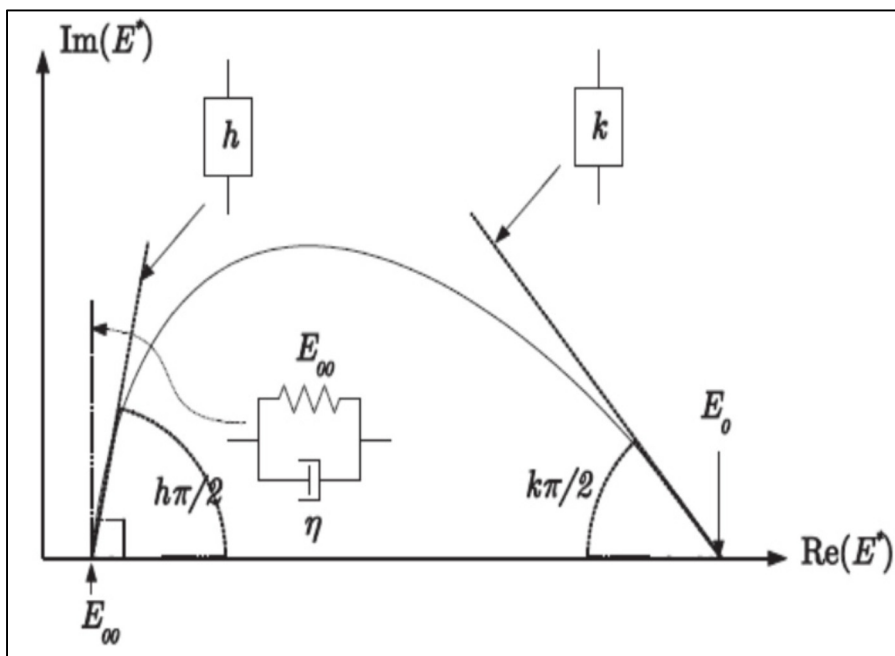


Figure 3.6 Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur le module complexe représenté dans le plan Cole-Cole (Lamothe, 2014)

Une autre approche peut être utilisée pour vérifier le PETT du mélange en analysant la courbe du module complexe normalisé (Équation 3.9) dans le plan Cole-Cole (Q. T. Nguyen,

Di Benedetto, & Sauzéat, 2013). Si les courbes de E^*_{norm} des mélanges testés se superposent cela confirme que le PETT est lié au bitume utilisé.

$$E^*_{norm} = \frac{E^* - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (3.9)$$

3.4.2 Réalisation de l'essai

Comme mentionné précédemment, dans l'essai de module complexe a été utilisé pour caractériser le comportement viscoélastique linéaire en petites déformations des MR5 et MR7. Il s'agit d'un essai de traction-compression sur des éprouvettes cylindriques. Le principe de l'essai est d'appliquer une contrainte axiale en traction et compression directe cyclique. Ensuite, la déformation est mesurée en trois points à l'aide des trois extensomètres placés à 120° l'un par rapport à l'autre tout autour de l'éprouvette cylindrique. La moyenne de ces trois valeurs, obtenue par chaque extensomètre, est retenue par la suite. Les températures à la surface des éprouvettes sont mesurées avec des thermocouples (Figure 3.7). L'essai a été réalisé à sept températures (-18, -10, 0, 10, 20, 30 et 40 ° C) et cinq fréquences (0,01, 0,03, 0,1, 0,3 et 1 Hz). Les résultats obtenus permettent de tracer la courbe dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black ainsi que les courbes maitresses de E^* . Pour confirmer le comportement viscoélastique linéaire des matériaux recyclés à froid testés (MR5 et MR7) testés dans cette étude, la validité du PETT a été vérifiée.



Figure 3.7 Essai de module complexe

3.5 Résultats de l'essai

Les résultats des essais de module complexe ont été reportés dans le plan Cole-Cole et l'espace de Black tel qu'illustré à la Figure 3.8 et à la Figure 3.9. Il est possible d'observer que les points expérimentaux s'approchent d'une courbe unique ce qui confirme ainsi l'applicabilité du PETT au MR5 et MR7.

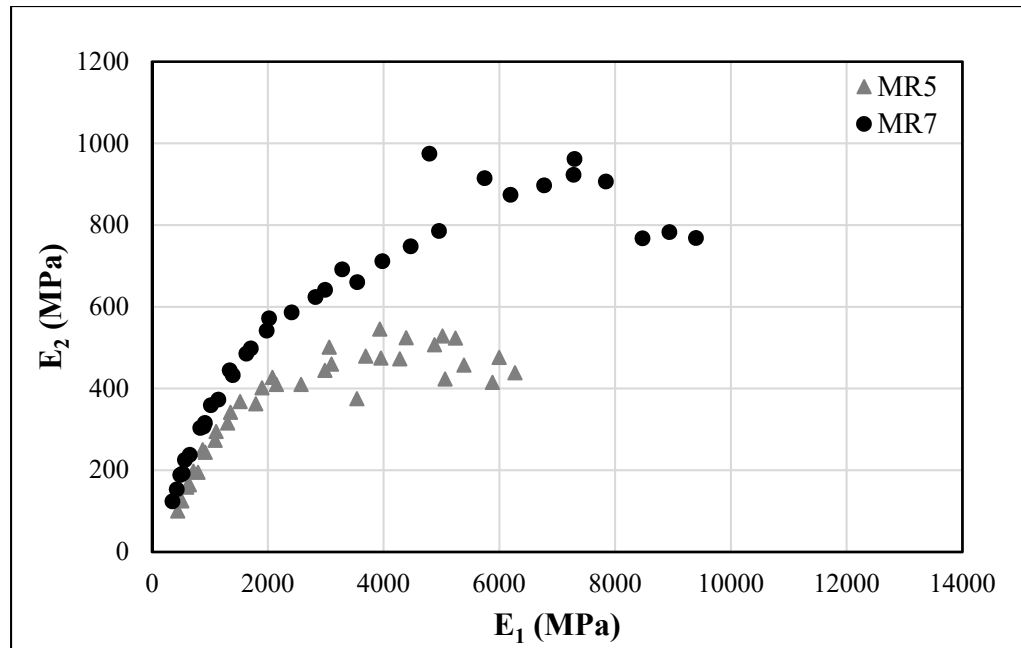


Figure 3.8 Module complexe dans le plan Cole-Cole

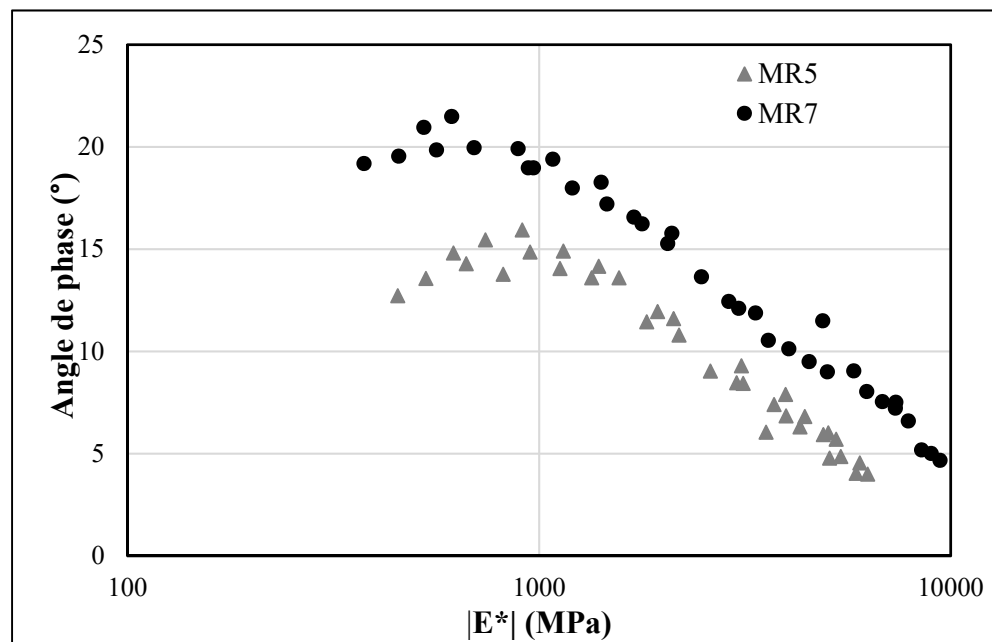


Figure 3.9 Module complexe dans l'espace de Black

Les courbes isothermes des MR5 et MR7 sont présentées dans les Figures 3.10 et 3.11. Ces courbes montrent l'influence de la fréquence et de la température sur la norme du module complexe. La norme du module complexe pour les deux mélanges augmente avec l'augmentation de la fréquence et la diminution de la température. Le mélange du MR5 présente une valeur maximale de 6286 MPa à -18°C et 1 Hz, tandis que le mélange du MR7 présente, dans les mêmes conditions, une valeur de 9431 MPa. Les résultats montrent une rigidité élevée pour tous les mélanges à basse température et haute fréquence. Cependant, ces mélanges disposent d'une rigidité faible par rapport aux enrobés à chaud qui peut atteindre 25 000 MPa à une température de $21,1^{\circ}\text{C}$ (Pérez et al., 2013). D'autres résultats ont montré que le module complexe des enrobés recyclés à froid avec la mousse de bitume contenant 50 % de GBR varie entre 235 et 2845 MPa (Godenzoni, Graziani, & Perraton, 2017), qui sont ainsi moins rigides que les MR5 contenant l'émulsion de bitume testée dans cette étude.

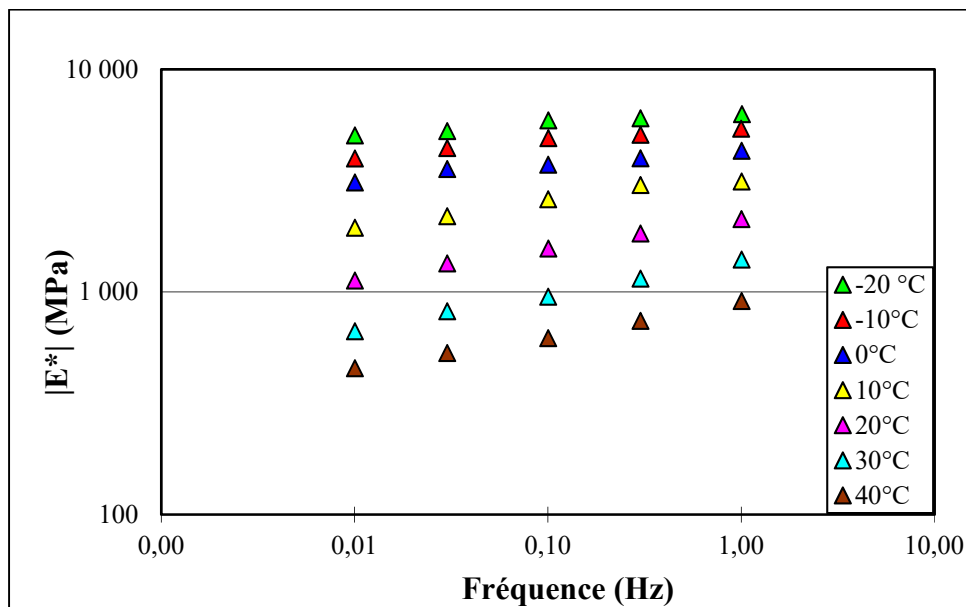


Figure 3.10 Courbe isotherme de MR5

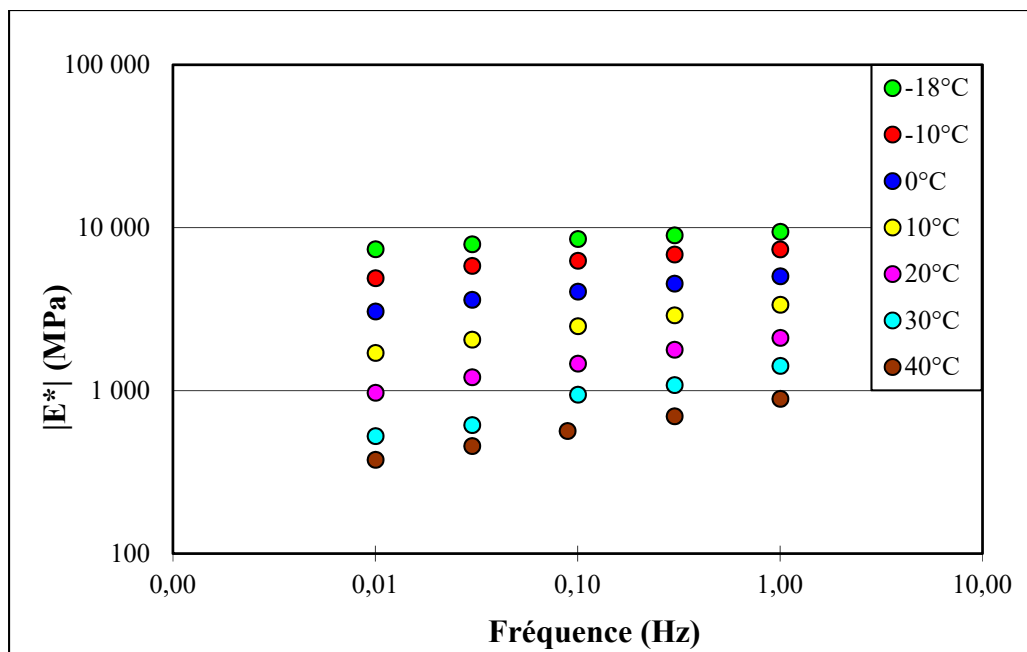


Figure 3.11 Courbe isotherme de MR7

Dans ce programme de recherche, l'essai de flexion semi-circulaire a été effectué à la température intermédiaire de l'enrobé soit à 22 °C. Cette dernière a été utilisée comme température de référence pour créer les courbes maitresses. La Figure 3.12 présente les courbes maitresses de MR5 et MR7 déterminés à partir des résultats expérimentaux et celles simulées avec le modèle 2S2P1D. Les constantes de calibration du modèle sont présentées dans le Tableau 3.2. Le modèle 2S2P1D permet d'extrapoler certaines propriétés rhéologiques inaccessibles par des mesures en laboratoire.

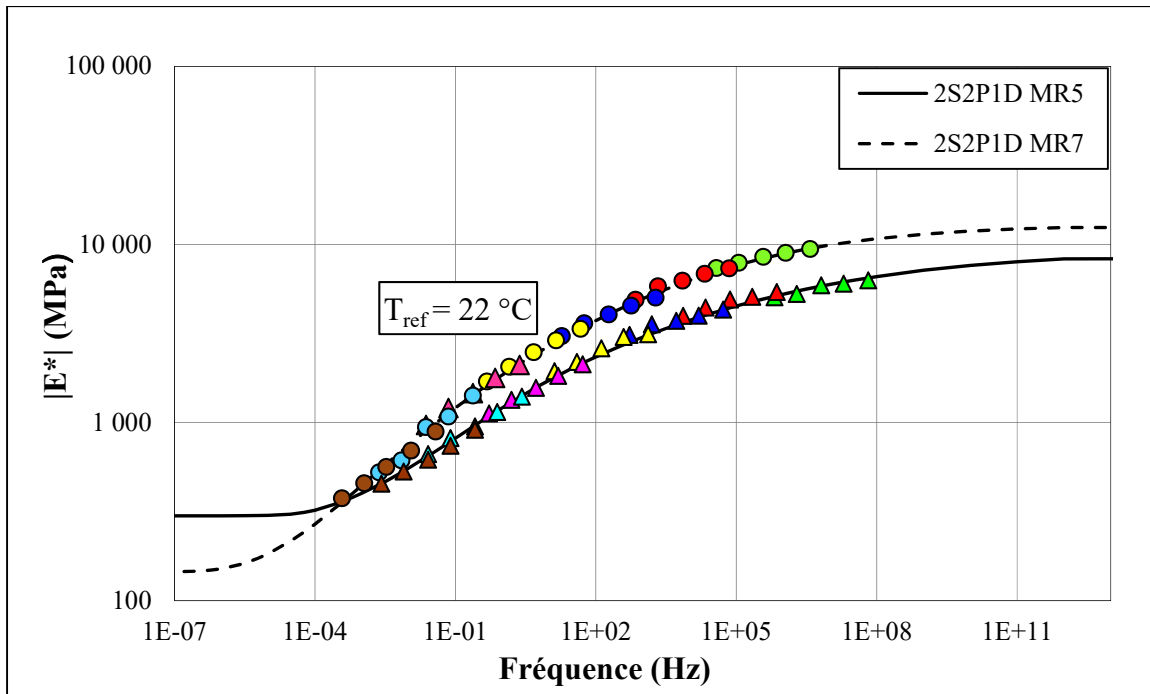


Figure 3.12 Courbes maitresses de la norme de module complexe de MR5 et MR7

Tableau 3.2 Détermination des paramètres du modèle 2S2P1D ($T_{ref}=22^{\circ}\text{C}$)

Mélange	E_{00}	E_0	k	h	δ	β	C_1	C_2
MR5	300	9 200	0,14	0,40	3,60	1 800	20,10	129,52
MR7	145	12 900	0,18	0,46	6,00	1 400	19,85	123,48

La Figure 3.13 montre les modules complexes normalisés tracés dans le plan Cole-Cole pour MR5 et MR7. On remarque que les courbes ne se superposent pas, ce qui indique que le comportement viscoélastique linéaire n'est pas lié seulement au type de bitume. Cette différence peut être expliquée par l'interaction entre l'émulsion de bitume et les GBR. Étant donné que les mélanges de MR5 et MR7 contiennent différentes quantités de GBR et de bitume vierge, le bitume résultant se comporte différemment. De ces résultats, il est possible de conclure que le bitume résiduel dans les GBR affecte le comportement des mélanges.

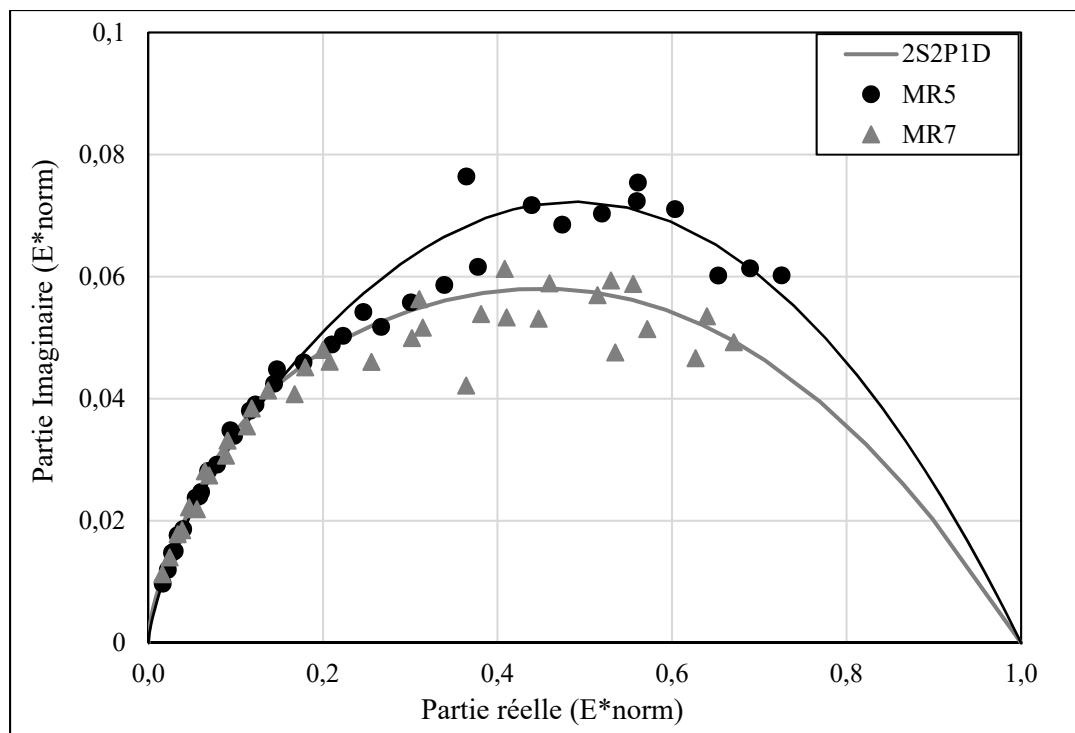


Figure 3.13 Courbes des modules complexe normalisés dans le plan Cole-Cole

3.6 Conclusion

Le recyclage à froid des enrobés bitumineux est devenu une pratique courante pour la réhabilitation des chaussées. Afin de prévoir la performance des chaussées réhabilitées par retraitement type I et type II, on doit évaluer d'abord les comportements des MR5 et MR7. Deux propriétés doivent être évaluées, soit la rigidité et le comportement à la fissuration. Dans ce chapitre, le comportement viscoélastique des MR5 et MR7 a été évalué en utilisant l'essai de module complexe. L'essai a été réalisé à sept températures et cinq fréquences. Les résultats ont été calibrés avec le modèle 2S2P1D afin d'étendre les résultats de module complexe à des fréquences inaccessibles en laboratoire. En se basant sur les courbes de module complexe dans l'espace de Black, il a été montré que les MR5 et MR7 respectent le PETT, ce qui confirme le comportement rhéologique des mélanges. Les résultats ont montré que les MR7 présentent une rigidité élevée par rapport au MR5, ceci pourrait être expliqué par la forte teneur en bitume dans les MR7 provenant des GBR.

CHAPITRE 4

CHARACTÉRISATION DE LA RÉSISTANCE À LA RUPTURE DES MATÉRIAUX RECYCLÉS À FROID (MR5 ET MR7)

4.1 Introduction

Afin d'évaluer la performance à la fissuration des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement, il est primordial de caractériser le comportement à la fissuration des matériaux utilisés. L'essai de flexion semi-circulaire a été adopté dans cette étude. Ce chapitre présente l'essai SCB (*Semi-circular Bending* : SCB) réalisé sur les MR5 et MR7. Au début, on explique le principe de l'essai. Puis la préparation des éprouvettes est présentée et on finit avec la présentation des résultats de l'essai. La même formulation présentée dans le chapitre 3 est utilisée pour produire les mélanges des MR5 et MR7.

4.2 Essai de flexion semi-circulaire

Comme il a été mentionné dans l'étude bibliographique, il existe plusieurs méthodes d'essai utilisées pour évaluer la performance à la rupture des enrobés bitumineux comme l'essai SENB, DCT et l'essai SCB. L'essai SCB a été choisi dans cette thèse pour tester les MR5 et MR7 selon la norme ASTM D8044-16. C'est un essai reproductible, simple à réaliser et peut être effectué sur des éprouvettes PCG ou des carottes extraites sur le terrain. Sur la base de ces avantages pratiques, la configuration de l'essai SCB est devenue populaire pour évaluer le comportement à la rupture des enrobés bitumineux.

4.2.1 Préparation des éprouvettes

L'essai SCB s'effectue sur des éprouvettes semi-circulaires fabriquées avec des fissures initiales. Des éprouvettes cylindriques de MR5 et MR7 de diamètre 150 mm de hauteur 120 mm ont été préparées selon la même formulation et le même principe expliqués dans le chapitre 3 (Figure 4.1 a). Après la cure, chaque éprouvette a été coupée transversalement pour

produire deux éprouvettes circulaires d'épaisseur 57 ± 1 . Ces dernières ont été ensuite découpées en deux le long de leur axe central, produisant ainsi des éprouvettes semi-circulaires de diamètre 150 mm et d'épaisseur 57 mm. Finalement, les éprouvettes ont été entaillées au centre le long de l'axe de symétrie d'une largeur de 3 mm (Figure 4.1 d). Trois longueurs de fissures initiales sont exigées par la norme soient de 25 mm, 32 mm et 38 mm.

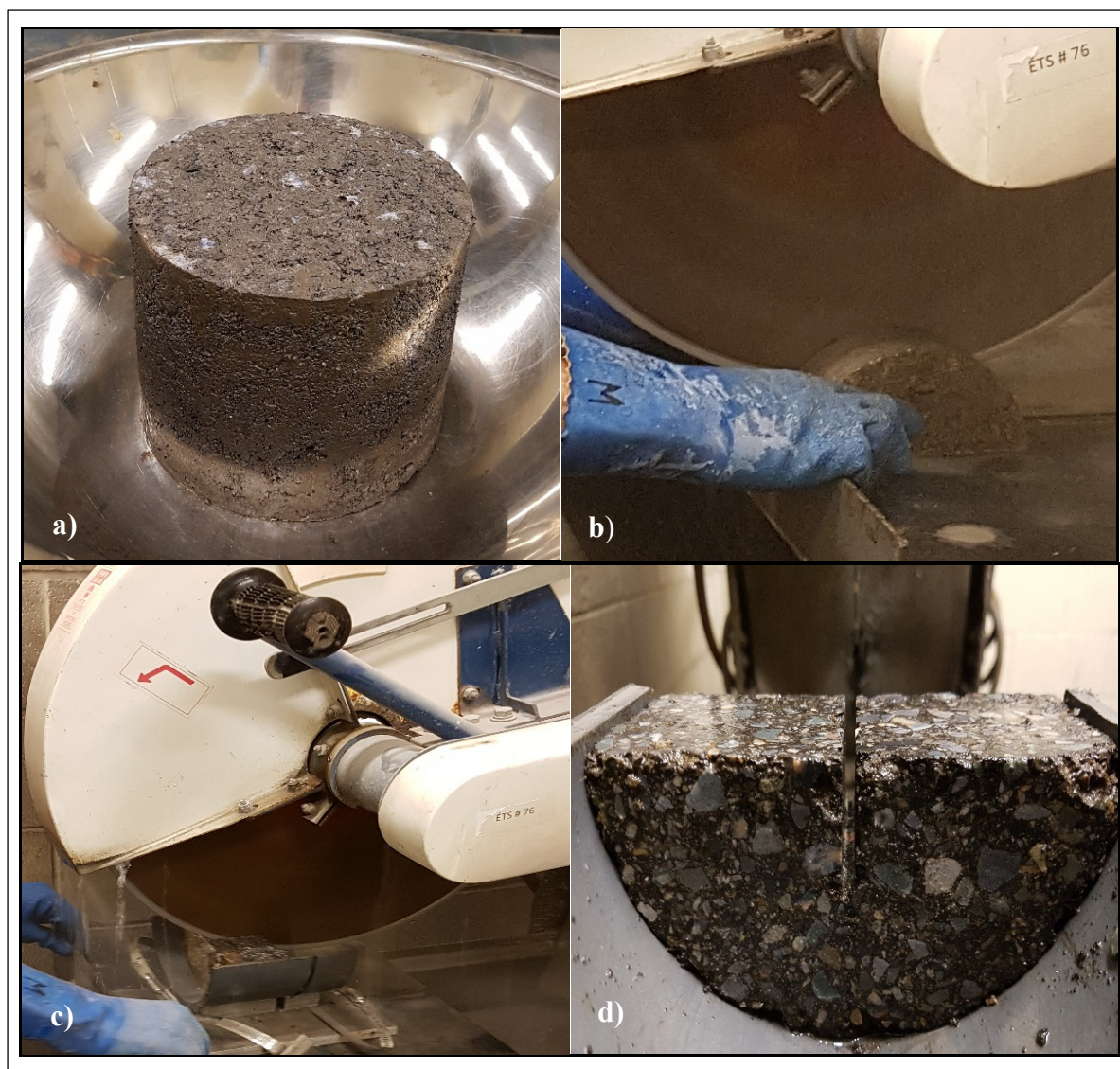


Figure 4.1 Préparation des éprouvettes pour l'essai SCB
(a) Éprouvettes cylindriques (b) Découpage des éprouvettes semi-circulaires
(c) Entaillage des éprouvettes (d) Éprouvette final pour l'essai SCB

Afin d'augmenter la précision des résultats, quatre éprouvettes semi-circulaires pour chaque longueur de fissure doivent être testées. Le découpage des éprouvettes requiert une attention particulière. En effet, les découpes à la scie provoquent des nuages de particules très fines qui sont dangereuses pour la santé. Pour cette raison et dans un souci de précision, les éprouvettes ont été découpées à l'aide d'une scie à l'eau comme le montrent les Figure 4.1 b et 4.1 c.

4.2.2 Principe de l'essai SCB

L'essai SCB évalue la résistance à la rupture des enrobés bitumineux à température intermédiaire selon le mode I de chargement. Il sert à déterminer le taux de libération d'énergie critique J_c en soumettant les éprouvettes semi-circulaires, à différentes longueurs de fissure, à une flexion 3 points. Avant l'application du chargement, les éprouvettes doivent être placées dans une enceinte thermique pendant au minimum $2 \pm 0,5$ h pour atteindre la température de l'essai. Selon la norme ASTM (ASTM, 2016), la température intermédiaire de l'enrobé dépend du grade de bitume et elle est définie par l'équation 4.1. Dans cette étude, on a utilisé une émulsion avec un bitume de grade PG-64-28, l'essai a été réalisé ainsi à une température de 22 °C.

$$PG\ IT = \frac{PG\ HT + PG\ LT}{2} + 4 \quad (4.1)$$

Où :

PG IT: la température intermédiaire de la classe de performance (°C),

PG HT: la limite supérieure de la classe de performance (°C), et

PG LT: la limite inférieure de la classe de performance (°C).

Par la suite, l'éprouvette à tester est placée sur deux rouleaux en appuis et soumise à une charge appliquée sur la face supérieure grâce à un bras de levier comme montré sur la Figure 4.2. Les rouleaux sont de diamètre de 25mm et ceux en appuis sont séparés d'une distance de 120 mm. Des bandes de Polytétrafluoroéthylène (PTFE) ont été utilisées pour réduire le frottement entre l'éprouvette et les rouleaux. Afin d'assurer que l'éprouvette soit bien mise en place, une

précharge de $45 \pm 10\text{N}$ a été appliquée pendant une durée maximale de 30 s. Un déplacement de 0,5 mm / min a été appliqué jusqu'à la rupture des éprouvettes. Dans cette étude, un total de 24 éprouvettes semi-circulaires a été testé. L'essai est achevé lorsque la charge appliquée diminue à 25% de la charge maximale. Lors de l'essai, les données de force et de déplacement sont enregistrées pour créer la courbe force-déplacement. L'énergie de déformation U est l'aire sous la courbe de force-déplacement jusqu'à la force maximale mesurée (Figure 4.3 a), calculée selon l'équation 4.2 :

$$U = \sum_{i=1}^n (u_{i+1} - u_i) \times P_i + \frac{1}{2} \times (u_{i+1} - u_i) \times (P_{i+1} - P_i) \quad (4.2)$$

Où

P_i : la force appliquée à la i ème pas de chargement (kN),

P_{i+1} : la force appliquée à la $i+1$ pas de chargement (kN),

u_i : le déplacement vertical du rouleau de chargement à la i ème pas de chargement (m), et

u_{i+1} : le déplacement vertical du rouleau de chargement à la $i+1$ pas de chargement (m).

Trois longueurs de fissure initiale, a , ont été testées pour déterminer le changement d'énergie de déformation U en fonction de la longueur de fissure. La Figure 4.3 b présente un exemple de la droite de régression linéaire de U en fonction de a . Le taux de libération d'énergie critique J_c est la pente de cette droite divisée par l'épaisseur moyenne des éprouvettes (Équation 4.3). La ténacité à la rupture, K_c , dépend de la contrainte maximale à laquelle l'éprouvette se rupture et est calculée à partir des équations 4.4 et 4.5.

$$J_c = -\left(\frac{1}{b}\right) \frac{dU}{da} \quad (4.3)$$

$$K_c = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.4)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = -0.623 + 29.29\left(\frac{a}{W}\right) - 171.2\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 457.1\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 561.2\left(\frac{a}{W}\right)^4 + 265.54\left(\frac{a}{W}\right)^5 \quad (4.5)$$

Où :

J_c : le taux de libération d'énergie critique (kJ/m²),

b : l'épaisseur de l'éprouvette (m), a est longueur de la fissure initiale (m),

U : l'énergie de déformation (kJ),

dU/da : changement de l'énergie de déformation à la longueur de fissure initiale (kJ/m),

K_c : la ténacité à la rupture (MPa.m^{1/2}),

σ_{\max} : la contrainte maximale (MPa),

W : la hauteur de l'éprouvette (m).

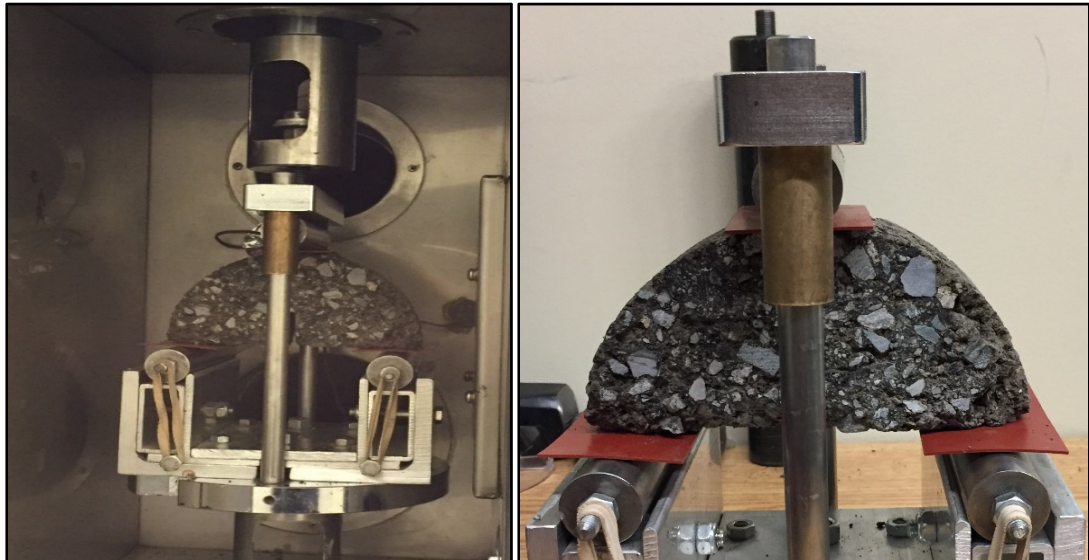


Figure 4.2 Dispositif de l'essai SCB

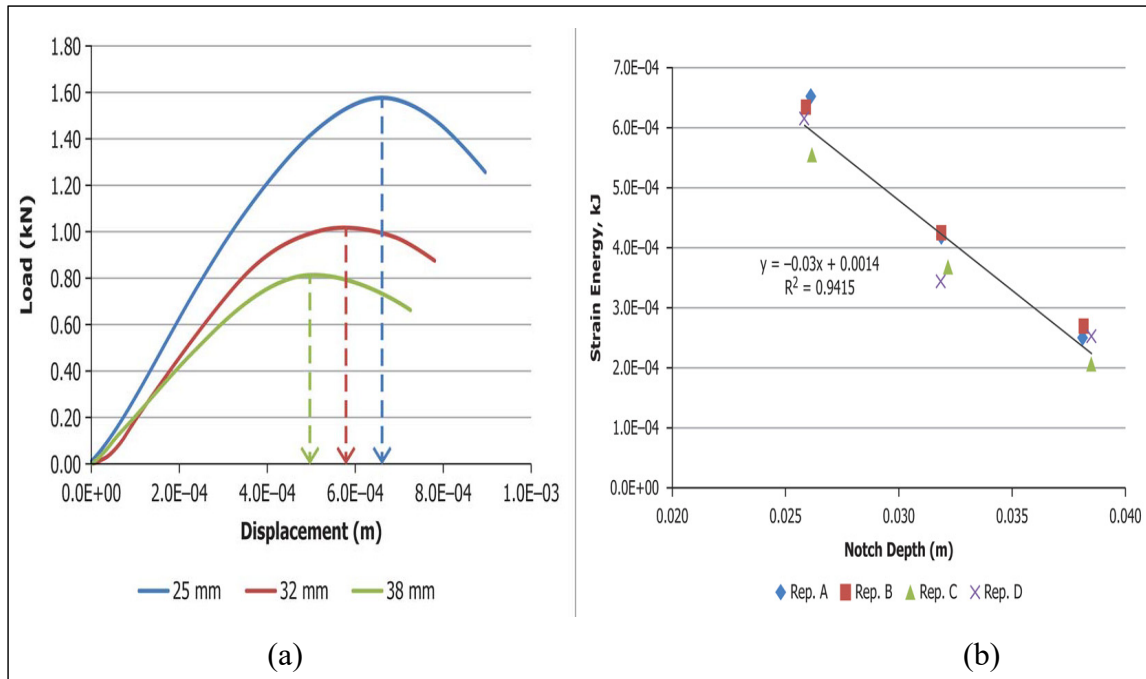


Figure 4.3 Calcul du taux de libération d'énergie critique (a) Exemple de la courbe force-déplacement de l'essai SCB (b) Variation de l'énergie de déformation en fonction de la longueur de fissure (ASTM, 2016)

4.3 Résultats de l'essai

Les résultats de l'essai SCB des MR5 et MR7 sont présentés dans les figures 4.4 et 4.5, respectivement. La Figure 4.4 a et la Figure 4.5 a illustrent les courbes de force-déplacement relevées pour les deux mélanges avec les différentes fissures initiales (25 mm, 32 mm et 38 mm). Ces courbes montrent le mécanisme de rupture dans les éprouvettes. On observe une petite zone linéaire juste avant que la force maximale soit atteinte, au moment où l'amorçage de la propagation de la fissure est souvent observé. Après avoir atteint la force maximale, la propagation de la fissure s'accélère et la force diminue progressivement jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette (Figure 4.6). La même tendance est observée sur les courbes; la force maximale augmente lorsque la longueur de la fissure diminue. La Figure 4.4-b et la figure 4.5-b montrent la variation de l'énergie de déformation en fonction de la longueur de fissure pour MR5 et MR7. Une régression linéaire a été effectuée pour déterminer la pente dU/da . Le coefficient de détermination pour cette régression est supérieur à 90%. Pour évaluer la reproductibilité des résultats de l'essai, le coefficient de variation (COV) de l'énergie de

déformation à la rupture pour différentes longueurs de fissure a été déterminé pour chaque mélange tel que présenté dans le Tableau 4.1.

Comme mentionné précédemment, la courbe force-déplacement est utilisée pour calculer la ténacité à la rupture et le taux de libération d'énergie critique. Le tableau 4.2 présente les valeurs de J_c , K_c et σ_{max} de MR5 et MR7. Une différence significative est observée entre les résultats de MR5 et MR7. Selon les résultats de l'essai, les MR7 présentent une bonne résistance à la rupture par rapport aux MR5. Ces résultats révèlent que les enrobés recyclés à froid contenant un pourcentage élevé de GBR sont plus performants à l'initiation et la propagation des fissures. Cette différence peut être liée au pourcentage de la teneur en bitume comme celle observée selon les résultats de l'essai de module complexe.

Cependant, les résultats de cette étude montrent que la résistance à la fissuration des MR5 et MR7 est inférieure à celle des enrobés bitumineux à chaud. La valeur de J_c d'un enrobé standard déterminée avec l'essai SCB à température intermédiaire de 25 ° C varie de 240 à 1380 J/m² (M. Kim, Mohammad, & Elseifi, 2012). Les MR5 et MR7 testés dans cette étude présentent également des performances à la rupture faible comparé à un enrobé à chaud contenant 40% de GBR, qui présente une valeur J_c de 650 J/m² à une température intermédiaire de 25 ° C (Elseifi et al., 2012).

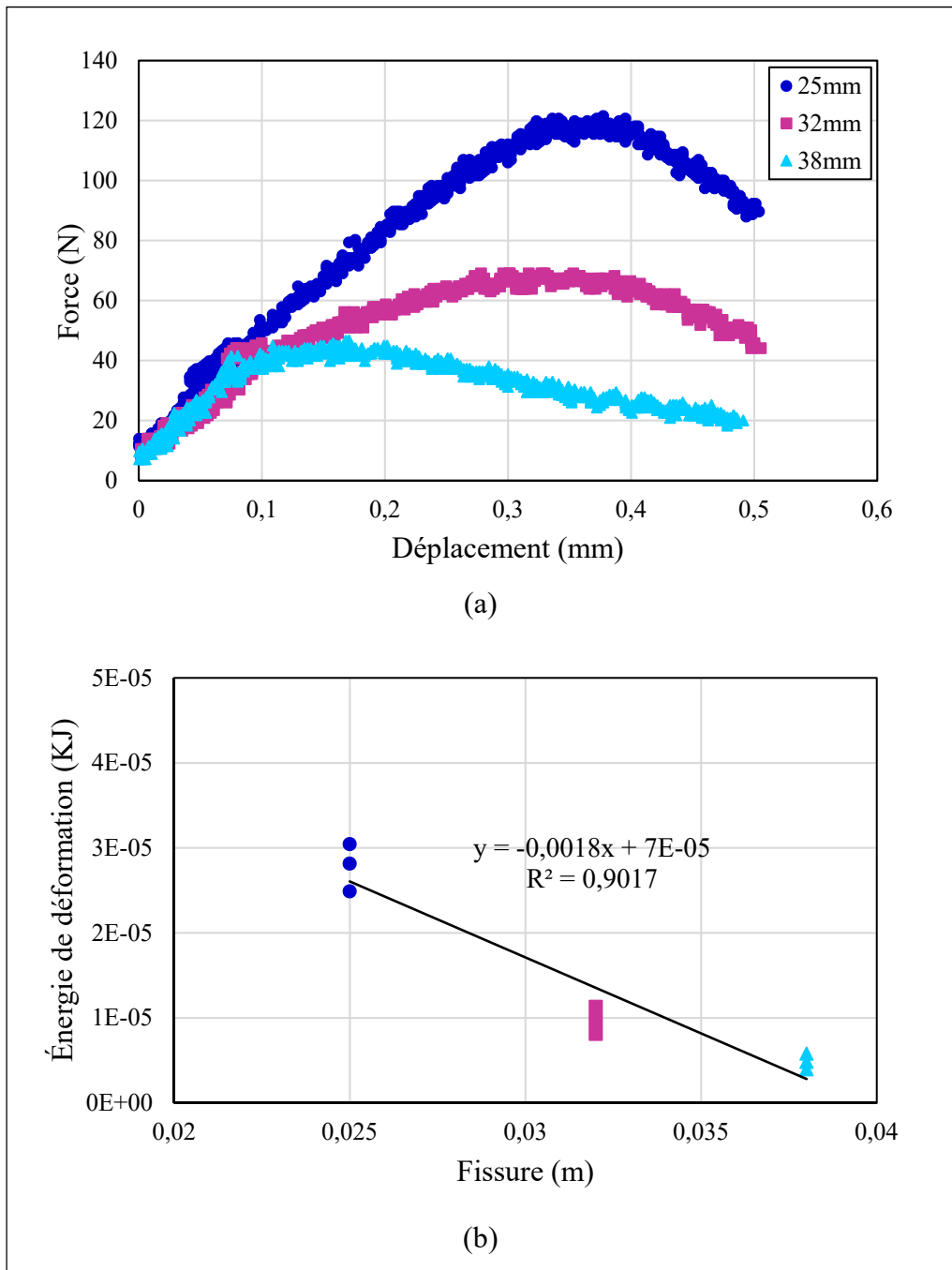


Figure 4.4 Résultats de l'essai SCB pour MR5 (a) Courbe charge-déplacement
(b) Énergie de déformation en fonction de la profondeur de fissure

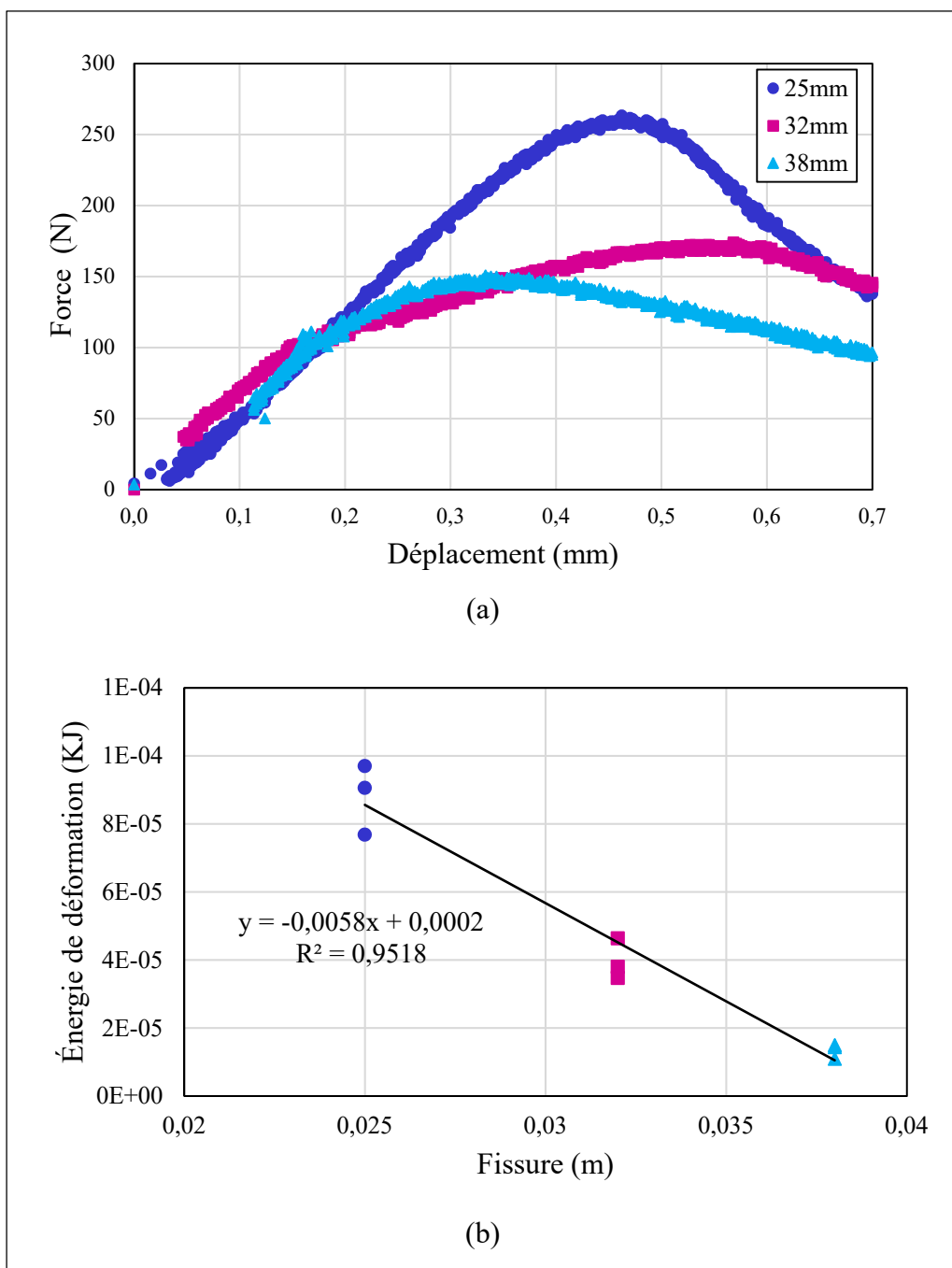


Figure 4.5 Résultats de l'essai SCB pour MR7 (a) Courbe charge-déplacement
(b) Énergie de déformation en fonction de la longueur de fissure initiale



Figure 4.6 Rupture des éprouvettes de l'essai SCB

Tableau 4.1 Valeurs de COV de l'énergie de déformation en fonction de la longueur de fissure initiale

Mélange	25 mm	32 mm	38 mm
MR5	20%	16%	19%
MR7	12%	15%	16%

Tableau 4.2 Valeurs moyennes des résultats de l'essai SCB pour MR5 et MR7

Mélange	J_c (Jm ⁻²)	K_c (kPa.m ^{1/2})	σ_{max} (kPa)
MR5	31,6	28,3	72,2
MR7	101,8	53,9	137,6

4.4 Conclusion

L'étude bibliographie a montré que le comportement à la fissuration des matériaux recyclés à froid est encore méconnu. Dans ce chapitre, les propriétés à la fissuration des MR5 et MR7 ont été investiguées en utilisant l'essai SCB afin de pouvoir évaluer la performance des chaussées réhabilitées. L'essai SCB consiste à soumettre des éprouvettes semi-circulaires pré-fissurées,

en flexion 3 points, à un déplacement de 0,5 mm/min. L'essai a permis de déterminer le taux de libération d'énergie critique J_c pour chaque matériau. Les résultats ont montré une faible résistance à la fissuration des MR5. La même tendance que les résultats de rigidité a été ainsi observée. En effet, on remarque que le module complexe et la résistance à la fissuration des MR5 est faible par rapport aux MR7 et aux enrobés à chaud, ceci est probablement due à la faible teneur en bitume dans les MR5.

Des recherches ont montré que la quantité de ciment affecte le comportement des MR5. Une étude dans le cadre de cette thèse a été réalisée pour investiguer l'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la rupture des MR5. La proportion de ciment a été variée (1%, 2%, 3%, 4% et 5%) et l'essai SCB a été utilisé pour évaluer la résistance à la fissuration des mélanges. Les résultats de ce travail sont présentés dans le Chapitre 5.

CHAPITRE 5

EFFET DE LA TENEUR EN CIMENT SUR LA RÉSISTANCE À LA FISSURATION DES MR5

5.1 Introduction

Le retraitement de type II est une technique de réhabilitation qui consiste à décohesionner l'enrobé sur toute son épaisseur en y incorporant une partie de la fondation granulaire. Ces matériaux mélangés (MR5) sont traités en incorporant un liant bitumineux et un liant hydraulique tel que le ciment. Le ciment accélère le processus de durcissement et peut contribuer aux propriétés mécaniques et à la durabilité du mélange. Cependant, une trop grande quantité de ciment pourrait être problématique pour ces mélanges. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la fissuration des MR5. Ce chapitre présente les mélanges testés, les méthodes d'évaluation de la résistance à la fissuration ainsi que les résultats des essais.

5.2 Problématique de la teneur en ciment dans les MR5

Tel que précisé précédemment, la technique de retraitement type II est une technique de réhabilitation en pleine expansion grâce à ses multiples avantages notamment la préservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement. Cependant, il est intéressant d'envisager une meilleure compréhension du comportement des matériaux de cette technique qui pourra influencer la performance de la chaussée réhabilitée. En effet, l'ajout d'une grande quantité de ciment dans les MR5 peut rendre les matériaux fragiles et ainsi changer leurs performances à la fissuration. Toutefois, la teneur en ciment maximale dans les MR5 n'est pas connue. Plusieurs recherches ont été réalisées pour investiguer l'impact de plusieurs facteurs sur le comportement des MR5. Bocci, Grilli, Cardone, et Graziani (2011) ont étudié l'effet des conditions de cure, de la température et de l'humidité sur le comportement mécanique des matériaux recyclés traités au ciment et l'émulsion de bitume. Les résultats ont montré la susceptibilité thermique des mélanges puisque le module diminue avec l'augmentation de la

température. Comparativement aux enrobés à chaud, ces mélanges présentent une faible résistance aux charges répétées, ceci s'explique en partie par la faible teneur en bitume. Dans l'étude de Godenzoni, Graziani, et Corinaldesi (2016), il a été montré que l'augmentation de la teneur en ciment de 1,0 % à 2,5% a un impact sur les propriétés mécaniques à long terme des MR. Dolzycki, Jaczewski, et Szydlowski (2017) ont étudié l'impact de la quantité d'émulsion de bitume et la teneur en ciment (2%, 4% et 6%) sur le module complexe des MR. Les résultats ont montré que l'augmentation de la teneur en ciment dans les MR augmente le module complexe et diminue l'angle de phase. De nombreuses études ont investigué l'effet de ciment et de l'émulsion de bitume sur les propriétés mécaniques des MR. Cependant, peu d'études réalisés pour examiner l'impact du ciment sur la résistance à la fissuration des mélanges recyclés à froid.

5.3 Mélanges testés

Les mêmes matériaux utilisés dans les mélanges des MR5 présentés dans le chapitre 3 sont utilisés dans la présente étude. Les MR5 sont composés de 50% de GBR et de 50% de MG-20. Une émulsion cationique de bitume avec une lente rupture CSS-1 contenant 62,8% de bitume (PG 64-28) a été utilisée. Le ciment est de type GU (utilisation générale) avec une résistance à la compression de 43,3 MPa à 28 jours. Pour évaluer l'effet de la teneur en ciment, la quantité de bitume a été maintenue constante dans tous les mélanges, tandis que la teneur en ciment a été variée de 1% à 5%. Ainsi, cinq proportions de ciment de la masse total des solides (MG20 + GBR + ciment). La granulométrie et la formulation des mélanges testés sont présentées dans le Tableau 5.1.

L'évaluation de la résistance à la fissuration des MR5 en fonction de la teneur en ciment a été effectuée en utilisant l'essai SCB. Le même principe de préparation des éprouvettes présenté dans le chapitre 4 a été suivi. Ainsi, des éprouvettes cylindriques de MR5 et MR7 de diamètre 150 mm de hauteur 120 mm ont été compactées à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire (PCG). Afin d'avoir des résultats comparables, toutes les éprouvettes ont été compactées avec des teneurs en vides similaires ($14,5 \pm 1\%$). Après la cure, chaque éprouvette a été coupée

transversalement pour produire deux éprouvettes circulaires d'épaisseur 57 ± 1 . Ces derniers ont été ensuite découpés en deux le long de leur axe central pour avoir des éprouvettes semi-circulaires de diamètre 150 mm et d'épaisseur 57 mm. Trois fissures initiales de longueurs 25, 32 et 38 mm et de largeur 3 mm ont été exécutés le long de l'axe de symétrie des éprouvettes semi-circulaires. Selon la norme ASTM (2016), il faut tester quatre éprouvettes semi-circulaires pour chaque longueur de fissure pour augmenter la précision des résultats. Ainsi, 60 éprouvettes semi-circulaires ont été testés, soit 12 éprouvettes pour chaque pourcentage de ciment. Afin d'évaluer la sensibilité à l'humidité, l'essai a été réalisé aussi dans la condition humide. En effet, 60 éprouvettes semi-circulaires ont été saturées en eau pendant 1 heure sous vide, pression de 100 mmHg, à une température de 22 ± 1 °C avant l'essai. Au total, 120 éprouvettes semi-circulaires ont été testées en utilisant l'essai SCB selon la procédure présentée précédemment. Les éprouvettes ont été soumises à une flexion 3 points où un déplacement de 0,5 mm/min a été appliqué jusqu'à la rupture.

Tableau 5.1 Granulométrie et formulation des mélanges testés

Tamis (mm)			Pourcentage passant (%)		
20			94		
14			78		
10			64		
5			46		
2,5			22		
1,25			14		
0,630			8,0		
0,315			4,0		
0,160			3,7		
0,080			1,6		
Bitume résiduel dans les GBR (%)			3,0		
Bitume dans l'émulsion (%)			62,8		
Bitume total (%)			3,5		
Ciment (%)	1	2	3	4	5
Teneur en eau (%)	6,27	6,23	7,51	6,67	6,65
G _{mm}	2,535	2,539	2,544	2,548	2,552
G _{sb}	2,262	2,258	2,255	2,232	2,229
Teneur en vides (%)	13,9	14,1	14,2	15,1	15,2

Note: G_{mm} = densité maximale ; G_{sb} = densité brute.

5.4 Évaluation de la résistance à la fissuration

Dans la présente étude, l'évaluation de la résistance à la fissuration des MR5 en utilisant le taux de libération d'énergie critique Jc présentée dans le chapitre 4 a été effectuée en premier lieu. Ensuite, deux autres approches ont été utilisées à savoir l'évaluation de l'indice de flexibilité (*Flexibility index*, FI) et de l'indice de la résistance à la fissuration (*Cracking resistance index*, CRI).

5.4.1 Indice de flexibilité

Bien que le taux de libération d'énergie critique puisse évaluer la résistance à la fissuration, ce paramètre ne permet pas de prédire le comportement exact des matériaux bitumineux après le début de fissuration que ça soit un comportement flexible ou fragile. Ce dernier peut être évalué à partir de l'indice de flexibilité, qui dépend de la pente de la branche post-pic de la courbe force-déplacement résultante de l'essai SCB (Figure 5.1). FI a été développé par Ozer et al. (2016) à partir de l'essai IL-SCB (Illinois-SCB) et se calcule selon l'équation 5.1 :

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \times 0,01 \quad (5.1)$$

Où:

m est la pente au point d'inflexion de la branche post-pic (kN/mm)

G_f est l'énergie de rupture (J/m²) déterminée à partir de l'équation 5.2 :

$$G_f = \frac{W_f}{t \times a} \times 10^6 \quad (5.2)$$

Avec:

t est l'épaisseur de l'éprouvette (mm) et a est la longueur de la fissure (mm).

W_f est le travail de rupture qui est égale à l'aire sous la courbe force-déplacement de l'essai SCB. Le point d'inflexion désigne le point où s'opère un changement de concavité de la courbe (changement de signe), déterminé lorsque la dérivée seconde de l'équation post-pic s'annule. La pente au point d'inflexion (m) permet d'identifier le comportement fragile ou flexible du mélange. Les enrobés bitumineux sont habituellement considérés comme des matériaux flexibles, ainsi des faibles valeurs de m sont attendues pour ces matériaux comparativement aux matériaux fragiles comme le béton.

5.4.2 Indice de résistance à la fissuration (CRI)

Un autre paramètre a été développé par Kaseer et al. (2018) permettant d'évaluer la flexibilité des enrobés bitumineux c'est l'indice de résistance à la fissuration. CRI est calculé en divisant l'énergie de rupture par la valeur de la force maximale de la courbe force-déplacement tel que montré dans l'équation 5.3. Selon Kaseer et al. (2018), le paramètre CRI nécessite moins de calcul et présente moins de variabilité par rapport à FI.

$$CRI = \frac{G_f}{P_{max}} \quad (5.3)$$

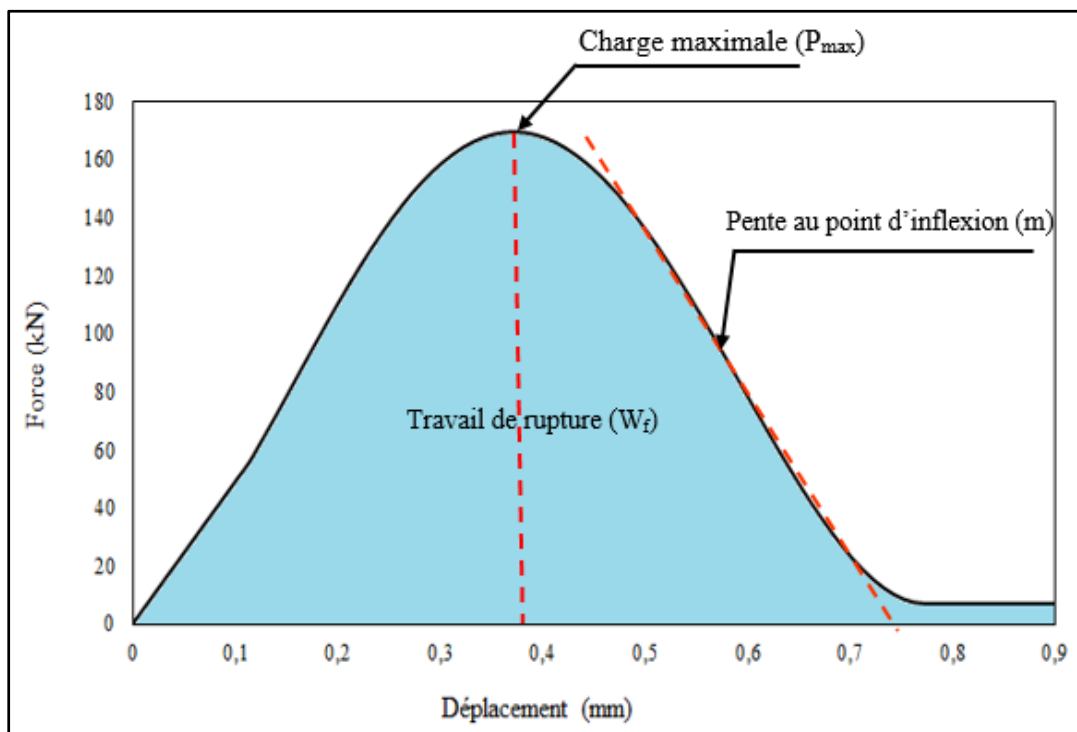


Figure 5.1 Courbe force-déplacement typique dérivée de l'essai SCB adapté de (Ozer et al., 2016)

5.5 Analyse des résultats

La Figure 5.2 illustre les courbes force-déplacement résultantes de l'essai SCB réalisé sur les mélanges de MR5 contenant les différentes proportions de ciment (1%, 2%, 3%, 4% et 5%). Les résultats montrent que pour tous les mélanges la force augmente avec le déplacement imposé jusqu'à atteindre une force maximale. Au-delà de cette valeur la force diminue avec l'augmentation du déplacement et la fissure se propage jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La valeur de la force maximale augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment dans le mélange. Ces résultats montrent que l'augmentation de la proportion de ciment tend à améliorer la résistance à la fissuration des MR5.

Les résultats de J_c pour les différents mélanges sont présentés dans le Tableau 5.2. Comme J_c dépend de l'aire sous la courbe force-déplacement jusqu'à la force maximale (Équation 4.3), ainsi J_c augmente avec la proportion de ciment. Les résultats montrent que l'augmentation de J_c avec la teneur en ciment est non linéaire. En effet, une augmentation significative a été constatée entre les mélanges contenant 3% et 5% et entre 2% et 3% alors que les valeurs de J_c pour 1% et 2% sont comparables. Les résultats révèlent que les MR5 contenant des proportions de ciment élevées (3%, 4% et 5%) sont plus résistants à la fissuration. Cependant, ces valeurs demeurent faibles par rapport aux enrobés à chaud. Afin d'évaluer la reproductibilité des résultats de l'essai, les coefficients de variation (COV) de l'énergie de déformation à la rupture pour différentes longueurs de fissure et teneurs en ciment ont été déterminés tel que présenté dans le Tableau 5.2.

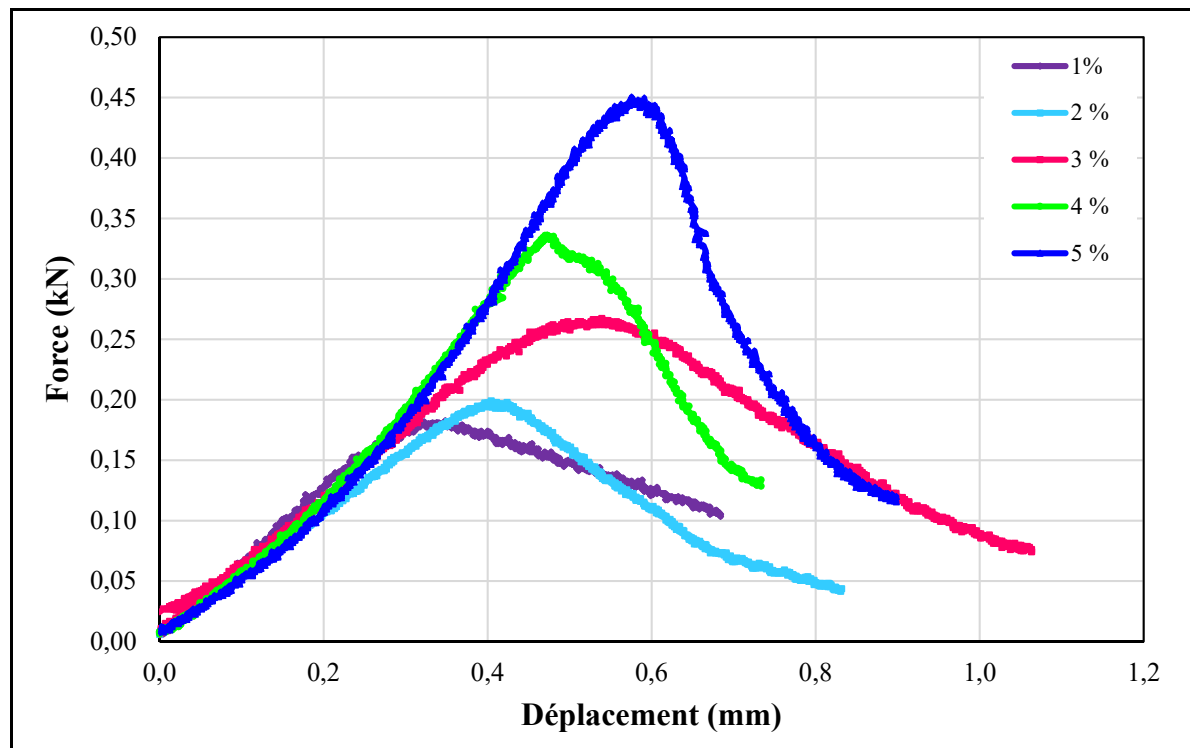


Figure 5.2 Courbe force-déplacement des MR5 pour différentes teneurs en ciment

Tableau 5.2 Taux de libération d'énergie (J_c) et les valeurs de COV pour différentes teneurs en ciment

	COV de U par longueur de fissure (%)			
Ciment (%)	25 mm	32 mm	38 mm	J_c (J/m ²)
1	10%	16%	19%	31,58
2	18%	8%	23%	33,33
3	13%	15%	17%	52,63
4	9%	2%	9%	35,09
5	19%	17%	13%	157,89

Afin de prédire le comportement des MR5 en fonction de la teneur en ciment après l'initiation de la fissuration, des analyses plus poussées ont été menées en utilisant les résultats des FI et CRI.

La Figure 5.3 présente les résultats de FI et CRI de MR5 pour différentes teneurs en ciment. Les résultats montrent que FI diminuent pour les teneurs en ciment élevées. En effet, comme FI est inversement proportionnel à la valeur absolue de la pente de la branche post-pic de la courbe et selon la Figure 5.2 la pente est plus raide pour des quantités importantes de ciment ceci donne des faibles valeurs de FI pour les mélanges avec 4% et 5% de ciment.

Tel que mentionné précédemment, lors de l'essai SCB la force résultante croît avec le déplacement imposé jusqu'à une force critique liée à l'initiation de la fissure. Dans la deuxième phase, la propagation de la fissure se traduit par la pente de la branche post-pic de la courbe. En général, les matériaux fragiles représentent des pentes importantes ceci explique la rupture brutale de ces matériaux tandis qu'une faible pente est démontrée pour les matériaux flexibles. À partir des résultats de FI, on peut relever que les mélanges comportant 4% et 5% de ciment se comportent comme des matériaux fragiles. La même tendance a été constatée dans les résultats des CRI tel qu'illustré dans la Figure 5.3. Les valeurs de CRI pour 4% et 5% sont faibles comparativement aux 1%, 2% et 3%. Cependant, les valeurs de CRI et FI pour les mélanges avec 2% et 3% de ciment sont comparables ceci explique que pas d'effet significatif sur le comportement à la propagation de fissure en augmentant le ciment de 2 à 3%. Il est difficile d'établir une limite sur la quantité de ciment à partir de laquelle le matériau ayant un comportement fragile. Toutefois, on remarque que la différence entre les valeurs de FI et CRI pour 1% et l'intervalle 2-3% est inférieure à la différence entre les intervalles de 2-3% et 4-5%. Ainsi, un pourcentage de 3% de ciment dans les MR5 semble la quantité maximale à mettre dans les MR5 pour limiter la fragilité.

La Figure 5.4 présente les valeurs de FI et CRI des mélanges de MR5 contenant les mêmes pourcentages de ciment dans la condition humide. Les résultats indiquent que l'augmentation de la teneur en ciment diminue les valeurs de FI. Tel qu'observé sur la figure 5.4, les MR5 composés de 1% de ciment présente une valeur de FI beaucoup plus élevée que les mélanges avec 2% de ciment ou plus. Comparativement aux résultats à l'état sec, on remarque que seuls les mélanges avec 1% de ciment se comportent comme un matériau flexible. On peut noter que les valeurs de CRI ne sont pas affectées par le conditionnement humide par rapport aux valeurs

de FI. Même s'il est rare de tester les caractéristiques de rupture des matériaux bitumineux dans des conditions humides, les résultats présentés ici donnent des résultats intéressants. La stabilité des enrobés recyclés à froid, qui est le rapport entre la tension indirecte à l'état humide et la tension indirecte à l'état sec, est couramment utilisé pour évaluer la sensibilité de ces matériaux à l'humidité. En général, la limite inférieure de stabilité retenue est établie à 70% ou 80%. Selon la stabilité de FI, seul le mélange avec 1% peut être considéré comme acceptable.

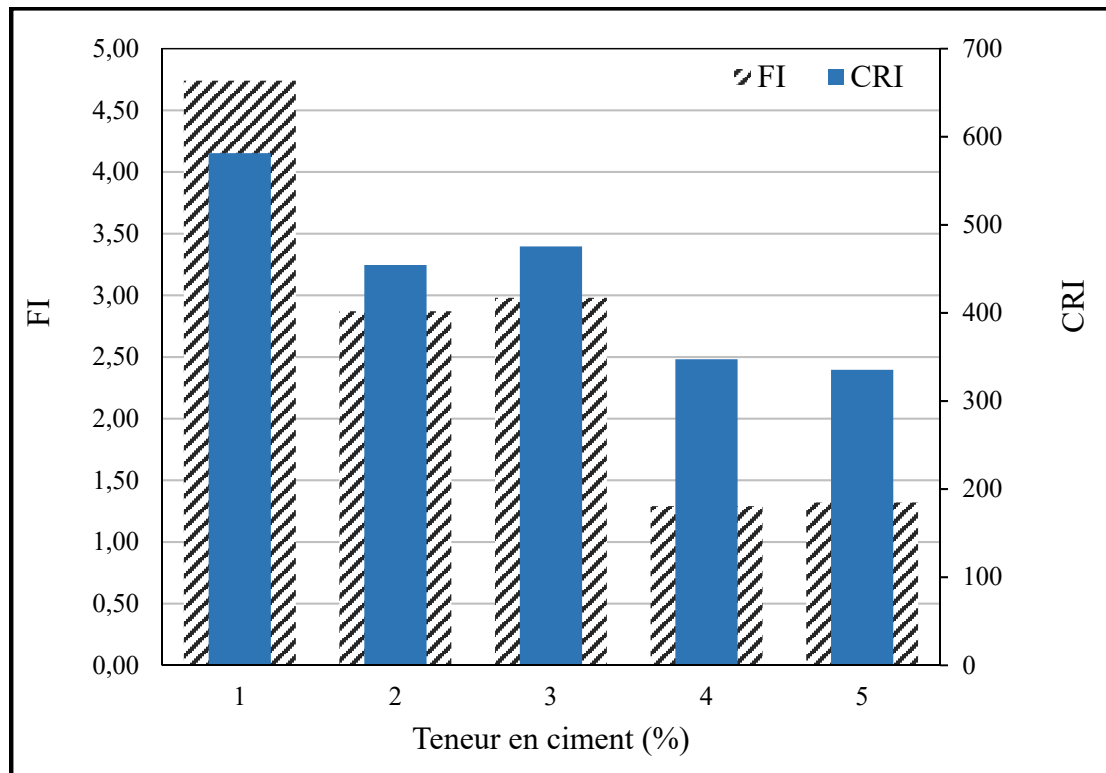


Figure 5.3 Indice de flexibilité (FI) et indice de résistance à la fissuration (CRI) pour différentes teneurs en ciment dans la condition sèche

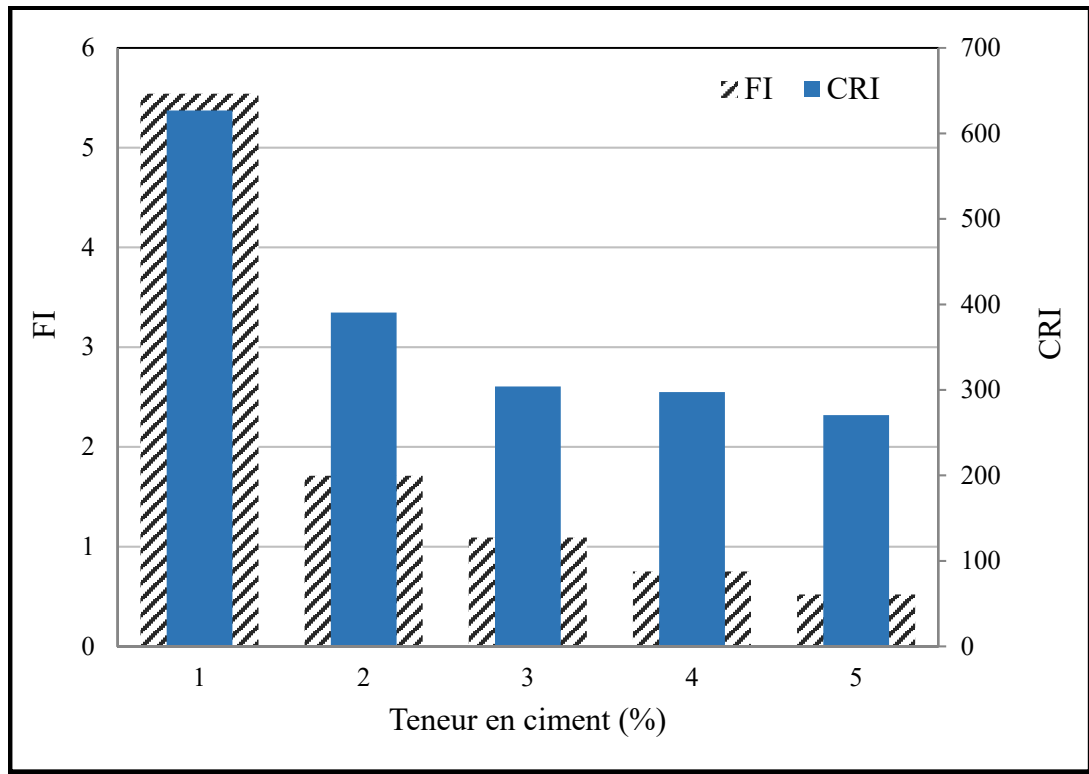


Figure 5.4 Indice de flexibilité (FI) et indice de résistance à la fissuration (CRI) pour différentes teneurs en ciment dans la condition humide

5.6 Conclusion

Le comportement à la fissuration des MR5 en fonction de la teneur en ciment a été évalué dans ce chapitre en utilisant l'essai SCB. Des mélanges de MR5 contenant 1%, 2%, 3%, 4% et 5% ont été testés à 22 ° C sous une charge monotone de 0,5 mm / min. Les résultats ont été analysés en se basant sur les valeurs de J_c , FI et CRI. La valeur de J_c , variant de 31,58 à 157,89 J/m², augmente à mesure que la teneur en ciment augmente, ce qui a révélé que la résistance à la fissuration des MR5 s'améliore avec l'augmentation de la teneur en ciment. Les résultats de FI et CRI des mélanges ont montré que le pourcentage de ciment ajouté contribue au comportement à la propagation des fissures. En effet, pour un pourcentage plus élevé de ciment présent dans les mélanges (4% et 5%), la pente de la branche post-pic de la courbe force-déplacement a tendance à être plus raide par rapport aux autres mélanges (1, 2 et 3%). On peut déduire de ces résultats que jusqu'à 3% de ciment ajouté aux mélanges de MR5, leur

comportement reste flexible. Les résultats de sensibilité à l'humidité ont montré que la fragilité des MR5 augmente avec la teneur en ciment dans la condition humide. Les résultats présentés dans ce chapitre ont été publiés dans la revue *Advances in Civil Engineering Materials* (Ferjani, Carter, Vaillancourt, Dardeau, & Gandi, 2019).

Les résultats de ce chapitre ont montré l'impact de la teneur en ciment sur le comportement à la fissuration des MR5, il est donc nécessaire de tenir compte de cette influence sur la performance à la fissuration des chaussées réhabilitées par le retraitement type II.

CHAPITRE 6

MODÉLISATION DE L'INITIATION ET LA PROPAGATION DES FISSURES DANS LES MR5 ET MR7

6.1 Introduction

Afin de modéliser le comportement des chaussées réhabilitées, il est indispensable de définir les propriétés des matériaux utilisés. Les résultats des essais de module complexe et de flexion semi-circulaire présentés dans les chapitres 3 et 4 ont été utilisés pour déterminer les propriétés viscoélastiques et à la fissuration des MR5 et MR7. Pour simuler le comportement des MR5 et MR7 à l'échelle du matériau, la méthode des éléments finis a été utilisée. Ce chapitre présente le modèle en éléments finis de l'essai SCB en utilisant le logiciel ABAQUS. La première partie est consacrée à présenter les séries de Prony déterminées à partir de l'essai de module complexe afin de définir le comportement viscoélastique dans ABAQUS. La deuxième partie présente le modèle de zone cohésive et la méthode des éléments finis étendus utilisés pour simuler la fissuration dans l'essai SCB. Les étapes de développement du modèle sont par la suite montrées. Finalement, on présente la calibration du modèle avec les résultats expérimentaux.

6.2 Modélisation de la VEL dans ABAQUS

Les propriétés mécaniques des matériaux viscoélastiques linéaires peuvent être déterminées à partir de divers essais notamment l'essai de fluage, de relaxation ou de module complexe. Les résultats de certains essais sont exprimés dans le domaine temporel, tels que le module de relaxation $E(t)$ ou de fluage $D(t)$ et d'autres sont exprimés dans le domaine fréquentiel comme le module complexe E^* . Le module complexe est utile pour définir le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux dans les méthodes de dimensionnement mécaniste-empirique des chaussées. En petites déformations, le logiciel ABAQUS définit la viscoélasticité linéaire des matériaux en utilisant le module de relaxation. Lors de l'essai de relaxation, une déformation constante est appliquée et la contrainte diminue au cours du temps. Le modèle de Maxwell généralisé est approprié pour décrire le comportement d'un matériau

viscoélastique lors d'un essai de relaxation (Baek, 2010). Le modèle est composé d'un ressort en parallèle avec n modèles de Maxwell simple tel qu'illustré sur la Figure 6.1. Le modèle de Maxwell simple se compose d'un ressort de raideur E en série avec un amortisseur de viscosité η .

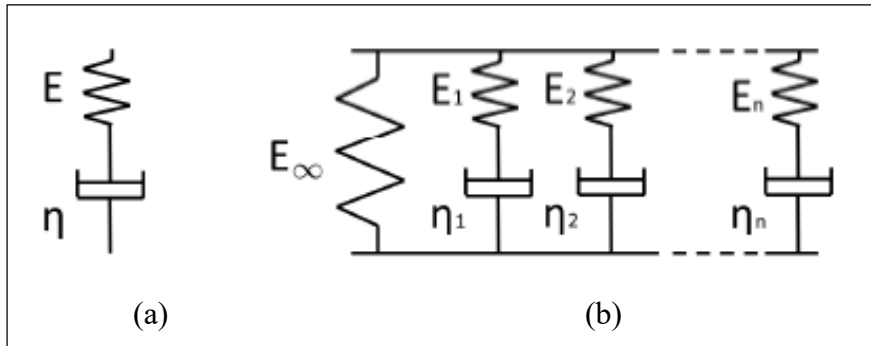


Figure 6.1 Modèle de Maxwell (a) Modèle de maxwell simple
(b) Modèle de maxwell généralisé (Baek, 2010)

Le modèle s'exprime mathématiquement par une série de Prony (E_i , τ_i) :

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_i}\right)}\right) \quad (6.1)$$

Avec :

τ_i : le temps de relaxation , et

E_i : le module de relaxation et E_0 est le module instantané.

Dans ABAQUS, les séries de Prony définissent les modules de cisaillement $G(t)$ de l'essai de relaxation :

$$G(t) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N g_i \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_i}\right)}\right) \right] \quad (6.2)$$

Avec :

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1 + \nu)} \quad (6.3)$$

Où :

$G(t)$: le module de relaxation de cisaillement,

$E(t)$: le module de relaxation, t est le temps de chargement, et

ν : le coefficient de Poisson (supposé constant et égale à 0,35 dans la présente étude).

Il n'est pas nécessaire de calculer les séries de Prony soi-même pour définir la viscoélasticité dans ABAQUS. En effet, il ne faut qu'entrer les résultats normalisés de $G(t)$ définis dans l'équation 5.4 et les séries de Prony sont calculées dans ABAQUS.

$$g(t) = \frac{G(t)}{G_0} = 1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (6.4)$$

Où $g(t)$ est le module de relaxation en cisaillement normalisé, N est le nombre de termes de la série de Prony, g_i sont des termes adimensionnels et τ_i est le temps de relaxation.

Détermination des modules de relaxation de MR5 et MR7

Les relations entre les fonctions de relaxation, de fluage et de module complexe reposent sur la théorie des équations différentielles linéaires et intégrales. Ainsi, la connaissance d'une fonction sur une plage de temps ou de fréquence suffisamment large permet de déterminer une autre fonction en appliquant une méthode de conversion comme celle développée par Park et Schapery (1999). Cette méthode de conversion a été utilisée pour déterminer le module de relaxation des MR5 et MR7 à partir des résultats du module complexe. La méthode se base sur le principe de superposition de Boltzmann et les transformations de Laplace. Le module de relaxation est déterminé par la relation suivante :

$$E(t) \cong \frac{1}{\lambda'} E'(\omega) \Big|_{\omega = (\frac{1}{t})} \quad (6.5)$$

Où :

$$\lambda' = \Gamma(1 - n) \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad (6.6)$$

$$n = \frac{d \log E'(\omega)}{d \log \omega} \quad (6.7)$$

Avec :

$E(t)$: le module de relaxation,

Ω : la fréquence,

E' : la partie réelle du module complexe,

Γ : la fonction gamma,

λ' : un facteur d'ajustement, et

n : la pente de $E'(\omega)$ dans le repère log-log.

L'approche a été validée avec les travaux de Rahman et Tarefder (2017). Une fois que le module de relaxation déterminé à la température de référence (sélectionné comme étant 22 °C ici), $g(t)$ a été calculé et introduit dans le logiciel ABAQUS. Pour obtenir les séries de Prony, le module d'élasticité instantané ou à long terme doit être défini. Les séries de Prony définissant le comportement viscoélastique des MR5 et MR7 sont présentées dans la suite.

6.3 Modélisation de l'initiation et la propagation de fissure

La méthode des éléments finis étendus (XFEM) intégrée dans le logiciel ABAQUS a été utilisée pour modéliser la propagation des fissures dans l'essai SCB. Comme mentionné précédemment, la XFEM est une approche, développée par Belytschko et Black (1996), très utilisée pour modéliser les discontinuités dans les matériaux et les structures. La XFEM améliore la méthode classique des éléments finis en remplaçant les éléments qui sont coupés par une fissure par des éléments spéciaux possédant quelques degrés de liberté supplémentaires qui permettent de représenter un champ de déplacement discontinu de part et d'autre de la

fissure. Récemment, la XFEM a été utilisée pour modéliser la propagation des fissures dans les enrobés bitumineux et les chaussées bitumineuses (Lancaster et al., 2013). L'avantage de la XFEM est qu'il n'est pas nécessaire de prédéfinir le chemin d'initiation et de propagation de la fissure. Cela signifie que la fissure peut s'initier et se propager en fonction de la distribution des contraintes et des critères de rupture définis. Elle est employée conjointement avec des modèles d'interface cohésifs ou des modèles d'endommagement. Pour simuler le mécanisme de fissuration, on doit ainsi définir un critère de rupture du matériau qui comprend deux critères: un critère d'initiation et un critère de propagation de la fissure. Pour cette étude, on a adopté le modèle de zone cohésive (MZC) disponible dans ABAQUS pour définir les critères d'initiation et de propagation dans l'essai SCB pour les matériaux MR5 et MR7. Le modèle a été adopté par différents chercheurs pour caractériser la fissuration dans les matériaux bitumineux (Im et al., 2014; Mahmoud et al., 2014). Le MZC considère l'existence d'une zone de transition d'une longueur caractéristique en pointe de fissure à l'intérieur de laquelle la rupture se produit comme étant un phénomène progressif. La fissuration est gérée par une contrainte de traction cohésive qui s'exprime en fonction de l'ouverture des lèvres de la fissure en train de se créer. L'effort de traction est appliqué sur la zone de transition entre le matériau sain et la fissure réelle comme présentée sur la Figure 6.2. Le MZC est défini par une relation bilinéaire entre l'ouverture à la pointe de fissure δ et l'effort de traction (Figure 6.2). L'ouverture normale de la fissure augmente avec la contrainte cohésive jusqu'à une valeur critique T_{\max} correspond à δ_{in} . À ce stade, les dommages commencent à se produire et la traction va diminuer jusqu'à atteindre δ_{fail} à partir de laquelle la fissure se propage. La zone sous la courbe traction-ouverture est l'énergie de rupture cohésive, Γ_c , requise pour faire propager la fissure.

Les fissures peuvent s'initier et se propager dans le matériau en fonction de la distribution des contraintes au niveau des éléments situés en pointe de la fissure. Un critère de contrainte maximale a été utilisé pour prédire l'initiation de la fissure dans les éléments du modèle. Le mode de fissuration dans l'essai SCB est l'ouverture pure (mode I de chargement) ainsi seulement la contrainte de traction peut provoquer la fissuration dans le matériau. En effet, dans le logiciel ABAQUS, si la contrainte de traction σ_{\max} dépasse la résistance de traction

cohésive T_{\max} (le facteur f dans l'équation 6.8 atteint la valeur 1), la fissure va s'initier dans l'élément associé. Lorsque l'énergie de rupture Γ_c , est atteinte, la fissure se propage dans le matériau (Systèmes, 2013).

$$f = \frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^0} \quad (6.8)$$

Avec :

$\sigma_{0\max}$: la contrainte de traction admissible du matériau (T_{\max})

σ_{\max} : représente la contrainte de traction maximale dans le modèle

$\langle \rangle$: symbole Macaulay, $\langle \sigma_{\max} \rangle = 0$ si $\sigma_{\max} < 0$ et $\langle \sigma_{\max} \rangle = \sigma_{\max}$ quand $\sigma_{\max} > 0$, pour considérer les contraintes de traction seulement.

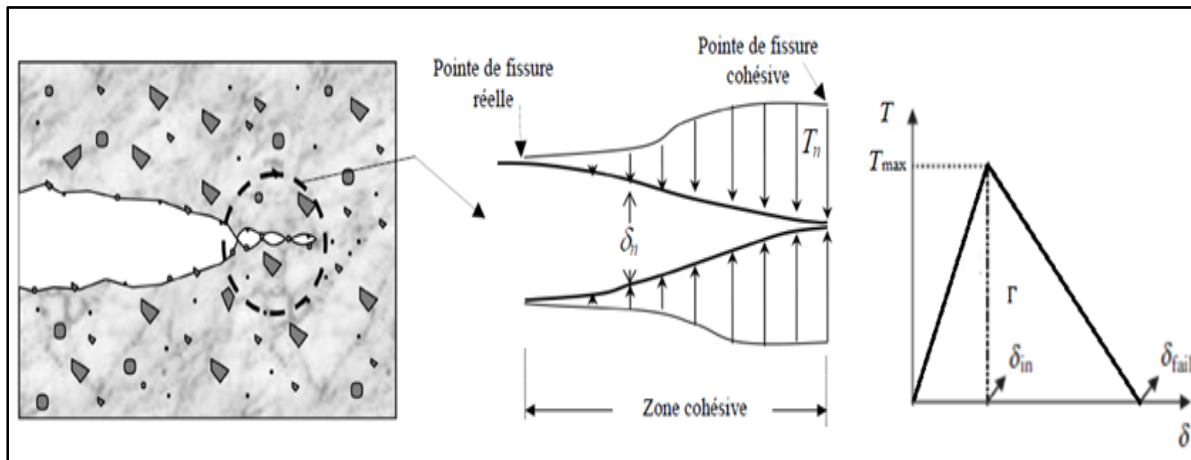


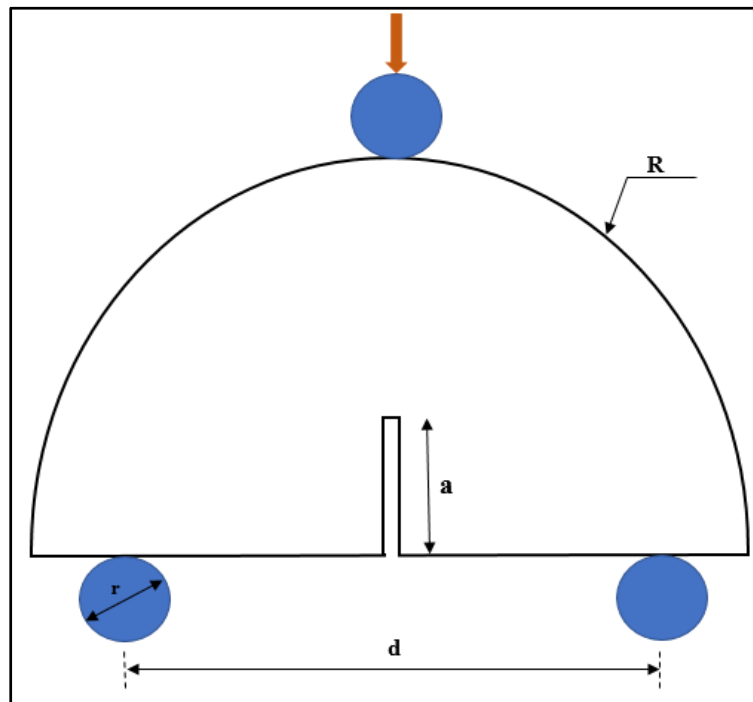
Figure 6.2 Représentation schématique du modèle de zone cohésive (MZC)
(Y.-R. Kim, 2011)

6.4 Développement du MEF de l'essai SCB

6.4.1 Géométrie

L'essai SCB a été modélisé en utilisant le logiciel ABAQUS 6.13.1. En raison de la symétrie, un modèle 2D a été créé pour réduire le nombre d'éléments et ainsi réduire le temps de calcul.

La géométrie du modèle correspond aux dimensions de la configuration de l'essai en laboratoire. La Figure 6.3 présente la géométrie du modèle développé, composé de quatre parties: les deux rouleaux d'appuis, l'éprouvette semi-circulaire et le rouleau de chargement. La Figure 6.4 illustre la géométrie de l'essai SCB modélisé dans le logiciel ABAQUS. L'éprouvette est simplement appuyée sur les appuis, ces derniers ont été bloqués dans les directions des x et y. Le rouleau de chargement a été bloqué dans la direction des x. Pour imposer un chargement monotone, un déplacement vertical (suivant y) de 0,5 mm/min a été défini en tant que condition limite au point de référence (RP) du rouleau (Figure 6.4). La variation de la force et le déplacement au point RP sont enregistrés pour obtenir la courbe force-déplacement. Comme celles réalisées en laboratoire, les fissures ont été conçues le long de l'axe de symétrie de l'éprouvette avec une largeur de 3 mm et trois différentes longueurs (25, 32 et 38 mm).



$$d = 127\text{mm}, R = 75\text{mm}, r = 25\text{mm}$$

Figure 6.3 Dimensions du dispositif de l'essai SCB
(ASTM, 2016)

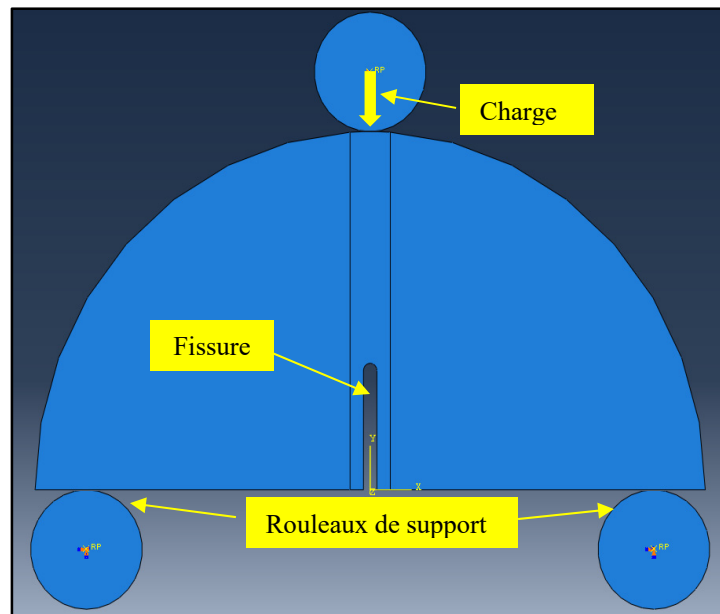


Figure 6.4 Géométrie et les conditions aux limites du modèle de SCB

6.4.2 Propriétés des matériaux

Les rouleaux aux appuis et de chargement sont supposés en acier avec un module élastique de 200 GPa et un coefficient de Poisson de 0,3. Le comportement viscoélastique des matériaux testés a été défini en utilisant les séries de Prony déterminées selon l'approche présentée dans la partie 6.2. En effet, après la détermination des modules de relaxation des MR5 et MR7 à partir des résultats du module complexe, 11 constantes de la série Prony ont été obtenues telles que présentées dans le Tableau 6.1. Le coefficient de Poisson des MR5 et MR7 est supposé constant et égal à 0,35. Les paramètres définissant les propriétés à la rupture des matériaux ont été déterminés selon un processus de calibration présenté dans la partie 6.5.

Tableau 6.1 Les constantes des séries de Prony de MR5 et MR7

MR5		MR7	
g_i	τ_i	g_i	τ_i
0,0728	1,57E-11	0,0393	1,72E-11
0,1099	1,18E-09	0,0820	1,41E-09
0,0911	3,63E-08	0,0910	5,88E-08
0,0989	5,33E-07	0,1107	1,03E-06
0,0989	1,59E-05	0,1241	1,60E-05
0,0971	7,84E-05	0,1236	2,16E-04
0,0967	9,24E-04	0,1143	2,75E-03
0,0904	1,21E-02	0,0980	3,47E-02
0,0803	1,64E-01	0,0799	5,06E-01
0,0636	2,44E+00	0,0614	8,88E+00
0,0405	4,63E+01	0,0434	2,08E+02
0,0237	1,71E+03	0,0207	1,50E+04

6.4.3 Maillage

Pour déterminer le maillage optimal et assurer la précision du modèle, une analyse de la convergence de maillage a été effectuée. La Figure 6.5 présente le maillage final du modèle développé. Le modèle a été discrétisé avec des éléments de type CPE4R (*4-node bilinear plain strain elements with reduced integration*). Un maillage fin (éléments de taille 1 mm×1mm) a été effectué dans la zone avoisinante la ligne de propagation de fissure où apparaissent de fortes concentrations de contrainte. Des éléments plus grands ont été utilisés dans les zones où la concentration des contraintes est faible pour réduire le temps de calcul.

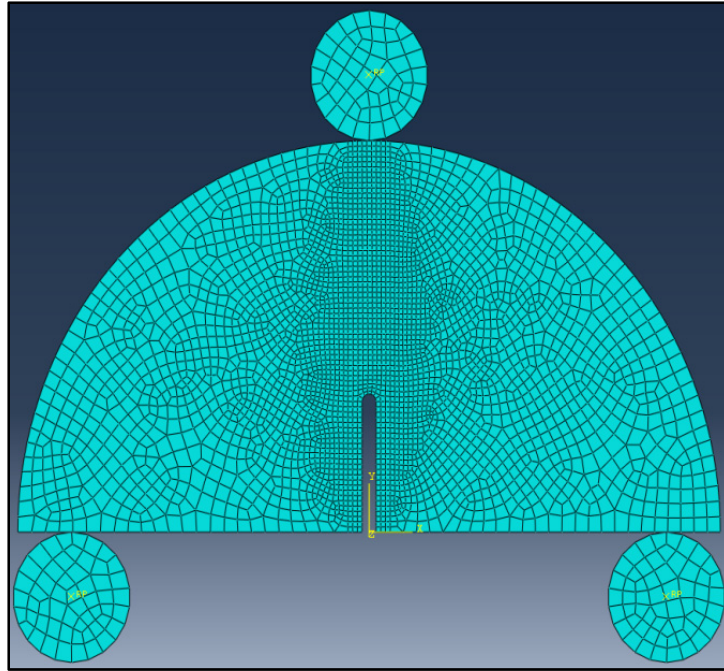


Figure 6.5 Maillage du modèle de SCB

6.5 Calibration du modèle

Pour définir les propriétés des matériaux dans le modèle, il est nécessaire de déterminer les paramètres du MZC. Pour ce faire, une procédure de calibration, similaire à celle proposée par Aragão et Kim (2012), a été utilisée afin de corréler la courbe force-déplacement numérique avec la courbe expérimentale. Deux paramètres définissent le MZC: la résistance à la traction cohésive T_{\max} et l'énergie de rupture cohésive Γ_c . De plus, on a constaté que la variation du module d'élasticité E affecte les résultats. Ainsi les valeurs de E , T_{\max} et Γ_c ont été variées. Au début, les valeurs de T_{\max} et Γ_c ont été fixées et la valeur de E a été multipliée par trois facteurs soient 1,25, 1,50 et 2,00. Comme le montre la figure 6.6, la variation de E contrôle principalement la pente de la partie linéaire de la courbe force-déplacement. Par la suite, E et Γ_c sont maintenus constants et T_{\max} a été multipliée par les mêmes facteurs. La variation de T_{\max} affecte principalement la valeur de la force maximale dans la courbe (Figure 6.7). De la même manière, l'effet Γ_c a été investigué tel qu'illustré à la Figure 6.8. En effet, plus la valeur de l'énergie de rupture est importante, plus l'air sous la courbe est grand. La Figure 6.9 présente les résultats de calibration de MR5 et MR7 pour deux longueurs de fissures (25 mm

et 32 mm) et les valeurs moyennes de E , T_{\max} et Γ_c correspondants sont présentés dans le Tableau 6.2.

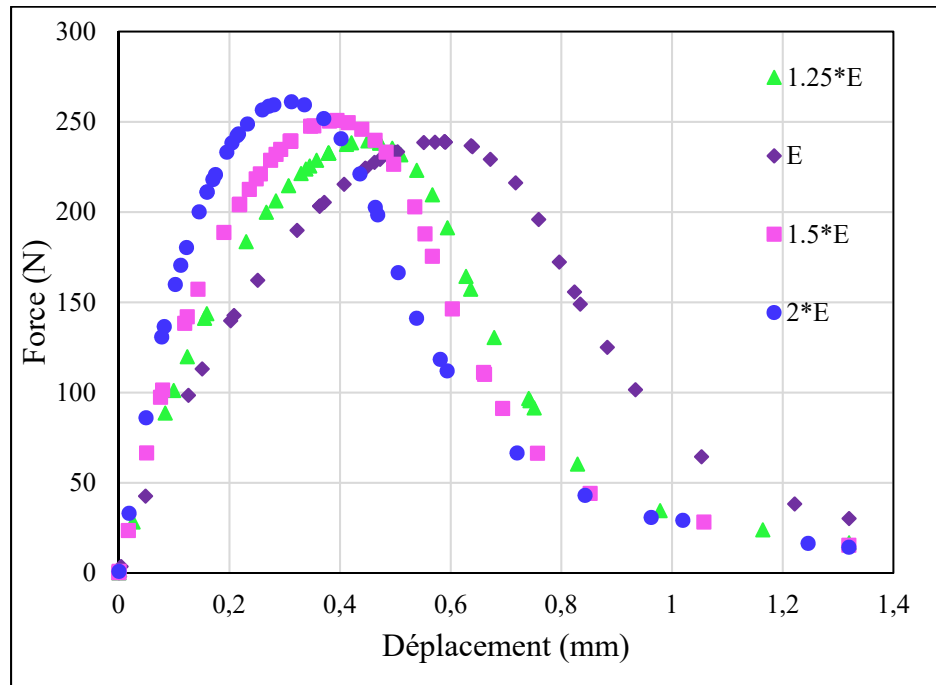


Figure 6.6 Variation du module d'élasticité E de MR7

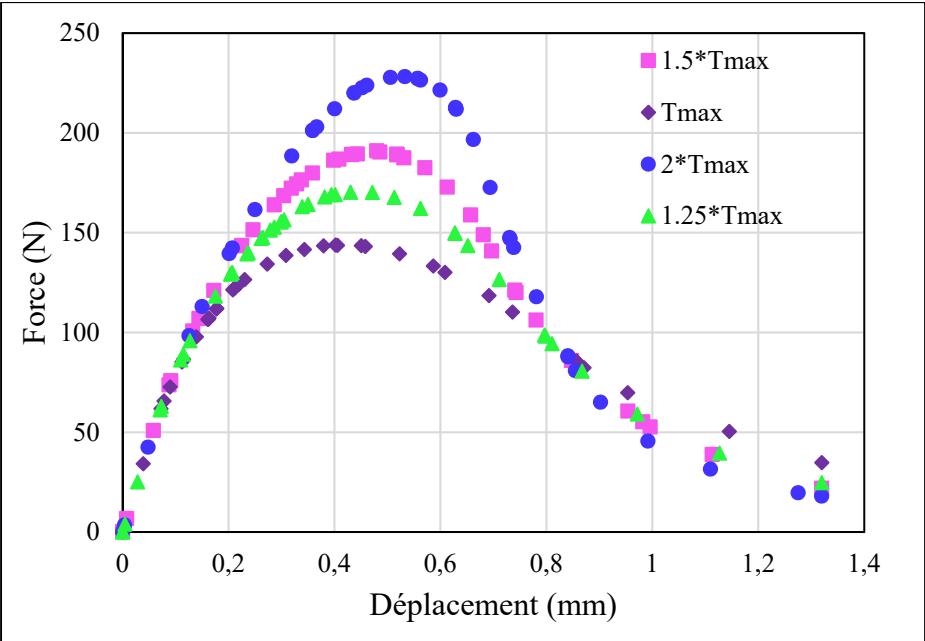


Figure 6.7 Variation de la résistance à la traction cohésive T_{\max} de MR7

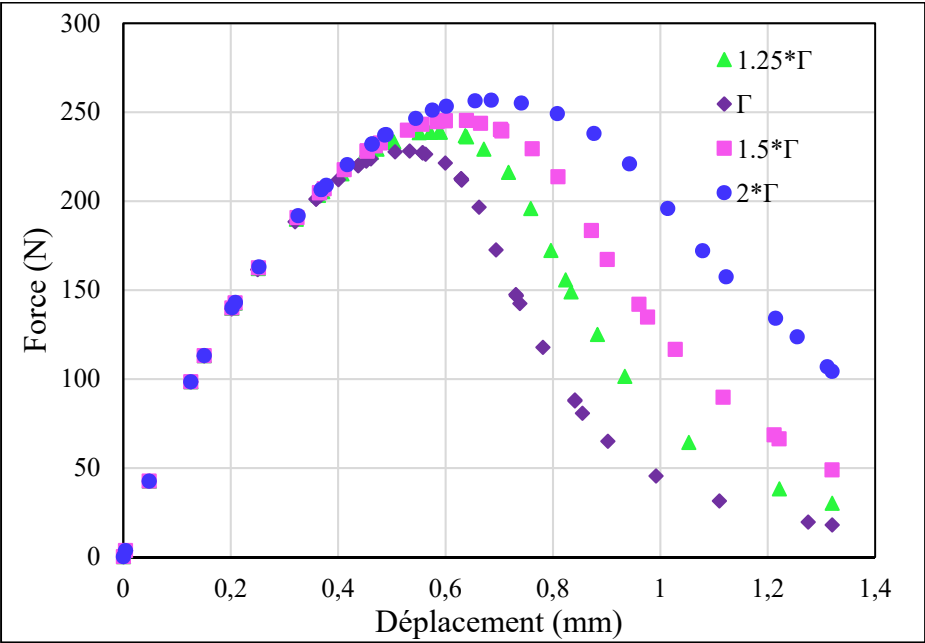


Figure 6.8 Variation de l'énergie de rupture cohésive Γ_c de MR7

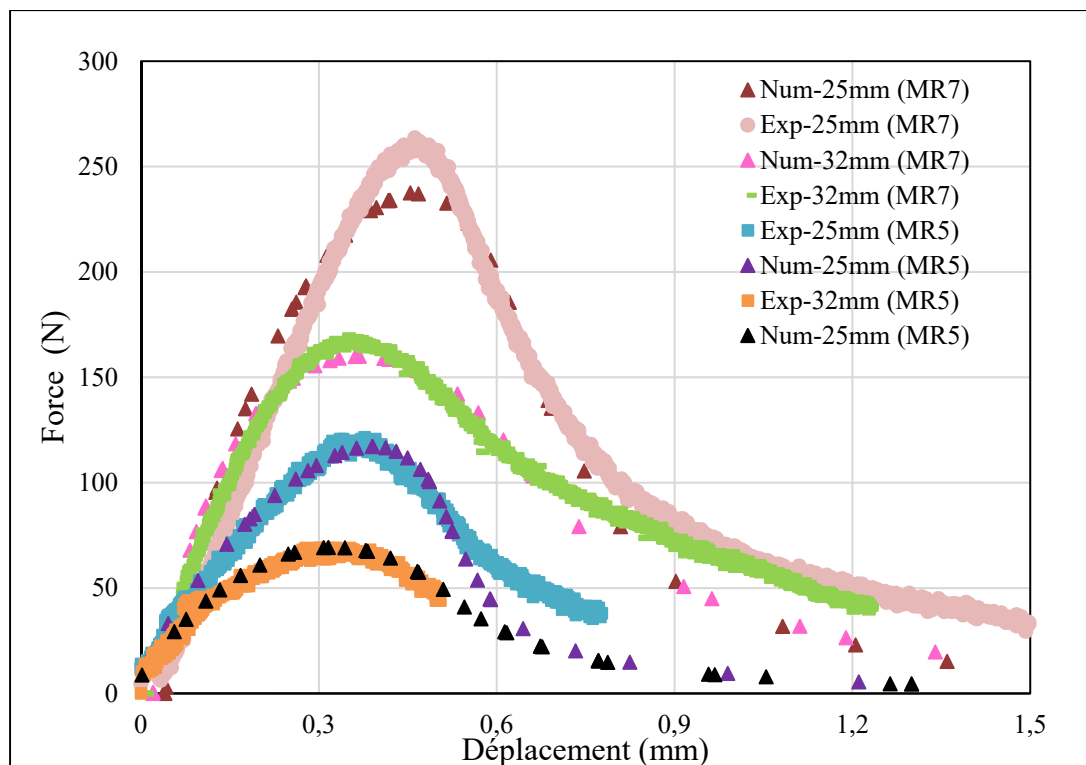


Figure 6.9 Calibration des courbes force-déplacement de MR5 et MR7
(Fissures 25 et 32 mm)

Tableau 6.2 Paramètres de la loi de zone cohésive

Mélange	E (à long terme) (MPa)	T_{\max} (MPa)	Γ_c (kJ / m ²)
MR5	850	1,9	0,3
MR7	700	3,9	1,0

6.6 Vérification du modèle et analyse des résultats

En utilisant les valeurs moyennes du module d'élasticité, la résistance à la traction cohésive et de l'énergie de rupture cohésive obtenues à partir de la calibration, les modèles de SCB de MR5 et MR7 avec des fissures initiales de longueur 38 mm ont été développés pour vérifier la modélisation. Comme présenté à la Figure 6.10, les courbes de force-déplacement numériques sont proches aux résultats obtenus en laboratoire. Ceci valide la méthode de calibration adoptée et l'utilisation de MZC et la XFEM pour simuler l'initiation et la propagation des fissures dans

les matériaux MR5 et MR7. La validité de la simulation peut être aussi illustrée sur les figures 6.11 a et 6.11 b, où le chemin de fissuration observé en laboratoire ressemble à celui numérique.

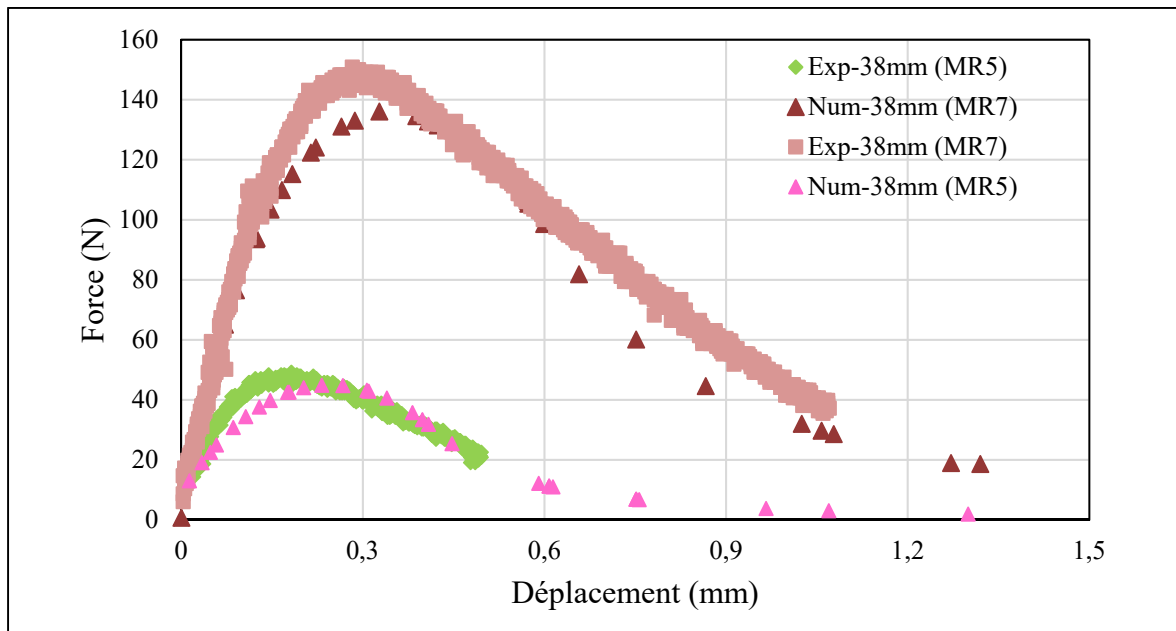


Figure 6.10 Validation du modèle SCB avec une fissure initiale de 38 mm pour MR5 et MR7

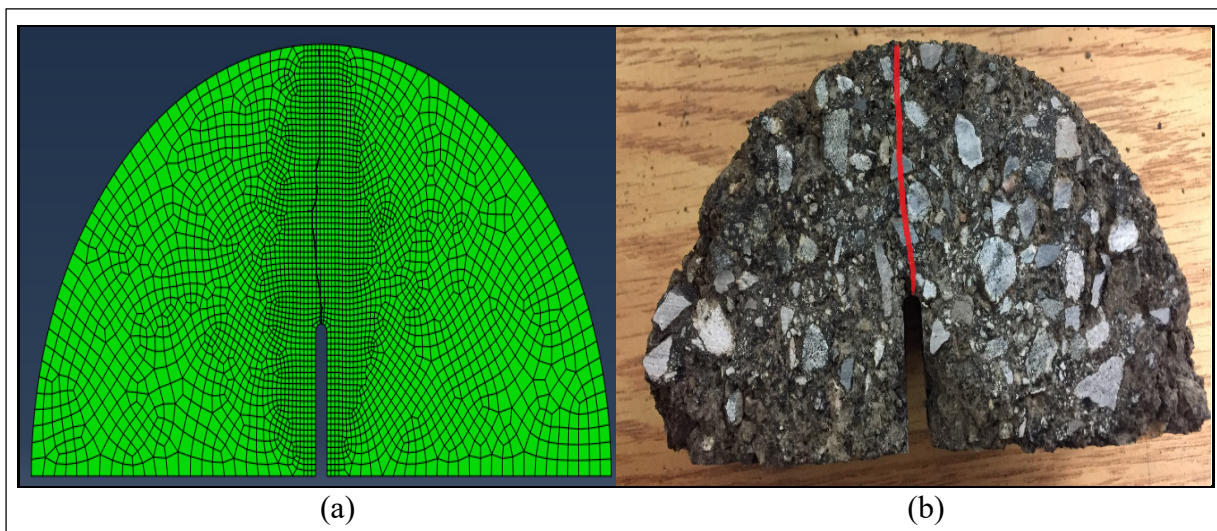


Figure 6.11 Essai SCB avec une fissure initiale de 25 mm (a) Chemin de fissure numérique
(b) Chemin de fissure en laboratoire

La Figure 6.11 présente l'évolution de dommage dans le matériau MR7. En effet, la concentration des contraintes de traction est observée au voisinage de la pointe de fissure variant entre 1,91 MPa et 4,33 MPa (Figure 6.11 a). La fissure s'amorce lorsque le critère d'initiation est atteint soit T_{\max} égale à 3,95 MPa. Une fois que l'énergie de rupture cohésive est atteinte, la fissure se propage, l'élément se rupture et la concentration de contrainte passe aux éléments suivants jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

ABAQUS définit l'état des éléments craqués en utilisant une variable d'endommagement appelée STATUSXFEM, qui évolue de 0 à 1. Si cette variable égale à 1, l'élément est complètement fissuré alors qu'une valeur située entre 0 et 1 correspond à un élément partiellement fissuré. La Figure 6.12 b montre la variation de STATUSXFEM dans le matériau MR7. Les éléments de couleur rouge sont complètement fissurés. Une petite déviation du chemin de fissure par rapport à l'axe central est observé. Ceci probablement dû à une diminution de transfert de contrainte de traction à la pointe de la fissure, où les contraintes de cisaillement sont éventuellement prononcées.

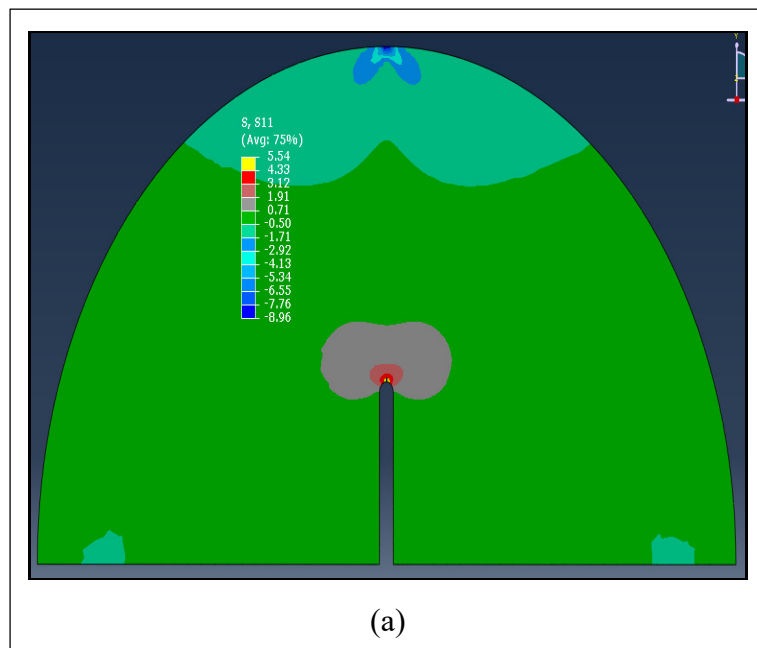


Figure 6.12 (a) L'initiation de fissuration (b) La variable STATUSXFEM de MR7 (fissure de 25 mm)

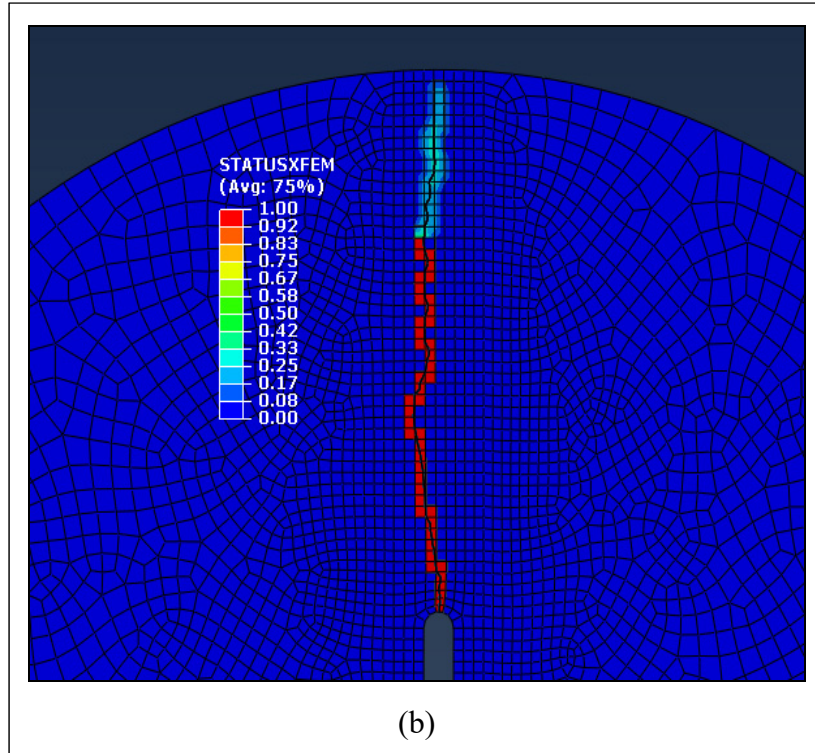


Figure 6.13 (suite) (b) La variable STATUSXFEM de MR7
(fissure de 25 mm)

6.7 Conclusion

La modélisation du comportement des MR5 et MR7 est une étape essentielle pour pouvoir modéliser les chaussées réhabilitées par retraitement type I et type II. Cependant, il n'existe pas des travaux publiés sur la modélisation du mécanisme de fissuration dans les matériaux recyclés à froid. Suite à la détermination des propriétés viscoélastiques et de la résistance à la fissuration des MR5 et MR7 en laboratoire, la simulation du comportement de ces matériaux a été réalisé moyennant la méthode des éléments finis. On a développé un modèle 2D en éléments finis de l'essai SCB. L'initiation et la propagation des fissures dans le modèle ont été modélisés en utilisant la méthode des éléments finis étendus (XFEM) et le modèle de zone cohésive (CZM). Les comportements viscoélastiques des MR5 et MR7 ont été défini à l'aide des séries de Prony obtenues à partir de l'essai de module complexe. Le modèle développé a permis de simuler la fissuration dans ces matériaux. Afin d'avoir les paramètres définissant les propriétés des MR5 et MR7 et qui sont nécessaires pour la modélisation à l'échelle des

structures réhabilitées, les résultats numériques ont été ajustés puis validés selon les résultats expérimentaux de l'essai SCB. Les paramètres des matériaux ressortis dans ce chapitre seront utilisés dans les modèles des chaussées réhabilitées dans la suite de cette thèse.

CHAPITRE 7

MODÉLISATION DES CHAUSSEES BITUMINEUSES PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

7.1 Introduction

Les méthodes d'évaluation du comportement des chaussées soumises à un chargement sont souvent basées sur la théorie multicouche élastique. Cette dernière suppose que les enrobés bitumineux ont un comportement élastique linéaire alors que les enrobés bitumineux présentent un comportement viscoélastique sous l'effet du trafic et la température. Cette complexité a accru l'utilisation de la méthode des éléments finis (MEF) pour l'étude des réponses mécaniques des chaussées bitumineuses.

Afin de pouvoir appliquer la MEF pour la modélisation des structures réhabilitées, il est indispensable de se munir d'un outil numérique capable de simuler la réponse de la chaussée et reproduire le chargement le plus précisément possible. L'objectif de ce chapitre est d'introduire le fonctionnement du logiciel ABAQUS et valider son applicabilité pour modéliser une structure de chaussée. L'élaboration d'un modèle en éléments finis d'une structure de chaussée réelle est ainsi présentée dans ce chapitre. Pour ce faire, les données d'une section dans l'état du Nouveau-Mexique disponible dans la base de données LTPP (*Long Terme Pavement Performance*) sont utilisées. Ces données incluent la structure de la chaussée et les résultats de l'essai de déflectomètre à masse tombante (*Falling Weight Deflectometer* : FWD). Le comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux est défini dans le modèle avec les données de module de relaxation disponible dans les travaux de Chatti et al. (2017). Le modèle en éléments finis reproduit le chargement appliqué par l'essai FWD. Une analyse paramétrique est présentée afin d'évaluer les facteurs pouvant affecter les résultats. Finalement, les résultats numériques sont comparés à ceux expérimentaux.

7.2 Modélisation des chaussées par éléments finis

La méthode des éléments finis a été appliquée pour analyser les chaussées bitumineuses en premier par Duncan et al. (1968). Cette méthode est capable de simuler différents comportements de matériaux, de tenir compte du type d'interface entre les couches et de modéliser les discontinuités dans la structure de chaussée. Elseifi et al. (2006) et Carvalho (2012) ont développé des modèles en éléments finis pour étudier l'effet de la vitesse de chargement et les propriétés des enrobés bitumineux sur la profondeur des ornières. Wu, Chen, et Yang (2011) ont développé un modèle 3D pour analyser la performance à l'orniérage des chaussées soumises à des essais en vraie grandeur. Le comportement viscoélastique des couches liées a été défini en utilisant les modèles de fluage alors que le modèle Drucker-Prager (DP) a été utilisé pour définir le comportement non linéaire des matériaux granulaires. Mikhail et Mamlouk (1997) ont étudié l'impact de l'interaction entre les pneus des véhicules et la surface de la chaussée sur la réponse de la structure moyennant le logiciel ABAQUS et en définissant le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux. La précision des résultats de la résolution par la MEF dépend de plusieurs facteurs, notamment le maillage (dimensions des éléments), l'endroit de l'évaluation des résultats, et les conditions aux limites (Elseifi et al., 2018).

7.3 L'essai de déflectomètre à masse tombante (FWD)

L'essai de déflectomètre à masse tombante (FWD), est une technique non destructive d'auscultation des chaussées permettant de quantifier la rigidité de la chaussée. L'essai est conçu pour reproduire la sollicitation due au passage d'un véhicule lourd. Il consiste à mesurer les déflexions d'une chaussée engendrées par une masse tombante. Les résultats de l'essai permettent d'estimer la capacité structurale, quantifier in situ les modules élastiques des couches et calculer les contraintes et les déformations au sein de la chaussée (Y. Huang, 2004). Les modules des couches sont habituellement déterminés par la théorie multicouche élastique linéaire. Plusieurs chercheurs ont eu recours à la MEF pour simuler la réponse des chaussées soumises à l'essai FWD (M. Li, Wang, Xu, & Xie, 2017).

Le déflectomètre à masse tombante se compose de plusieurs systèmes : le système de chargement, le système hydraulique et le système électronique installés dans une remorque et un système d'acquisition de données pour enregistrer les données de l'essai (Figure 7.1). Le système de chargement est constitué d'une plaque de chargement circulaire de 300 ou 450 mm de diamètre. Cette plaque, est située sur un coussin de caoutchouc pour uniformiser le chargement, permet de transmettre la charge à la chaussée (Figure 7.2). La charge est créée par une masse qui tombe en chute libre sur une enclume comportant des amortisseurs. La force appliquée peut varier de 7 à 120 kN selon la hauteur de la chute et la masse qui tombe (Diffiné, 2012). La durée de l'impulsion générée est typiquement de 20 à 40 ms.

Le déplacement vertical (ou la déflexion) de la surface de la chaussée se mesure par sept ou neuf géophones. Ces derniers sont des capteurs de déplacement situés sur une longueur allant de 1,5 m jusqu'à 2 m selon le nombre des géophones. Le bassin de déflexion correspond à l'ensemble des déflexions maximales enregistré par chaque géophone (Figure 7.3). L'appareil comporte aussi des capteurs pour mesurer les températures.



Figure 7.1 Les systèmes de FWD (MTQ, 2013)

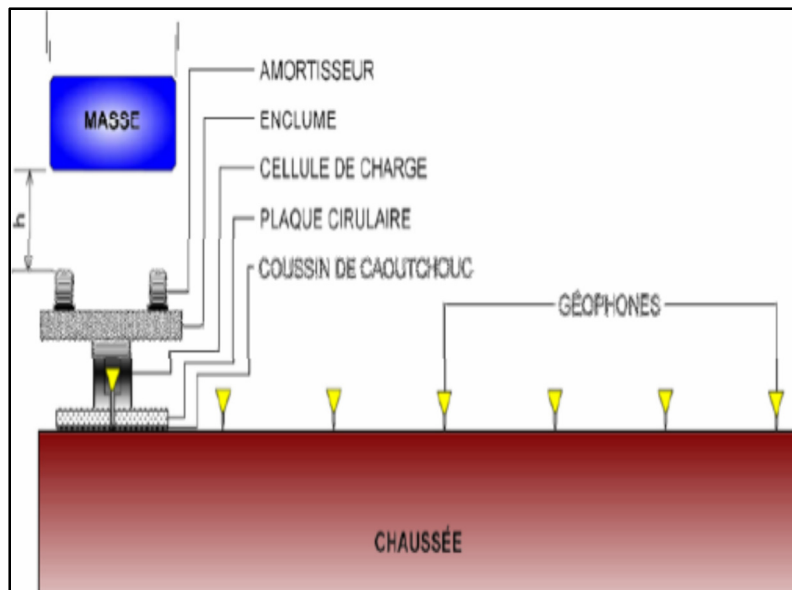


Figure 7.2 Système de chargement du FWD (Diffiné, 2012)

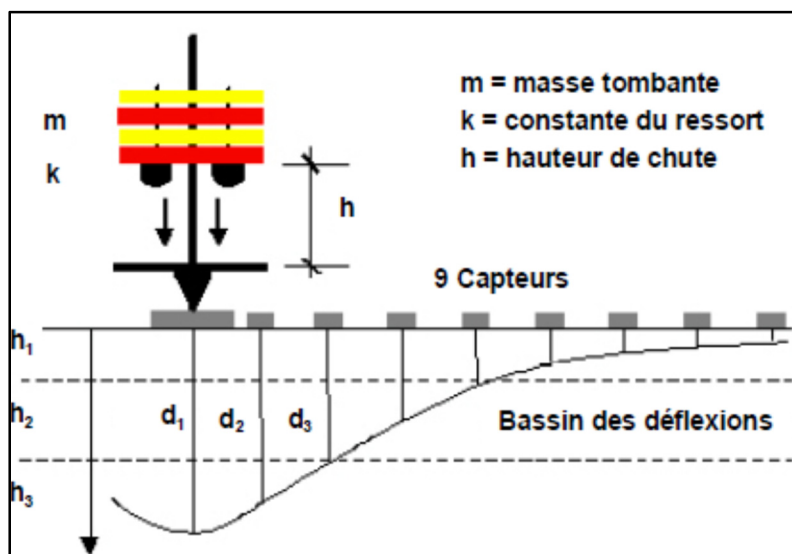


Figure 7.3 Bassin de déflexion dans les structures de chaussées (Diffiné, 2012)

7.4 Description de la section d'étude

La base de données LTPP (*Long-Term Pavement Performance Program*) a été utilisée pour développer le modèle en éléments finis et valider la démarche de modélisation adoptée

dans cette étude. Elle intègre des relevés de performance de plus de 2500 sections de chaussées souples et rigides situées aux États-Unis et au Canada. La section 35-0801 dans l'état du Nouveau-Mexique (Figure 7.4) a été choisie en raison de la disponibilité des données tels que les propriétés des matériaux, la structure de la chaussée ainsi que les résultats de l'essai du déflectomètre à masse tombante (FWD) (Chatti et al., 2017; LTPP, 2019).



Figure 7.4 Emplacement de la section étudiée (Adaptée de Google Map)

La structure de la chaussée de la section 35-0801 est présentée dans la Figure 7.5. Il s'agit d'une structure composée d'une fondation granulaire de 246 mm d'épaisseur recouverte d'un enrobé bitumineux de 107 mm d'épaisseur. La structure de chaussée repose sur un sol d'épaisseur 4371 mm situé sur une couche rigide semi-infinie. Les propriétés des matériaux des couches sont présentées dans le Tableau 7.1. Afin de caractériser le comportement viscoélastique de l'enrobé existant, des carottages ont été effectués sur la section étudiée et ont été testés en laboratoire. Le module de relaxation de l'enrobé $E(t)$ à la température moyenne (19.7 °C) mesuré sur la section de la chaussée disponible dans le document de Chatti et al. (2017) a été utilisé dans cette étude (Figure 7.6).

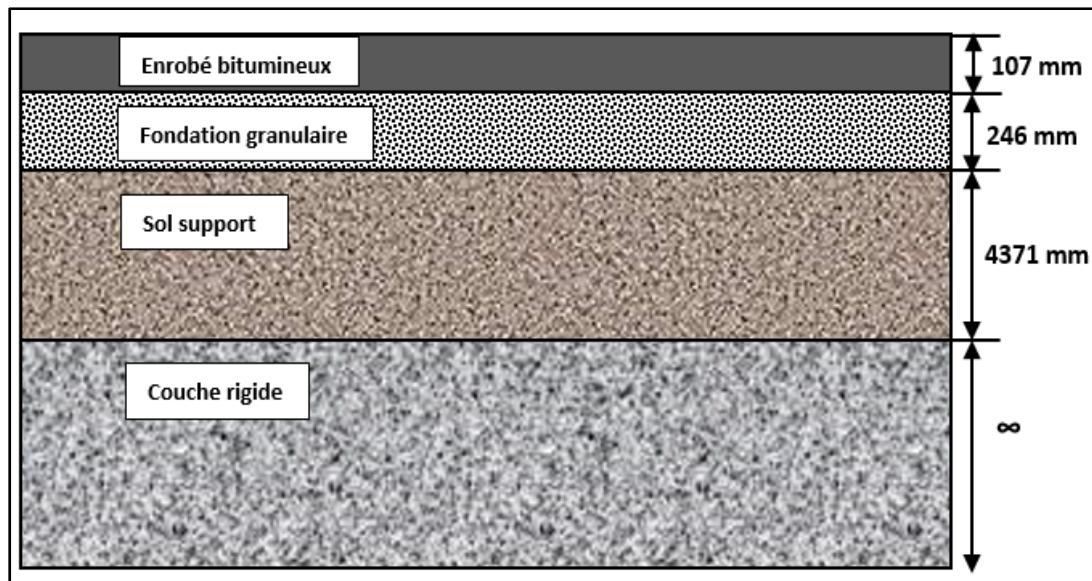


Figure 7.5 Structure de chaussée de la section 35-0801 du Nouveau Mexique

Tableau 7.1 Propriétés des matériaux des couches de la chaussée

Couches	Masse volumique (t/mm ³)	Coefficient de poisson ν	Module (MPa)
Enrobé bitumineux	2,32E-09	0,35	E(t)
Fondation granulaire	2,00E-09	0,40	143,6
Sol	1,60E-09	0,45	130,0
Couche rigide	2,00E-09	0,20	1 629,7

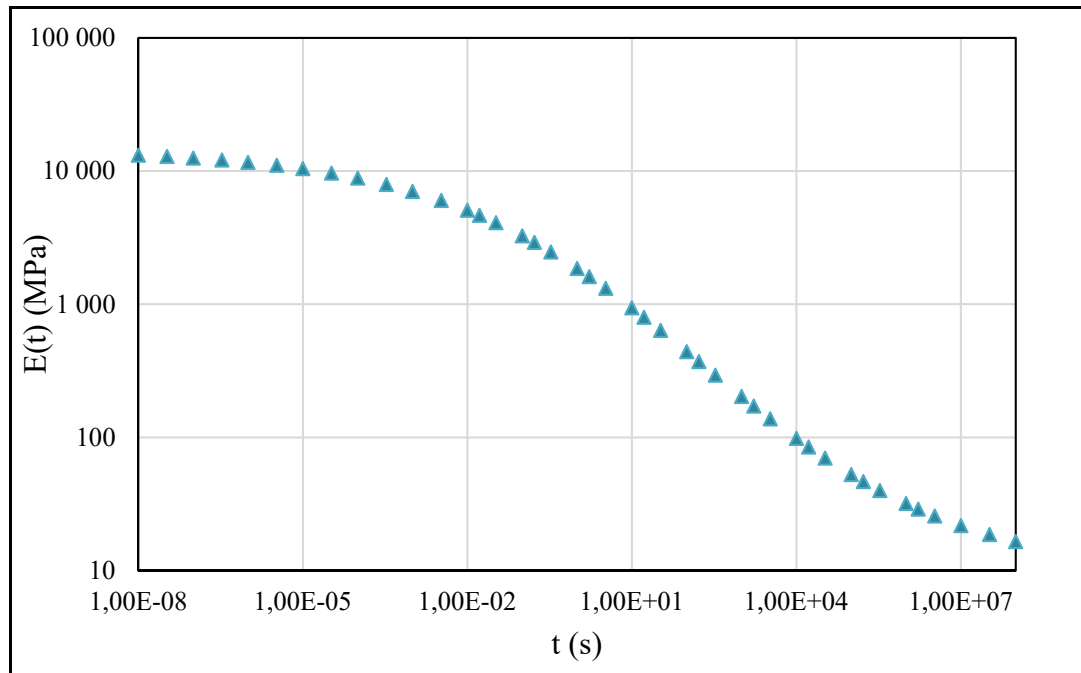


Figure 7.6 Module de relaxation de l'enrobé (Chatti et al., 2017)

Des campagnes d'auscultation ont été réalisées sur la section le 04 Avril 2005 pour évaluer la capacité structurale de la chaussée. La structure a été soumise à un historique de chargement du FWD de 60 ms de pression maximale de 344 kPa tel qu'illustrée à la Figure 7.7. La charge a été supposée uniformément répartie sur une surface circulaire de rayon de 152 mm. Les déflexions à la surface de la chaussée ont été mesurées par 9 géophones (D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8 et D9) situés à des distances radiales de 0, 203, 305, 457, 610, 914, 1219, 1524 et 1829 mm respectivement, par rapport au centre de la plaque de chargement. La Figure 7.8 présente les déflexions mesurées par les 9 géophones de la section étudiée.

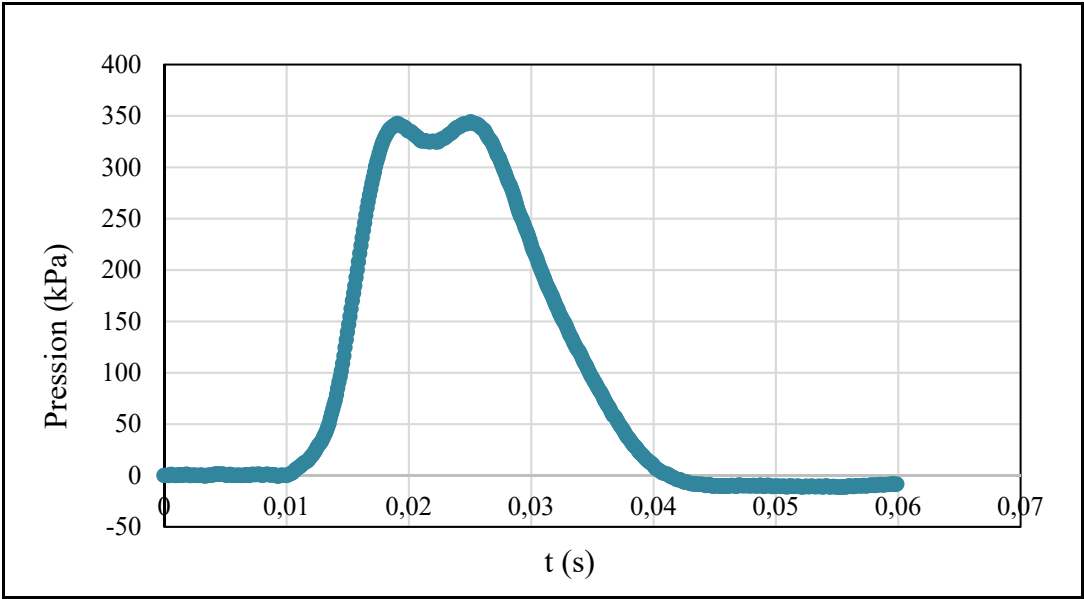


Figure 7.7 Historique de chargement du FWD

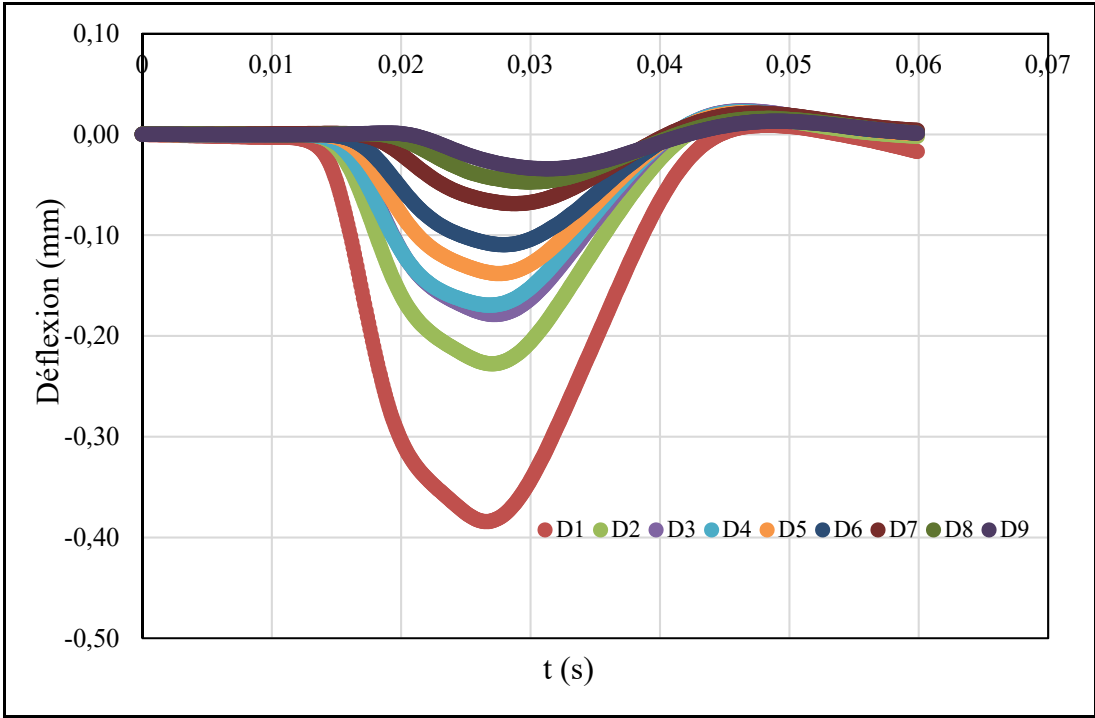


Figure 7.8 Historique de déflexions mesurées par chaque géophone

7.5 Modélisation de la structure de chaussée

L'essai FWD de la section 35-0801 a été modélisé moyennant le logiciel ABAQUS. Ce dernier permet de définir de nombreuses lois de comportement des matériaux et différents types de chargement, et capable de réaliser des analyses complexes. Dans cette étude, le développement du modèle implique la sélection de la géométrie du modèle, la définition des propriétés des matériaux, la simulation du chargement similaire à celui du FWD ainsi que le maillage du modèle.

7.5.1 Géométrie du modèle

La première étape de la modélisation en éléments finis consiste à choisir la géométrie du modèle. ABAQUS inclut trois types de modèles : le modèle 2D en déformation plane, le modèle 2D axisymétrique et le modèle 3D. La géométrie du modèle a un impact considérable sur le temps de calcul. Il est idéal d'utiliser un modèle en éléments finis tridimensionnel pour simuler les géométries réelles de la section d'essai de la chaussée. Cependant, un modèle 3D implique un grand nombre d'éléments et de nœuds qui nécessite une grande puissance et un long temps de calcul. De ce fait, un modèle en 2D a été choisi pour cette étude. En outre, les conditions de chargement du FWD sont considérées axisymétriques en raison de sa plaque circulaire d'où le modèle 2D axisymétrique a été adopté pour modéliser la section d'essai.

Selon Duncan et al. (1968) et Howard et Warren (2009), afin de minimiser les effets des bords sur le comportement de la chaussée, il faut considérer un domaine de dimension longitudinale minimale égale à 12 fois le rayon de chargement et 50 fois le rayon dans la direction verticale du modèle. Le modèle 2D de la structure a été développé à l'aide de la version 6.13.1 du logiciel ABAQUS tel qu'illustrée à la figure 7.9. Le modèle a une dimension de 1824 mm dans la direction du trafic et d'une profondeur de 7600 mm. Les couches de la chaussée sont supposées collées et ses épaisseurs ont été définies selon les données de la section.

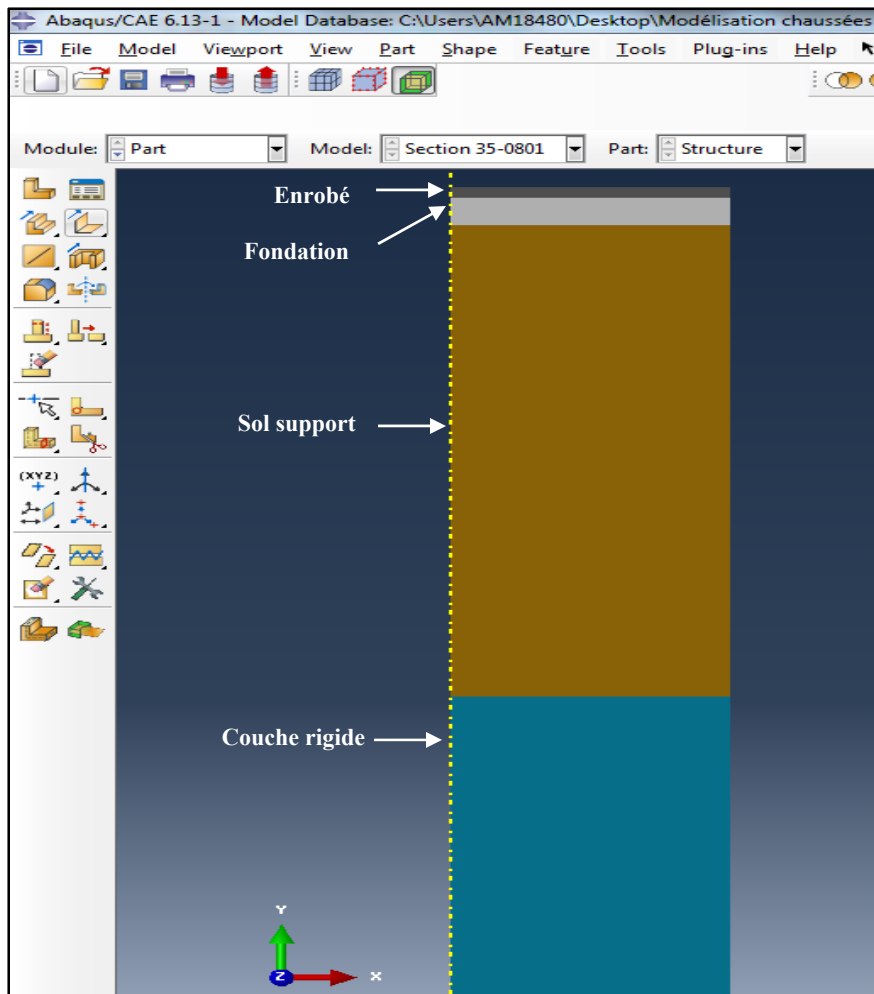


Figure 7.9 Géométrie du modèle de la structure de chaussée étudiée

7.5.2 Définition des propriétés des matériaux

Dans ABAQUS, les utilisateurs définissent les caractéristiques des matériaux telles que les propriétés volumétriques, mécaniques et thermiques dans le module « *Property* » (Figure 7.10). Le comportement de la base granulaire, du sol support ainsi que la couche rigide est considéré comme un comportement élastique isotrope. Les densités et les modules élastiques ont été définis selon les données de la section présentés dans le Tableau 7.1. En ce qui concerne l'enrobé bitumineux, le comportement viscoélastique a été modélisé en définissant le module de relaxation présenté précédemment.

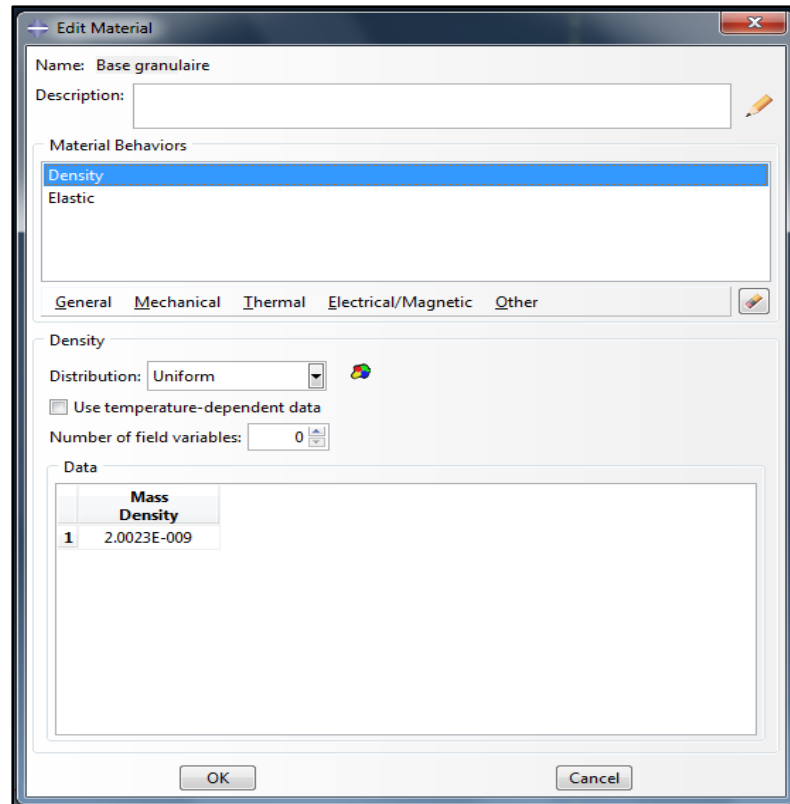


Figure 7.10 Définition des propriétés des matériaux dans ABAQUS

7.5.3 Conditions aux limites et chargement

Dans la MEF, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites pour obtenir une solution. Ces conditions sont des contraintes imposées qui dépendent de la nature du système et des variables du problème. Selon les dimensions du modèle, on peut considérer que la limite inférieure de la chaussée est éloignée de la surface chargée ainsi un encastrement a été appliqué pour fixer la base de la chaussée (Rashadul Islam et al., 2016). Les translations et les rotations sont bloquées dans toutes les directions, comme illustré sur la Figure 7.11. Les couches de la chaussée sont considérées comme infinies dans le plan, ainsi les champs de déplacement et de contraintes sont négligeables à une grande distance de la charge. Puisque les couches sont assimilées à des poutres en flexion, la fixation du déplacement transversal sera mieux adaptée que celle du déplacement vertical (Nasser, 2016). Le mouvement horizontal et la rotation sont ainsi bloqués dans les deux bords verticaux du modèle (Rashadul Islam et al., 2016).

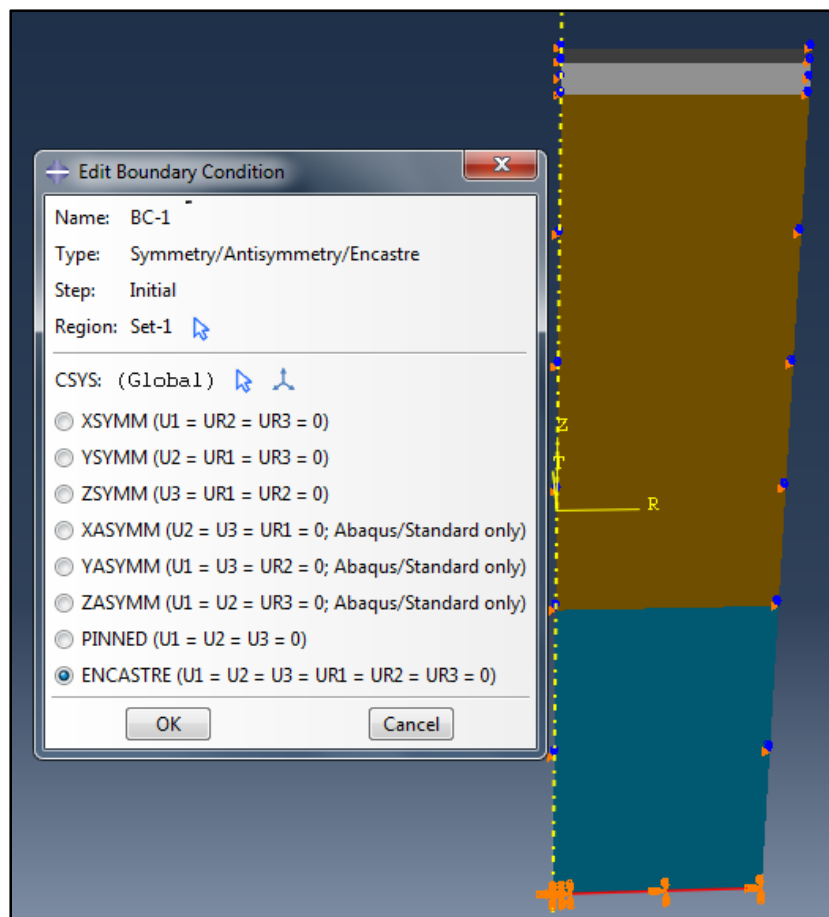


Figure 7.11 Application des conditions aux limites du modèle

Le chargement appliqué consiste en un champ de pression homogène appliqué à la surface de la chaussée. Afin de prédire avec précision la réponse de la chaussée soumise à l'essai FWD, il est nécessaire de suivre le modèle d'amplitude réelle pour appliquer l'impulsion. L'historique de chargement temporel disponible dans la base de données LTPP a été définie en utilisant l'outil « *Amplitude* » dans ABAQUS (Figure 7.12). En effet, une pression de 1 MPa est appliquée sur la zone de chargement puis cette pression est intégrée à une variation temps-amplitude pour correspondre à l'historique du temps de chargement de l'essai FWD (Figure 7.12)

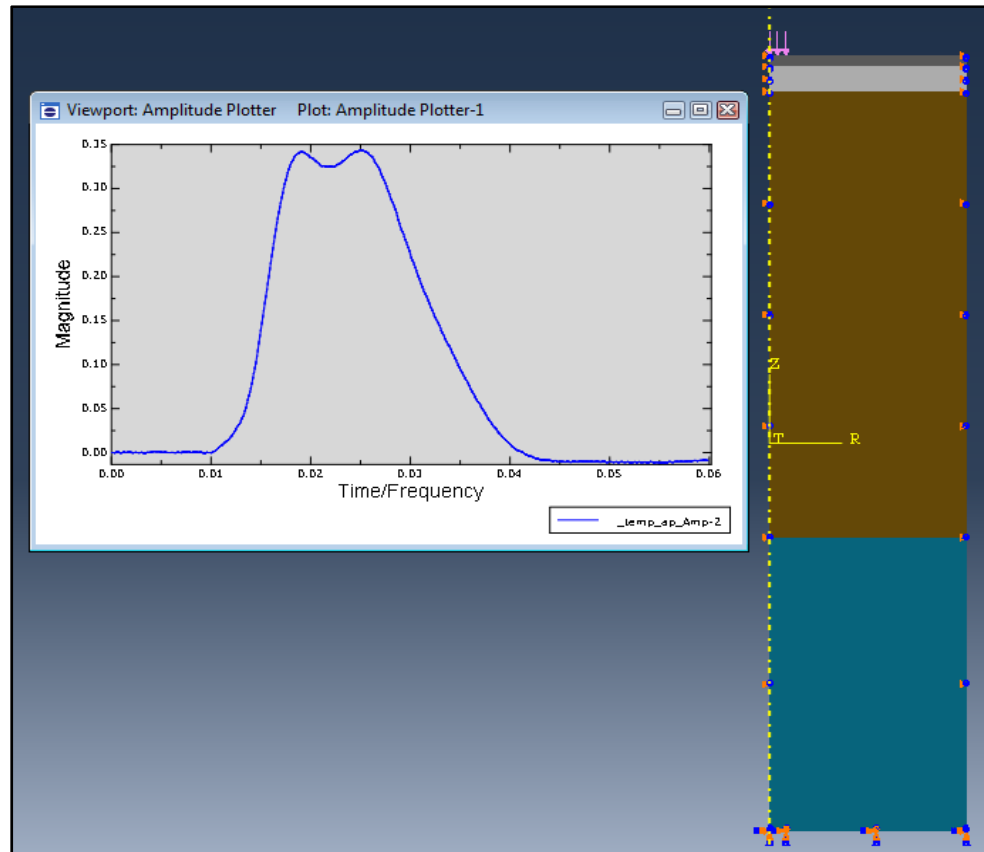


Figure 7.12 Définition du chargement du FWD dans ABAQUS

7.5.4 Maillage

Le logiciel ABAQUS comporte plusieurs types d'éléments pour le maillage des modèles. Pour une meilleure convergence de l'analyse, le modèle a été discrétisé à l'aide des éléments finis de type CAX4R (quadrilatère axisymétrique à 4 nœuds). En ce qui concerne la taille des éléments, le maillage a été raffiné dans la zone sous la charge et les géophones afin de capturer les champs de contrainte et de déplacement avec précision. Des éléments plus grands ont été utilisés dans les zones éloignées du chargement pour diminuer le temps de calcul. Une étude préliminaire du maillage a permis de discrétiser le modèle en 2680 éléments (Figure 7.13). Afin d'étudier l'effet du maillage sur les résultats de l'analyse, une étude paramétrique de l'influence du nombre d'éléments sur la convergence des intensités a été effectuée et est présentée ci-après.

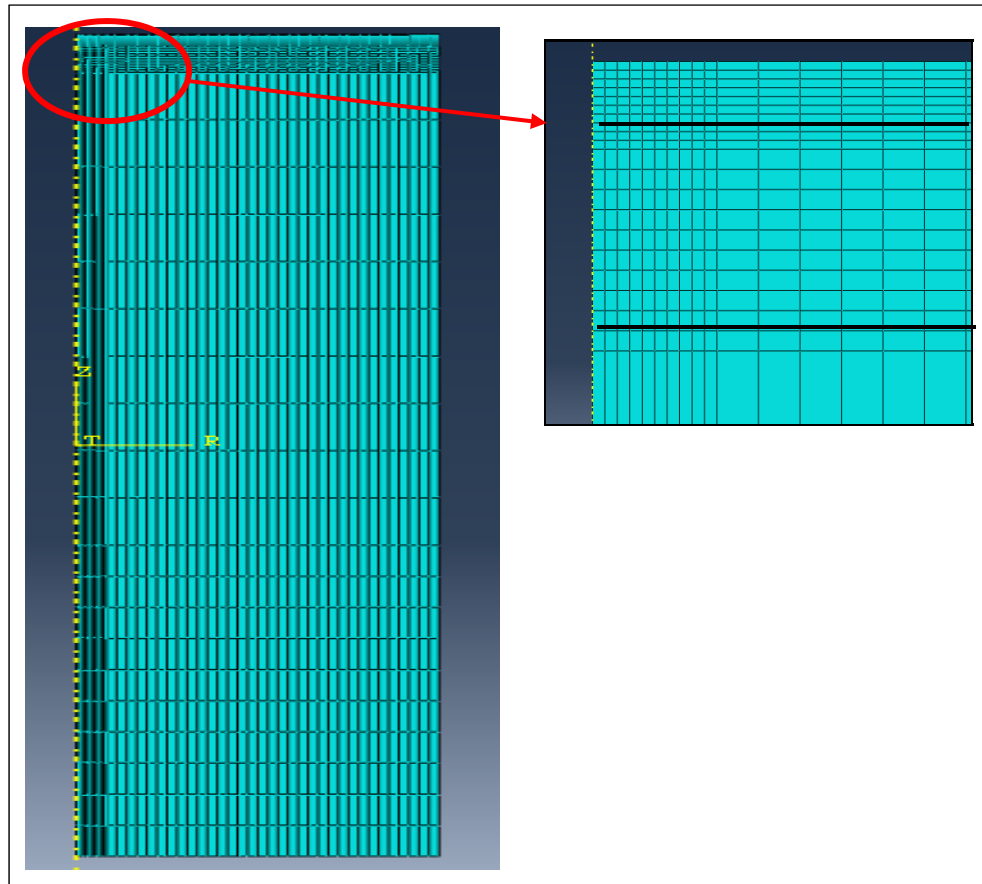


Figure 7.13 Maillage du modèle

7.5.5 Résultats préliminaires

Une fois la structure et le chargement sont modélisés, le calcul a été lancé pour avoir la réponse de la chaussée. La Figure 7.14 présente le champ de déflexions (déplacement vertical U_2) et de déformations transversales maximales dans la structure de chaussée soumise à l'essai FWD. La chaussée a subi une déflexion maximale sous la charge de 0,385 mm. À la base de la couche bitumineuse, on remarque la déformation maximale dans le sens transversal (E_{11}) de 281 μdef . La répétition de ces déformations de tractions génère le phénomène de fatigue des enrobés. Au sommet du sol support, la déformation maximale de compression (E_{22}) est de 200 μdef . La répétition de ces déformations cause l'orniérage dans les chaussées bitumineuses.

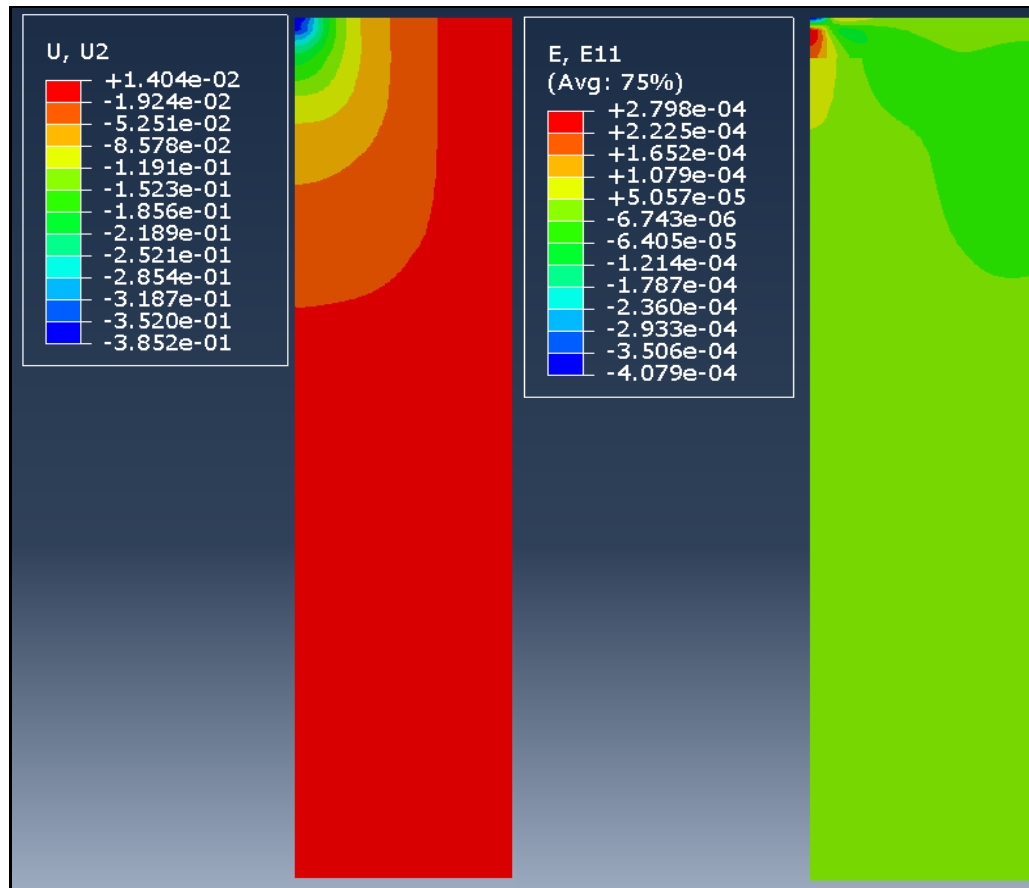


Figure 7.14 Résultats de déflexions (U2) et de déformations horizontales (E11) dans la structure de chaussée

7.6 Analyse paramétrique

Lors de la création du modèle de la structure de chaussée étudiée, des facteurs ont été supposés. Ces facteurs peuvent avoir un effet sur les résultats de l'analyse, à savoir les dimensions du modèle (horizontal et vertical) et la taille des éléments de discrétisation. Une analyse paramétrique a été effectuée afin d'étudier l'impact des dimensions du modèle et du maillage sur la réponse de la chaussée notamment le bassin de déflexions et la déformation de traction à la base de l'enrobé.

7.6.1 Effet de la dimension horizontale du modèle

Le modèle initial a été développé selon l'approche de Duncan et al. (1968), soit de considérer 12 fois le rayon de chargement dans la direction horizontale et 50 fois le rayon dans la direction verticale pour minimiser les effets des bords sur le comportement de la chaussée. Pour étudier l'effet de la dimension horizontale, la hauteur de la chaussée a été fixée à 7600 mm (soit $50 \times R$) et la largeur du modèle a été variée (12R, 15R, 20R et 25R). La Figure 7.15 présente le bassin de déflexions pour différentes largeurs du modèle. On remarque que cette variation n'a pas un effet significatif sur le bassin de déflexions. Cependant, on constate que les bassins de déflexions pour les dimensions 20R et 25R sont approximativement confondus. La Figure 7.16 illustre la variation des déformations de traction à la base de l'enrobé. On remarque aussi une stabilité au niveau des déformations à partir d'une dimension de 20R. Pour tous les modèles de cette étude, on a considéré ainsi une dimension horizontale de 20R.

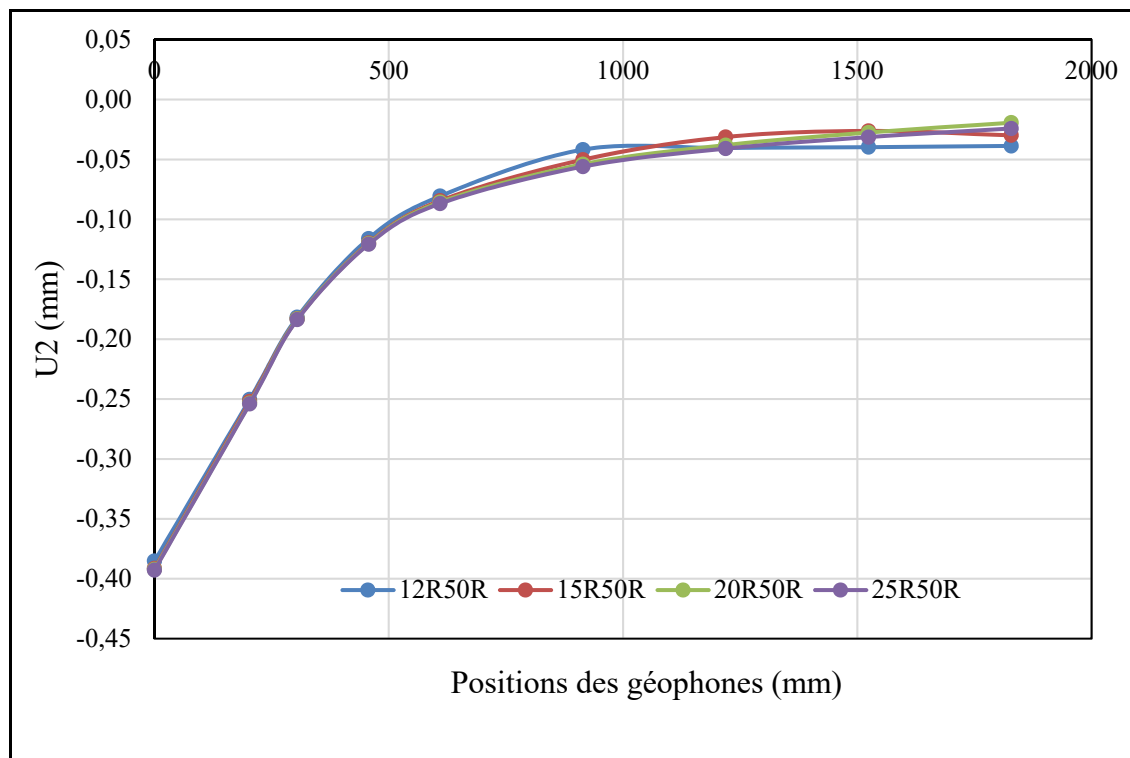


Figure 7.15 Effet de la dimension horizontale du modèle sur le bassin de déflexion (U_2)

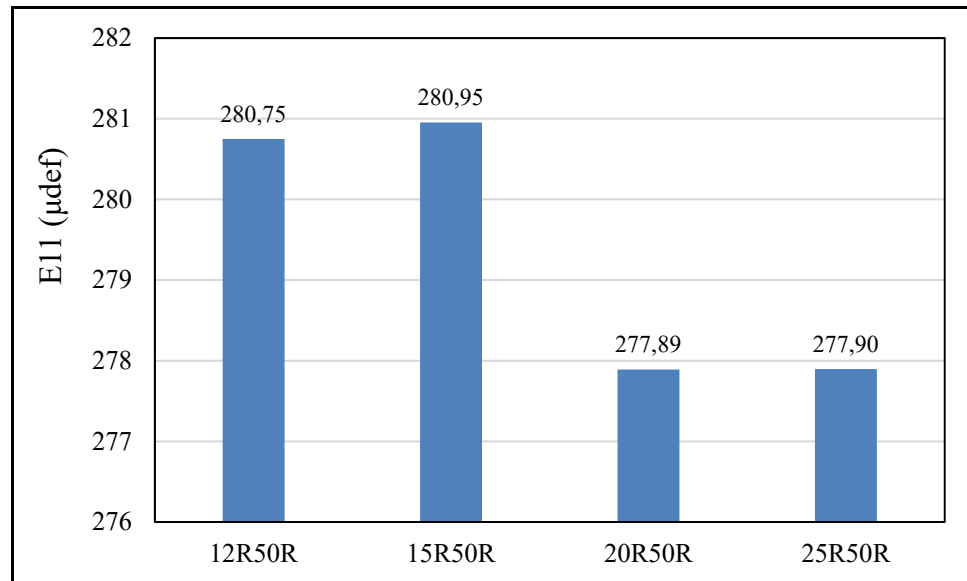


Figure 7.16 Effet de la dimension horizontale du modèle sur la déformation horizontale (E11) à la base de l'enrobé

7.6.2 Effet de la dimension verticale du modèle

La dimension dans le sens horizontal a été fixée à 3040 mm et la hauteur du modèle a été variée pour prédire l'influence de la dimension verticale du modèle sur le comportement de la chaussée. Quatre modèles ont été développés soient de 50R, 55R, 60R et 65R de hauteur. L'effet de cette variation est présenté dans le Tableau 7.2. On constate que le bassin de déflexions et les déformations de traction à la base de l'enrobé deviennent constants à partir d'une dimension verticale de 55R. Cette dernière a été adoptée dans la suite de cette étude.

Tableau 7.2 Variation du bassin de déflexions et la déformation horizontale à la base de l'enrobé en fonction de la dimension verticale du modèle

	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)	D7 (mm)	D8 (mm)	D9 (mm)	E11 (μdef)
20R50R	-0,391	-0,252	-0,183	-0,120	-0,084	-0,050	-0,031	-0,026	-0,030	277,89
20R55R	-0,395	-0,255	-0,184	-0,121	-0,086	-0,054	-0,038	-0,028	-0,028	281,06
20R60R	-0,395	-0,255	-0,184	-0,121	-0,086	-0,054	-0,038	-0,028	-0,019	281,06
20R65R	-0,395	-0,255	-0,184	-0,121	-0,086	-0,054	-0,038	-0,028	-0,019	281,06

7.6.3 Effet du maillage

Afin d'évaluer l'impact du maillage sur le comportement de la chaussée, trois modèles ont été développés ayant les mêmes dimensions (3040 mm X 8360 mm) et discrétisés en 2680, 8040 et 16080 éléments. Le Tableau 7.3 présente le bassin de déflexions et la déformation de traction à la base de l'enrobé pour chaque modèle. Pas d'effet significatif est constaté entre les résultats des modèles discrétisés avec 8040 et 16080 éléments. Le modèle possédant 8040 éléments a été choisi dans cette étude pour minimiser le temps de calcul.

Tableau 7.3 Variation du bassin de déflexions et la déformation horizontale à la base de l'enrobé en fonction du nombre des éléments

	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)	D7 (mm)	D8 (mm)	D9 (mm)	E11 (μdef)
2680 éléments	-0,395	-0,255	-0,184	-0,121	-0,086	-0,054	-0,038	-0,028	-0,028	281,061
8040 éléments	-0,394	-0,257	-0,185	-0,121	-0,086	-0,054	-0,038	-0,028	-0,019	278,528
16080 éléments	-0,394	-0,257	-0,185	-0,121	-0,086	-0,054	-0,038	-0,028	-0,019	277,530

7.7 Validation du modèle

Le modèle numérique a été validé en comparant les déflexions calculées à l'aide du logiciel ABAQUS à celles mesurées sur la chaussée. Les figures 7.17 présente l'historique de déflexion calculé et mesuré sur la chaussée dans le géophone, D1, sous la charge du FWD. On remarque que les valeurs calculées sont assez proches des valeurs expérimentales. La Figure 7.18 illustre la comparaison entre le bassin de déflexions calculé et mesuré. Les résultats sont aussi comparables ceci peut valider l'approche de la méthode des éléments finis pour simuler le comportement des chaussées bitumineuses. Toutefois des différences au niveau des déflexions sont constatées surtout pour les géophones D4, D5, D6 et D7. Cette différence peut être expliquée par plusieurs facteurs comme le comportement des matériaux granulaires et la température. En effet, le comportement de la fondation a été supposé élastique linéaire cependant des études ont montré l'influence du comportement élastique non linéaire du matériau granulaire sur le comportement de la chaussée (Li et al. 2016). L'influence de la température est certainement un des facteurs à considérer aussi. Généralement, la température moyenne est utilisée pour l'analyse des essais FWD. Toutefois, le gradient de température affecte également le comportement de l'enrobé et son impact peut être important sur les résultats. D'autre part, on a supposé dans le modèle de la chaussée que toutes les couches sont supposées collées, ceci peut aussi affecter les résultats et sous-estimer les déflexions générées. L'existence de fissures peut avoir aussi un impact sur la rigidité dans la chaussée et ainsi augmenter les déflexions mesurées.

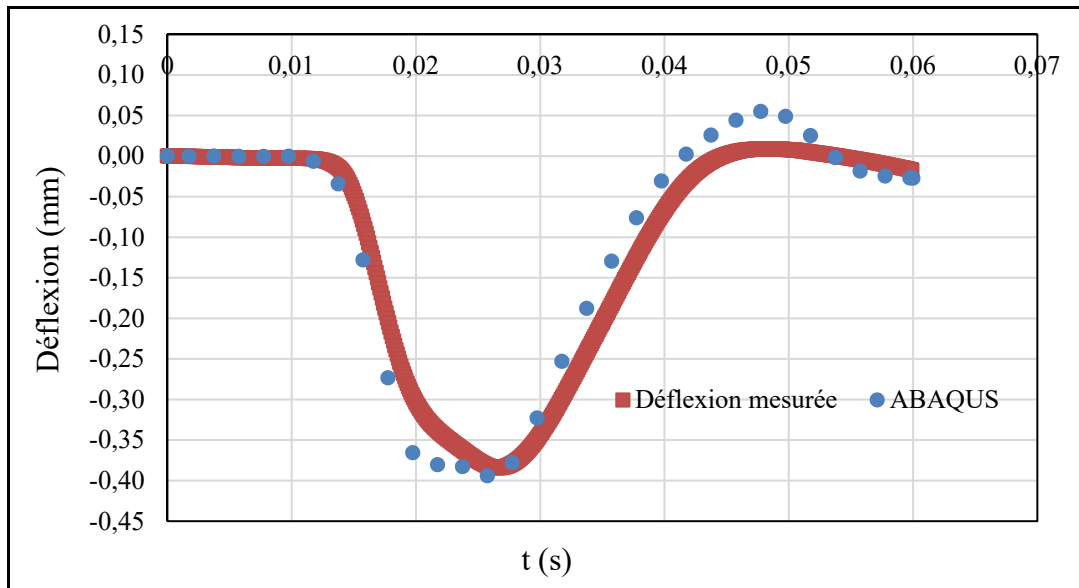


Figure 7.17 Comparaison entre l'historique de déflexion numérique et mesuré dans le géophone situé sous la charge

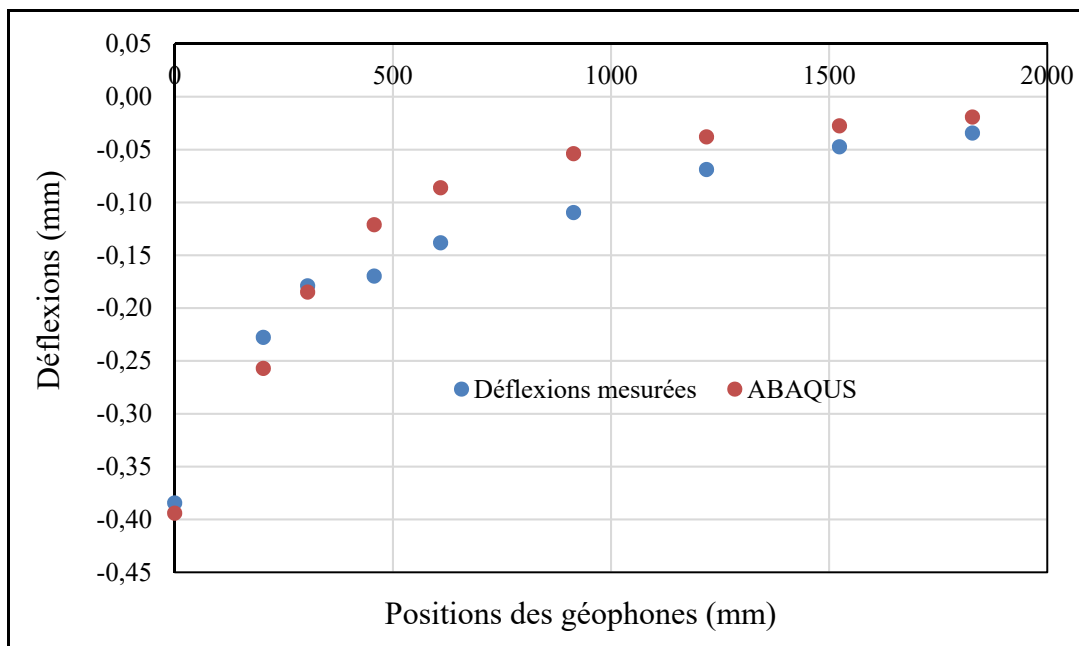


Figure 7.18 Comparaison entre le bassin de déflexion numérique et mesuré

7.8 Comparaison entre les comportements élastique et viscoélastique des enrobés bitumineux

Afin de souligner l'importance de considérer le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux pour analyser les chaussées bitumineuses, le calcul du bassin de déflexions a été effectué pour le cas du revêtement élastique. Le module d'élasticité a été choisi selon la durée d'impulsion du chargement de FWD. La Figure 7.19 compare les bassins de déflexions pour les deux cas élastique et viscoélastique ainsi que celui mesuré. Comparativement au cas élastique, les déflexions du cas viscoélastique sont plus importantes. Ainsi, la rigidité de la chaussée est plus faible lorsque le revêtement est considéré comme viscoélastique. Selon les déflexions mesurées, on peut relever que l'hypothèse du comportement élastique des enrobés bitumineux sous-estime la réponse de la chaussée alors que le comportement viscoélastique montre des résultats plus proches à la réalité.

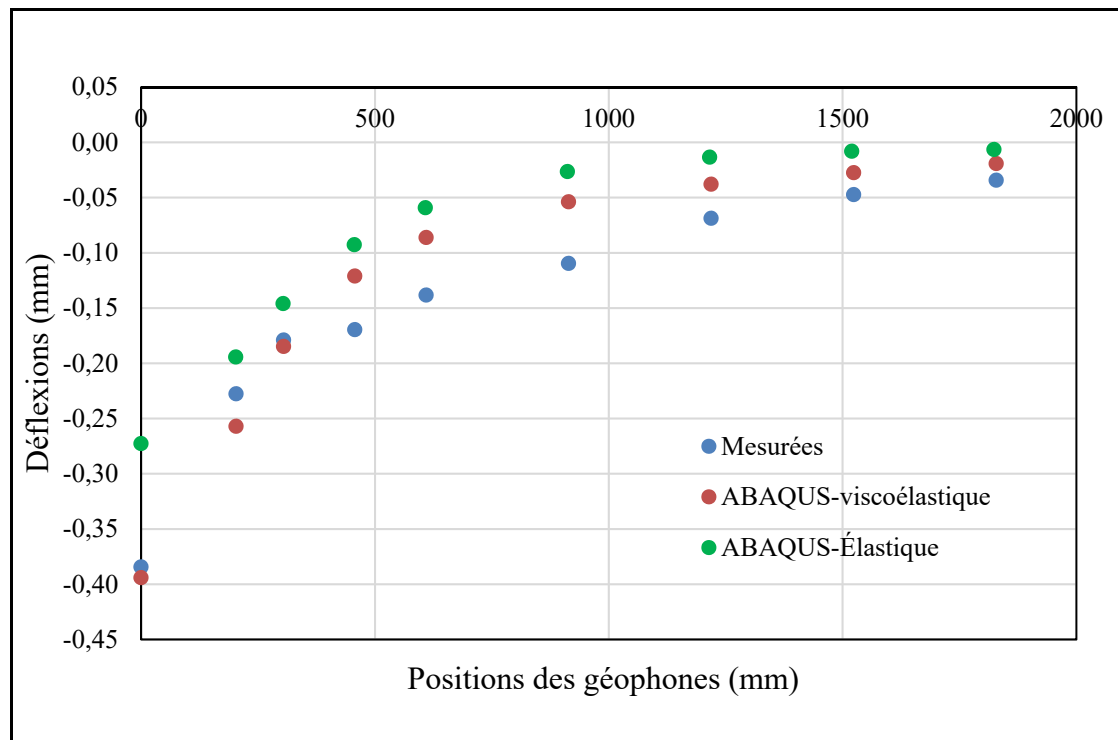


Figure 7.19 Comparaison entre le bassin de déflexion mesuré et calculé avec un comportement élastique et viscoélastique de l'enrobé

7.9 Conclusion

Le développement du modèle en éléments finis de la structure de chaussée présenté dans ce chapitre avait pour premier objectif de comprendre et valider l'approche MEF pour simuler le comportement mécaniste d'une chaussée bitumineuse en utilisant des essais FWD en vraie grandeur. Les étapes de développement du modèle 2D de la structure de chaussée disponible dans LTPP moyennant le logiciel ABAQUS ont été présentées. Le comportement de l'enrobé bitumineux a été défini dans le modèle comme viscoélastique en utilisant le module de relaxation. Une analyse paramétrique a été faite pour évaluer les facteurs pouvant affecter la précision des résultats du modèle.

Les résultats montrent que la MEF permet de prédire la réponse d'une chaussée soumise à un chargement puisque les déflexions numériques et mesurées sont proches. Cependant, en comparant ces déflexions, une faible différence a été observée dans quelques géophones. Cette différence est peut-être due à certains nombres d'hypothèses dans la modélisation, notamment le comportement linéaire des matériaux granulaires, la température moyenne, le collage des couches... Ainsi, il s'avère important d'avoir toutes les informations sur la structure et les propriétés afin d'avoir de meilleurs résultats.

Les calculs réalisés en supposant le comportement élastique de l'enrobé bitumineux ont montré que cette hypothèse sous-estime la réponse de la chaussée présentant ainsi de faibles déflexions. Ces résultats mettent l'accent sur la limite des outils utilisés actuellement pour le dimensionnement des chaussées qui ne tiennent pas compte du comportement viscoélastique des enrobés bitumineux.

Les étapes de modélisation présentées dans ce chapitre seront adaptées dans le chapitre 8 afin de modéliser les structures de chaussées réhabilitées.

CHAPITRE 8

MODÉLISATION ET ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES CHAUSSEES RÉHABILITÉES

8.1 Introduction

Afin de proposer des structures durables et bien entretenir les chaussées réhabilitées, il est nécessaire de comprendre et connaître le processus de dégradation des chaussées réhabilitées dont l'origine est souvent la présence de fissures et le comportement des matériaux utilisés. Actuellement, le dimensionnement des chaussées réhabilitées se base sur des modèles mécaniques trop simplifiés par rapport au problème réel. Ce chapitre présente des modèles en éléments finis qu'on a développé pour prédire les réponses mécaniques des chaussées réhabilitées au Québec par les techniques de retraitement à froid type I et type II. Les modèles sont développés en se basant sur l'approche décrite dans le chapitre 7. L'initiation et la propagation des fissures dans ces structures de chaussées ont été modélisées en utilisant la XFEM et le MZC présentés dans le chapitre 6. L'étude s'est concentrée sur l'évaluation des déflexions, des déformations et des contraintes critiques ainsi que le mécanisme de fissuration dans ces structures.

8.2 Modélisation des chaussées contenant des fissures

La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre les problèmes de mécanique des milieux continus, de mécanique de la rupture et aussi de transferts de chaleur. La MEF a été adoptée dans plusieurs recherches pour modéliser les chaussées afin de répondre aux limites de la théorie d'élasticité linéaire multicouche. Cette dernière est limitée pour prendre en compte le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux, l'existence de discontinuités, le décollement entre couches, etc. Plusieurs recherches se sont concentrées pour modéliser et évaluer le comportement des chaussées dégradées en proposant des modèles qui prennent en compte la loi de comportement viscoélastique des matériaux bitumineux comme le modèle semi-analytique 3D de ViscoRoute. Ce dernier, développé à l'IFSTTAR, permet de modéliser

les structures multicouches non fissurées soumises à des charges roulantes en tenant compte du comportement viscoélastique des enrobés bitumineux (Nasser, 2016). La MEF permet aussi de traiter le caractère tridimensionnel des structures, l'évolution des conditions de contact ainsi que le comportement viscoélastique des matériaux de chaussées sous charges roulantes. De plus, cette approche peut simuler le mécanisme de fissuration dans les structures. Cependant, la modélisation des discontinuités avec la MEF classique représente toujours un défi d'un point de vue numérique. En effet, le maillage doit se conformer avec la géométrie de la discontinuité et doit être raffiné lors de la propagation de la fissure afin de déterminer le champ de contrainte et de déformation autour de la pointe de la fissure. Ceci représente une difficulté majeure lors de traitement des problèmes de discontinuités et il est coûteux d'obtenir des solutions précises avec la MEF classique. Dans ABAQUS, la propagation des fissures est simulée à l'aide de la méthode des éléments finis étendus, présentée dans la partie 1.4.2.2. Avec la XFEM, les éléments coupés par une fissure possèdent des degrés de liberté supplémentaires qui permettent de représenter un champ de déplacement discontinu autour de la fissure. Les éléments peuvent être également enrichis par des fonctions asymptotiques en pointe de fissure afin d'améliorer la précision des calculs. La XFEM ne nécessite pas le remaillage lors de la propagation des fissures. En effet, les fissures peuvent s'initier et se propager en fonction de la distribution des contraintes et des critères de rupture définis sans avoir à définir le chemin de propagation et indépendamment du maillage (Lancaster et al., 2013; Ling et al., 2018; Mahmoud et al., 2014; X. Wang et al., 2018). Ling et al. (2018), ont utilisé la XFEM pour investiguer l'influence des géotextiles sur la propagation des fissures thermiques dans les chaussées traitées en ciment contenant des fissures. Wang et al. (2014), ont modélisé le phénomène de fissuration de haut vers le bas (top-down) dans les chaussées bitumineuses en utilisant la XFEM et le MZC intégrés dans le logiciel ABAQUS. Rashadul Islam et al. (2016) ont investigué la propagation des fissures dans une chaussée réhabilitée par un planage-resurfaçage en enrobés bitumineux à chaud à l'aide de XFEM. Des essais en laboratoire ont été effectués afin de déterminer les propriétés à la rupture nécessaire pour les modèles en éléments finis de la chaussée. Cependant, les matériaux sont supposés avoir un comportement élastique linéaire. X. Wang et al. (2018) ont étudié la remontée des fissures dans les chaussées mixtes soumises à des charges thermiques et mécaniques en utilisant la XFEM. Liu et al. (2019) ont modélisé la propagation

des fissures dans les enrobés bitumineux en utilisant l'essai SCB. Le modèle a été vérifié puis la propagation des fissures dans la chaussée a été prédite en utilisant les éléments cohésifs. Contrairement à la XFEM, cette méthode nécessite la définition du chemin de propagation de la fissure. Jusqu'à présent, il n'existe pas d'études effectuées sur la prédiction du comportement des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement en place en tenant en compte de l'existence des fissures dans les structures dégradées, du comportement viscoélastique et de la résistance à la fissuration des matériaux utilisés.

8.3 Application de la XFEM pour modéliser les chaussées réhabilitées

8.3.1 Définition des structures

Dans cette section, l'exemple de la structure de chaussée dégradée choisie est inspiré des structures de chaussées bitumineuses types au Québec. Il s'agit d'une structure multicouche (Figure 8.1) composée d'un enrobé bitumineux existant de 200 mm d'épaisseur, d'une couche de fondation granulaire en MG20 de 400 mm d'épaisseur reposant sur un sol support (gravier silteux) adaptée de la bibliothèque du logiciel Chaussée 2. Ce dernier est utilisé pour la conception des chaussées bitumineuses au Québec. On suppose que la structure contient une fissure verticale sur la totalité de l'épaisseur de l'enrobé bitumineux, soit une fissure d'une longueur de 200 mm et de largeur de 3 mm. Trois techniques de réhabilitation sont appliquées sur cette chaussée. La première est un planage-resurfaçage où la couche d'enrobé bitumineux est planée sur une profondeur de 50 mm puis une nouvelle couche d'enrobé neuf est mise en place. La deuxième est un retraitement type I où le revêtement bitumineux est fragmenté sur une profondeur de 150 mm, stabilisé et compacté formant une couche de MR7 de 100 mm recouverte d'un enrobé neuf de 50 mm d'épaisseur. Finalement, la structure réhabilitée est par un retraitement type II où l'enrobé est fragmenté sur toute son épaisseur en y incorporant 150 mm de la fondation granulaire (MG20). Le matériau obtenu est retraité et compacté formant une nouvelle couche de base de 300 mm de MR5 recouverte d'un enrobé neuf de 50 mm.

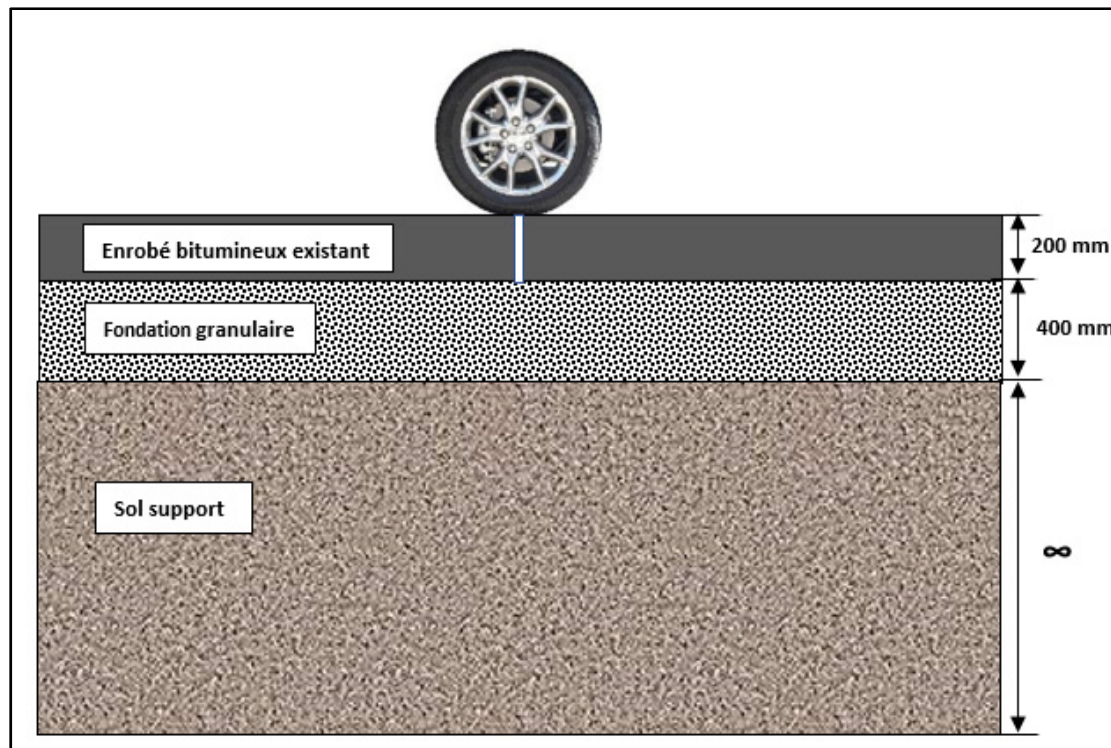


Figure 8.1 Structure de chaussée existante choisie

8.3.2 Propriétés des matériaux

Dans cette étude, les quatre structures de chaussées étudiées reposent sur les mêmes couches sous-jacentes : une fondation granulaire en MG20 et du gravier silteux comme sol support. Ces derniers sont supposés avoir un comportement élastique linéaire isotrope dont les propriétés sont présentées dans le Tableau 8.1. Par ailleurs, les propriétés à la rupture des matériaux sont requises pour simuler le mécanisme de fissuration dans les couches liées. Les paramètres définissant la résistance à la fissuration dans le logiciel ABAQUS tels que la résistance à la traction cohésive (T_{\max}) et l'énergie de rupture cohésive (Γ_c) ont été obtenus à partir des essais en laboratoire effectués lors des études précédentes. Les propriétés de l'enrobé existant ont été adoptés de l'étude de Rashadul Islam et al. (2016) alors que celles de l'enrobé neuf sont obtenues des essais de laboratoire effectués par X. Wang et al. (2018). Le comportement viscoélastique et les propriétés à la fissuration des MR5 et MR7 sont définis selon les résultats

de cette étude présentés dans les chapitres 4 et 6. Le Tableau 8.1 présente les propriétés des matériaux des différentes couches.

Tableau 8.1 Propriétés des matériaux des structures étudiées

Couches	Masse volumique (t/mm ³)	v	E (MPa)	Séries de Prony		T _{max} (MPa)	Γ _c (mJ/mm ²)
Couche de surface	2,30E-09	0,35	8500	NA		2,00	1,50
Enrobé existant	2,20E-09	0,35	7000	NA		0,93	0,45
MR7	2,20E-09	0,35	700	g _i	τ _i	3,95	1,00
				0,0393	1,72E-11		
				0,0820	1,41E-09		
				0,0910	5,88E-08		
				0,1107	1,03E-06		
				0,1241	1,60E-05		
				0,1236	0,0002		
				0,1143	0,0028		
				0,0980	0,0347		
				0,0799	0,5058		
				0,0614	8,8767		
				0,0434	208,09		
				0,0207	15043		
MR5	2,20E-09	0,35	850	0,0728	1,57E-11	1,90	0,30
				0,1099	1,18E-09		
				0,0911	3,63E-08		
				0,0989	5,33E-07		
				0,0989	1,59E-05		
				0,0971	7,84E-05		
				0,0967	0,0009		
				0,0904	0,0121		
				0,0803	0,1644		
				0,0636	2,4434		
				0,0405	46,34		
Fondation granulaire	2,20E-09	0,35	134	NA		NA	NA
Sol support	1,85E-09	0,40	87	NA		NA	NA

8.3.3 Développement des modèles des structures

Afin d'évaluer le comportement de la structure existante et les structures réhabilitées définies précédemment, quatre modèles 2D en éléments finis ont été développés à l'aide du logiciel ABAQUS. Comme mentionné dans le chapitre 7, il existe deux types de modèles 2D dans le logiciel ABAQUS : le modèle 2D en déformation plane et le modèle 2D axisymétrique. Ce dernier ne peut pas être utilisé pour modéliser les discontinuités par la XFEM (Y.-R. Kim et al., 2010). Le modèle 2D en déformation plane a été ainsi adopté dans cette partie. Ce modèle a été appliqué dans plusieurs recherches pour simuler le mécanisme de fissuration dans les chaussées. Pour développer les quatre modèles de structures à étudier, la même démarche décrite dans le chapitre 7 est suivie. Les principales étapes générant les modèles sont les suivantes :

- **Géométrie**

Afin de minimiser les effets des bords sur le comportement des chaussées étudiées et selon l'analyse effectuée dans le chapitre 7, on a développé quatre modèles de dimension 6080 mm dans le sens horizontal et 8360 mm dans le sens vertical. Les épaisseurs des couches sont prises selon les structures définies.

- **Propriétés des matériaux**

Tous les matériaux sont supposés homogènes et isotropes. Les caractéristiques des matériaux sont définies selon le Tableau 8.1 dans le module « *Property* » dans ABAQUS. Le comportement viscoélastique des MR5 et MR7 a été défini avec les séries de Prony tout comme dans le modèle de l'essai SCB décrit dans le chapitre 6. Les propriétés à la rupture des MR5 et MR7 tels que la résistance à la traction cohésive (T_{\max}) et l'énergie de rupture cohésive (Γ_c) déterminées à partir de la calibration du modèle de SCB sont définies dans les modèles des chaussées à l'aide de l'outil illustré dans la Figure 8.2. T_{\max} représente le paramètre « *Max principal stress* » et Γ_c définit le paramètre « *Damage evolution* ».

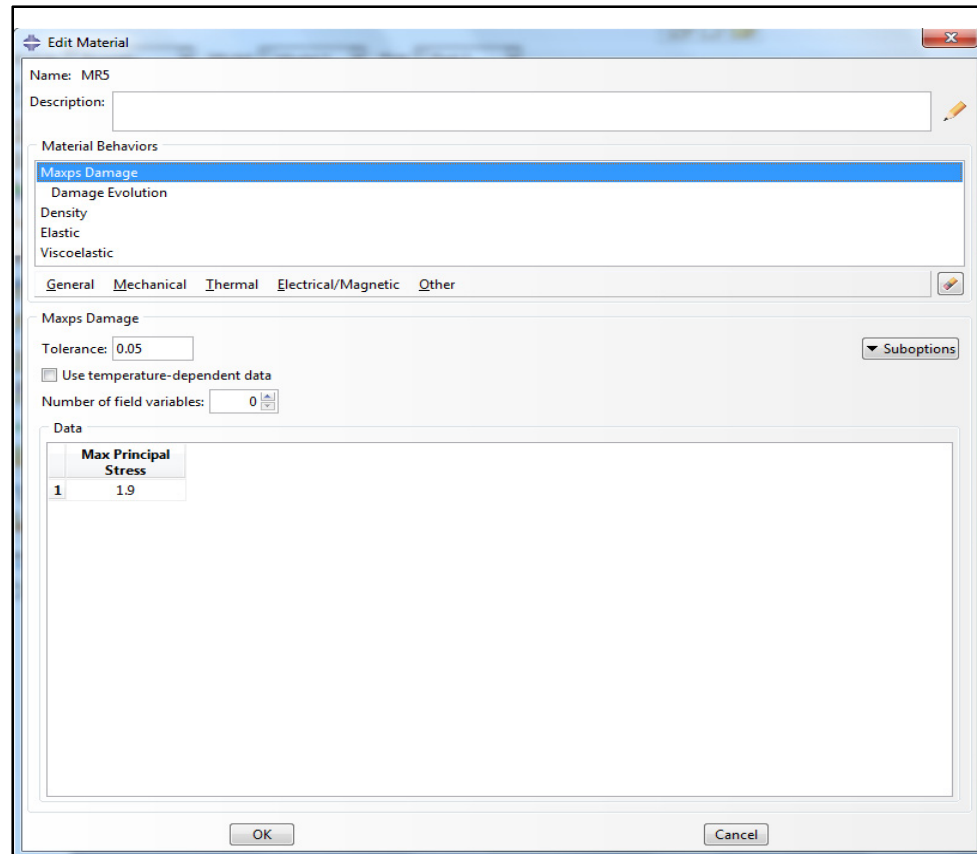


Figure 8.2 Définition des propriétés des matériaux dans ABAQUS

- **Conditions aux limites et chargement**

Tel que défini dans le modèle présenté dans le chapitre 7 quant aux conditions aux limites, les translations et les rotations sont empêchées dans toutes les directions pour fixer la base du sol support. Les mouvements horizontaux et les rotations sont empêchés aux limites verticales du maillage. Les structures ont été soumises au chargement simulant l'essai FWD afin d'évaluer leurs comportements et prédire les zones de sollicitations critiques dans les chaussées réhabilitées.

- **Modélisation de la propagation des fissures par la XFEM**

La modélisation du mécanisme de fissuration dans les structures de chaussée a été réalisée en suivant la même démarche adaptée pour le modèle de l'essai SCB (Chapitre 6). Comme il a été mentionné précédemment, la XFEM permet de simuler l'initiation et la propagation des

fissures sans avoir à définir le chemin de propagation ou remailler le modèle. La fissure peut s'initier et se propager en fonction de la distribution des contraintes et des propriétés à la rupture des matériaux. En effet, la fissure s'initie dans la chaussée une fois que la contrainte de traction dépasse T_{\max} , et celle-ci se propage lorsque l'énergie dans les éléments dépasse Γ_c . La Figure 8.3 présente l'outil permettant de définir la fissure de type XFEM dans le modèle pour les couches liées. Les modèles des différentes structures étudiées dans cette thèse sont présentés dans les Figures 8.4 à 8.6.

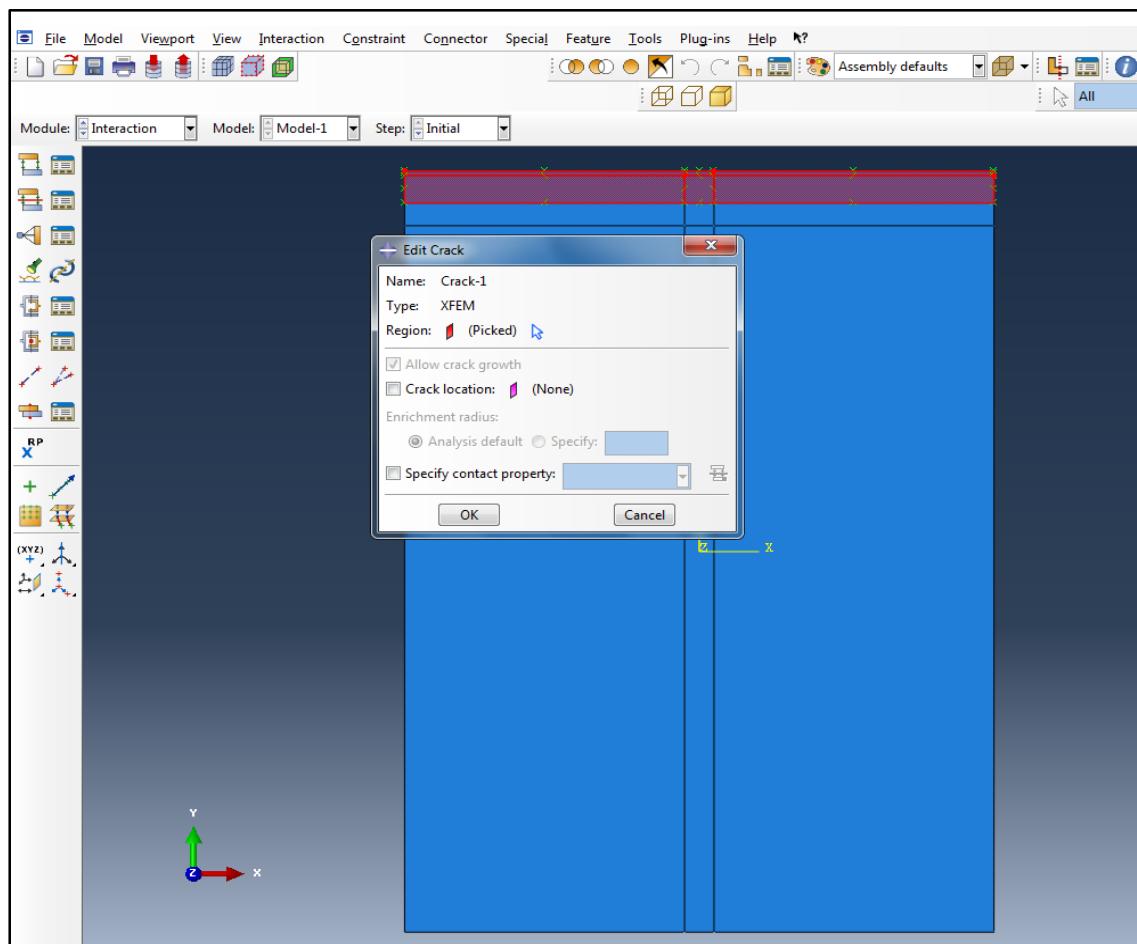


Figure 8.3 Définition de la fissure de type XFEM dans ABAQUS

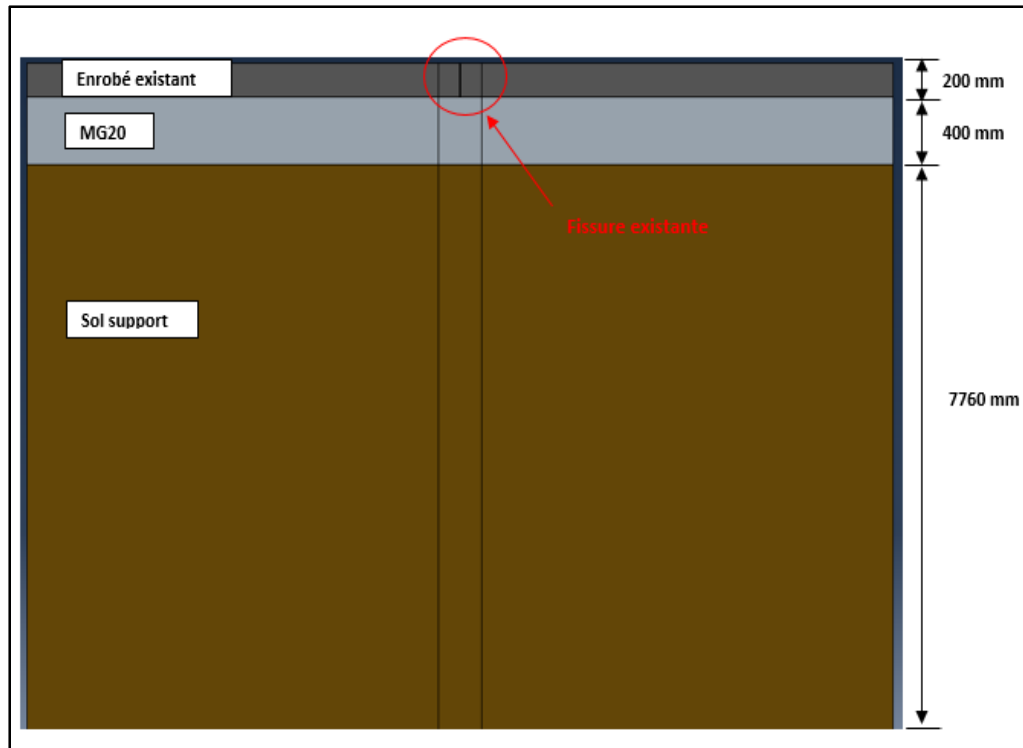


Figure 8.4 Structure existante



Figure 8.5 Structure réhabilitée par un planage-resurfaçage

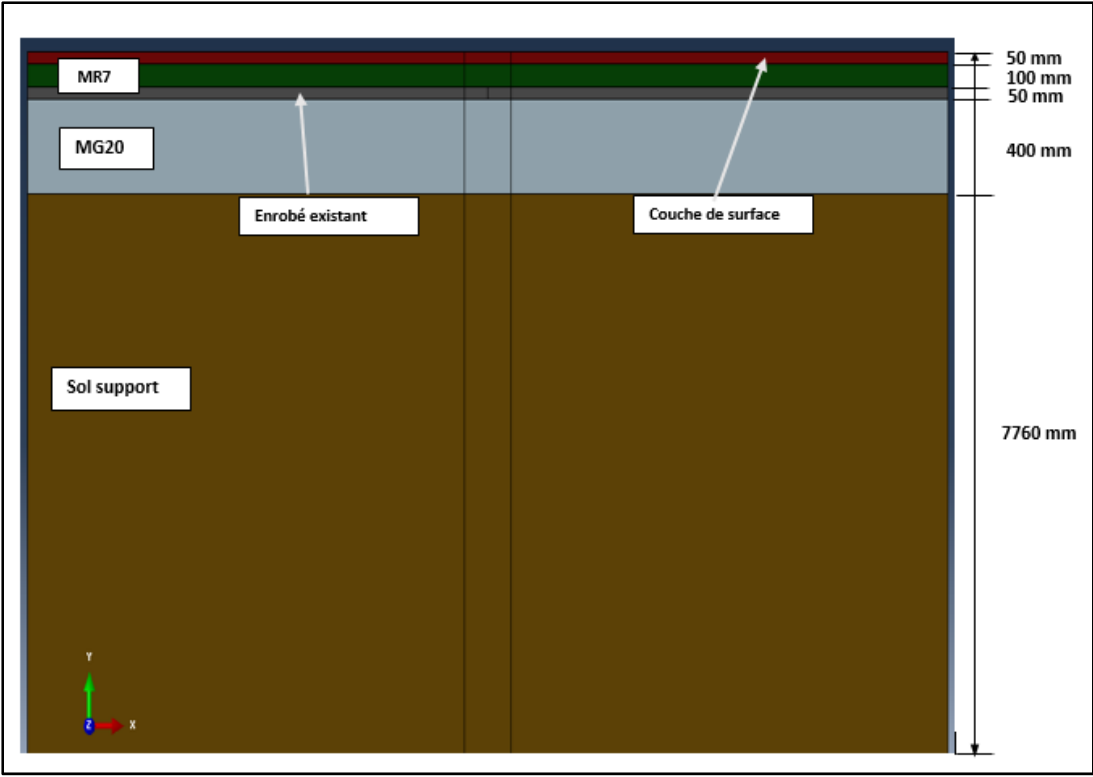


Figure 8.6 Structure réhabilitée par un retraitement type I

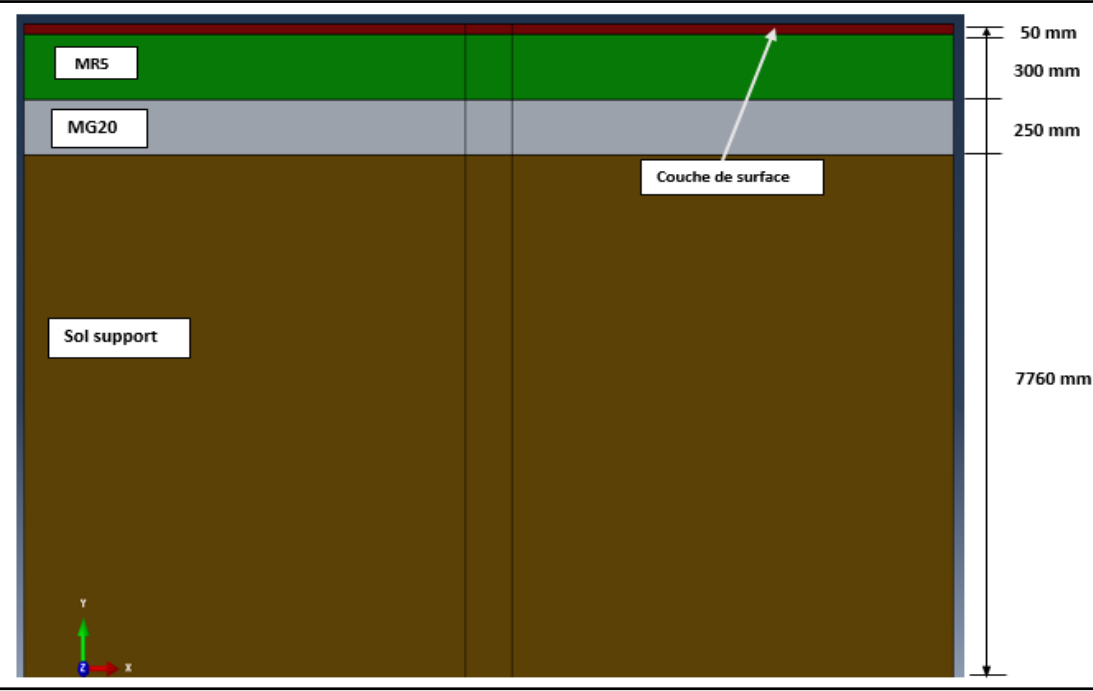


Figure 8.7 Structure réhabilitée par un retraitement type II

- **Maillage**

Les modèles ont été discrétisés à l'aide des éléments de type CPE4R (*4-node bilinear plain strain elements with reduced integration*) compatible avec la XFEM. En général, l'analyse des problèmes de rupture avec le FEM nécessite des maillages extrêmement raffinés à la pointe de fissure. Des éléments de 1 mm² ont été utilisés sous la charge et dans la zone de fissuration et un maillage plus grossier a été adopté en dehors de cette zone pour réduire le nombre des éléments et le temps de calcul. La Figure 8.8 montre le maillage adapté dans le modèle de la technique de retraitement type I.

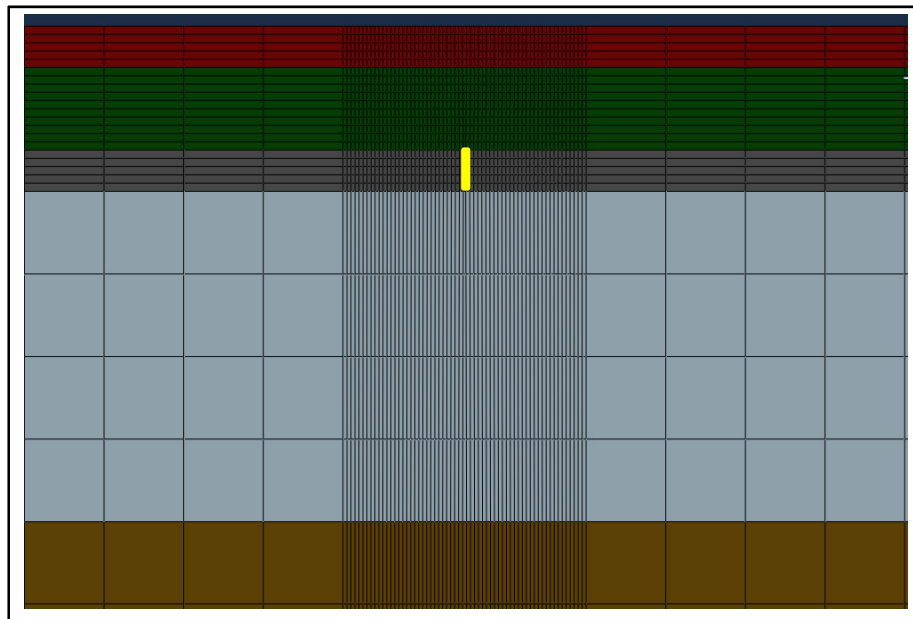


Figure 8.8 Maillage du modèle du retraitement type I

8.4 Comportement de la structure existante et des chaussées réhabilitées

Afin d'évaluer le comportement des structures de chaussées étudiées, le chargement de l'essai FWD, décrit dans le chapitre 7, a été appliqué. Une fois ces calculs réalisés, il a été possible d'établir le comportement théorique de ces structures à partir d'une analyse des résultats. On a choisi d'extraire les champs de sollicitations critiques générées dans les différentes structures, notamment les contraintes, les déformations et les déflexions.

8.4.1 Contraintes critiques

Les résultats montrent que les sollicitations critiques sont distribuées sous la zone de chargement. La Figure 8.9 illustre le champ de contraintes horizontales maximales, S_{11} , dans la structure existante, la structure réhabilitée par planage-resurfaçage, par retraitement type I et retraitement type II (les figures ne sont pas à la même échelle). Des contraintes de compression (de signe négatif) sont observées à la surface des structures alors que les contraintes de traction sont prédites à la base des couches. Pour la structure existante, la concentration des contraintes de traction est à la base de la couche d'enrobé existant (Figure 8.9-a). La contrainte maximale, de valeur 1,8 MPa, est observée à la base de la couche existante autour de la zone fissure. On remarque la même réponse de la chaussée réhabilitée par planage-resurfaçage, où la contrainte maximale est envisagée autour de la base de la fissure existante mais avec une valeur moins élevée soit de 1,4 MPa (Figure 8.9-b). Cette concentration de contrainte pourrait être expliquée par l'existence de la fissure et la faible résistance à la fissuration de l'enrobé existant. Les contraintes de traction vont contribuer à l'initiation de nouvelles fissures qui seront ainsi générées proche de la zone de la fissure existante pour la structure dégradée et le planage-resurfaçage.

La Figure 8.9-c illustre le champ de contrainte critique dans la structure réhabilitée par retraitement type I. Une valeur maximale de S_{11} de 6,4 MPa est observée à la pointe de la fissure existante. Ainsi, cette structure est plus sensible au phénomène de remontée de fissure qu'à l'apparition des nouvelles fissures à la base de l'enrobé existant. Comparativement à la structure existante et au planage-resurfaçage, le retraitement type I présente des contraintes de traction maximales plus importantes, ceci peut être due aux hypothèses du comportement élastique de l'enrobé existant et au collage des couches liées. En effet, la couche de MR7 a un comportement viscoélastique de faible rigidité ceci peut créer des contraintes importantes à la base de la couche.

Le champ de contraintes pour le retraitement type II est présenté dans la Figure 8.9-d. Une valeur maximale de S_{11} de valeur 1,2 MPa est aperçue à la base de la couche de MR7. Ainsi,

pour un retraitement type II, les fissures vont s'initier à la base de la couche de MR7. On remarque que la réponse de cette structure est comparable à une structure neuve, mais avec des matériaux moins rigides et de faibles résistances à la fissuration.

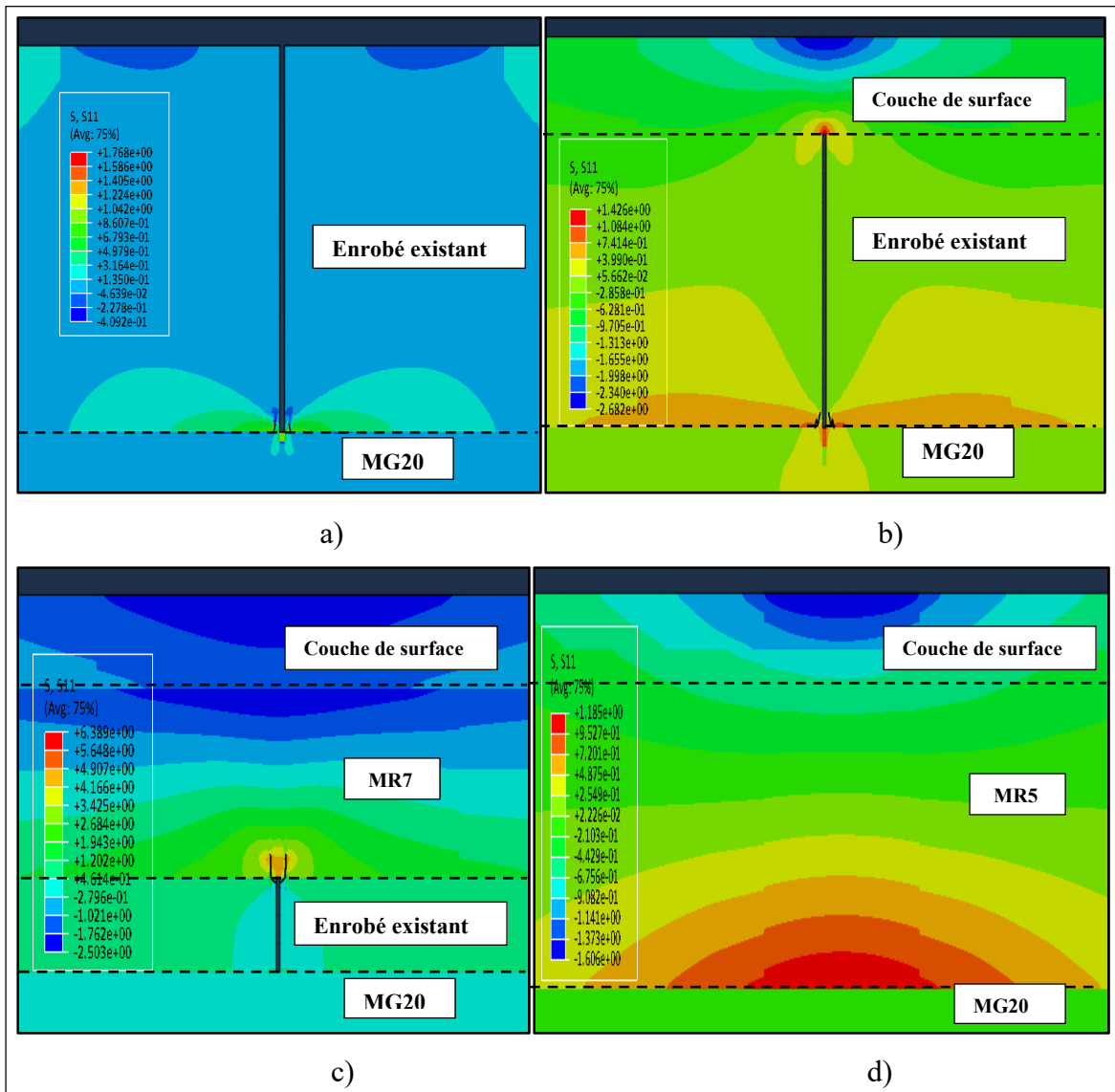


Figure 8.9 Distribution des contraintes de traction dans les structures étudiées
a) structure existante b) Planage-resurfage c) Retraitement type I d) Retraitement type II

8.4.2 Déformations critiques

Les résultats de déformations générées dans les différentes structures étudiées ont montré que les déformations critiques sont observées à la base de l'enrobé existant pour les chaussées contenant une fissure et à la base de la couche de MR5 pour le retraitement type II. La Figure 8.10 présente les déformations critiques calculées pour les structures étudiées. De faibles déformations sont prédites pour les techniques de retraitement cependant des valeurs élevées sont observées pour la structure existante et le planage-resurfaçage. Ces différences importantes au niveau des déformations pour ces dernières sont peut-être dues au grand déplacement transmis à la base de l'enrobé existant. Les structures des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement vont probablement mieux distribuer les charges et ainsi diminuer la transmission des efforts aux couches inférieures.

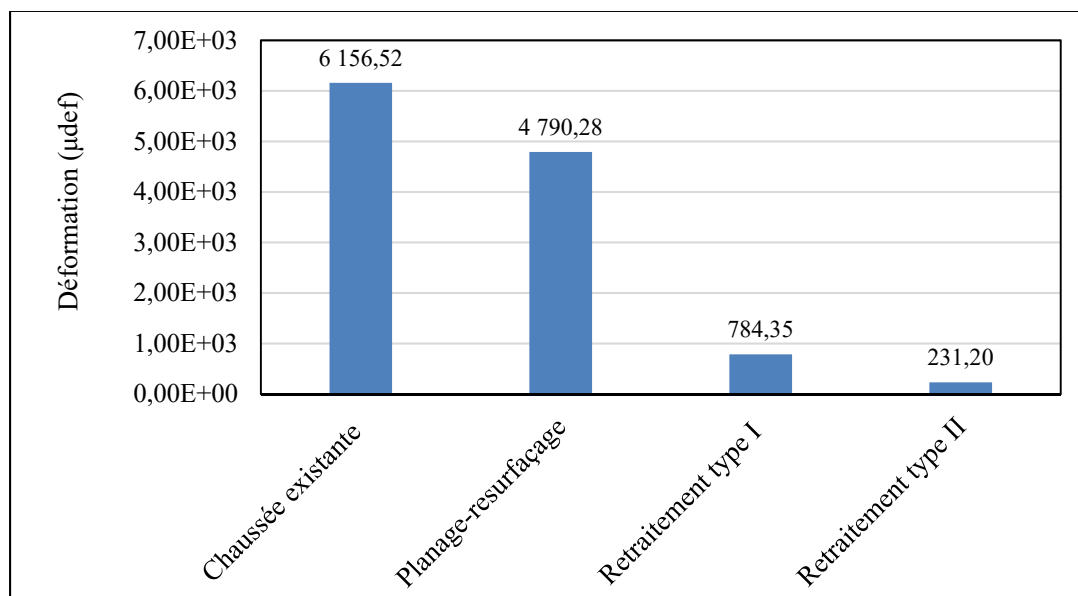


Figure 8.10 Déformations critiques dans les structures étudiées

8.4.3 Déflexions à la surface des structures

Les historiques de déflexions calculées à la surface de la structure existante et des structures réhabilitées par un planage-resurfaçage et retraitement de type I et de type II sont illustrés dans la Figure 8.11. Les déflexions critiques sont localisées sous le centre de la charge appliquée. Les résultats montrent que la déflexion est maximale pour la chaussée existante d'une valeur de 1,8 mm et minimale pour la structure réhabilitée par un retraitement type II avec une valeur de 1,1 mm. Ces résultats montrent la bonne performance des techniques de retraitement.

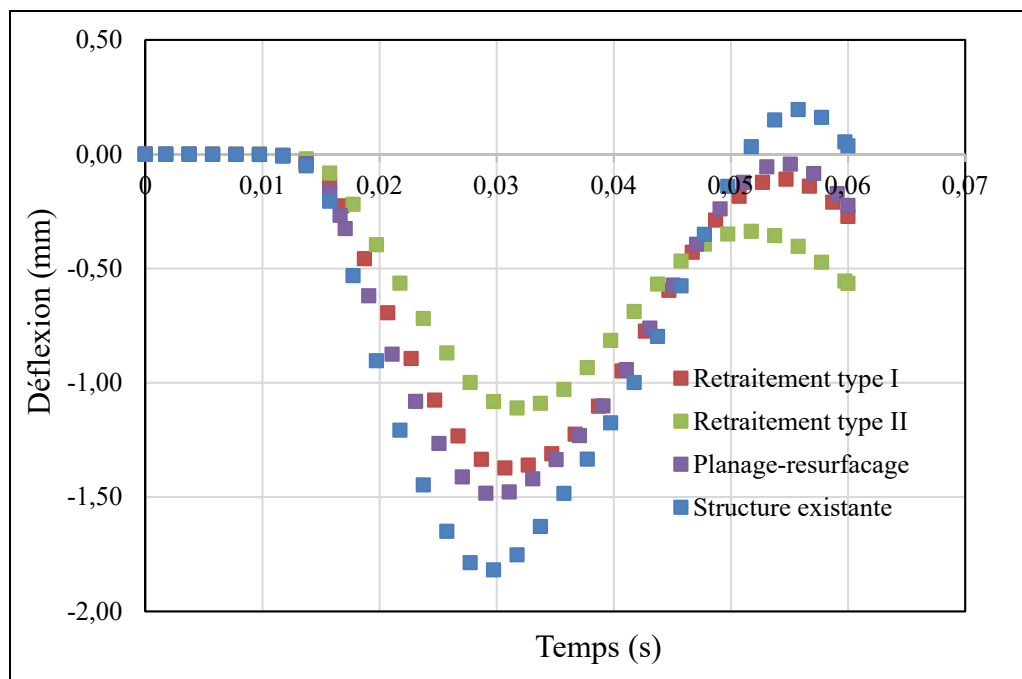


Figure 8.11 Déflexions à la surface des structures modélisées

8.5 Évaluation de la fissuration des techniques de retraitement type I et II à la fissuration

Cette partie consiste à évaluer l'initiation et la propagation des fissures dans les chaussées réhabilitées par retraitement type I et type II. Pour ce faire, les structures modélisées ont été soumises au chargement semblable à celui effectué en laboratoire, soit un déplacement de 0,5

mm/min. Le même déplacement monotone a été appliqué sur les deux chaussées jusqu'à l'apparition des fissures dans les structures étudiées.

8.5.1 Retraitement type I

Tel qu'évalué précédemment pour la technique de retraitement type I, la concentration de contrainte de traction est prédite autour de la pointe de la fissure. La Figure 8.12 montre l'initiation des fissures dans les éléments au sommet de l'enrobé existant. En effet, la contrainte de traction dans l'enrobé existant est de 1,5 MPa, dépasse la résistance à la traction cohésive de 0,93 MPa (Tableau 8.1) initiant ainsi le mécanisme de fissuration. À la Figure 8.13, des contraintes à la pointe de la fissure, soit dans les éléments de la base de la couche de MR7, de 4,92 sont observées. Or, la résistance à la traction cohésive pour les MR7 est de 3,95 MPa (Tableau 8.1), par conséquent le critère de rupture est dépassé et ces éléments sont endommagés.

Comme mentionnée dans le chapitre 6, ABAQUS définit l'état des éléments endommagés en utilisant une variable d'endommagement appelée STATUSXFEM, qui évolue de 0 à 1. Si cette variable égale à 1, l'élément est complètement fissuré alors qu'une valeur située entre 0 et 1 correspond à un élément partiellement fissuré. La longueur des éléments avec des valeurs STATUSXFEM inférieure à 1 est définie comme la longueur des microfissures, et est utilisée pour indiquer le potentiel de propagation des fissures (H. Wang & Wang, 2014). La Figure 8.14 présente la variation de STATUSXFEM au voisinage de la fissure dans la structure de retraitement type I. Afin de générer la remontée de la fissure, la structure a été soumise à un déplacement de 15 mm. On remarque que les microfissures sont remontées de 46 mm, cependant il n'y a pas d'éléments totalement fissurés, car le critère de propagation de fissure n'est pas atteint, autrement dit l'énergie dans les éléments est inférieure à l'énergie de rupture cohésive.

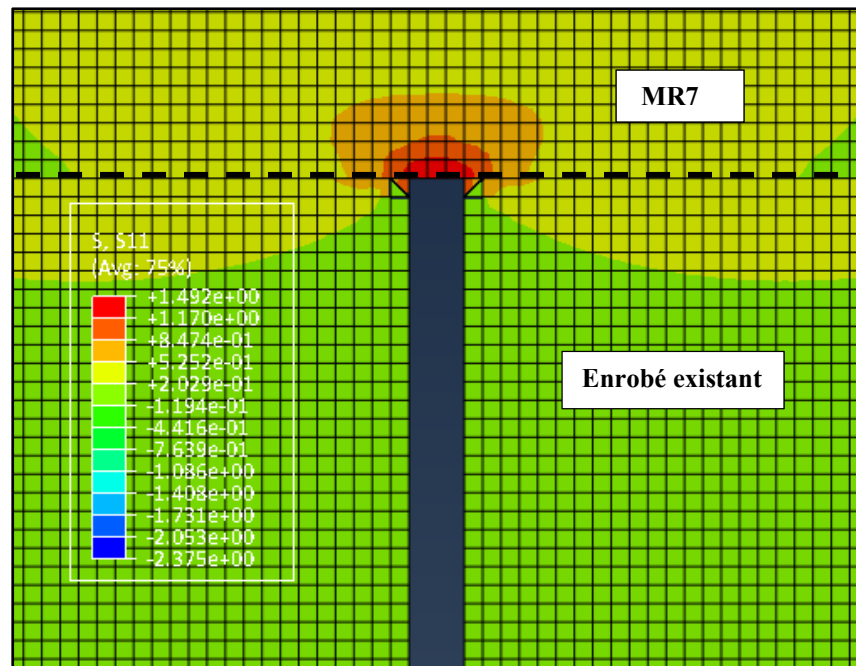


Figure 8.12 Initiation de la fissure dans les éléments de l'enrobé existant

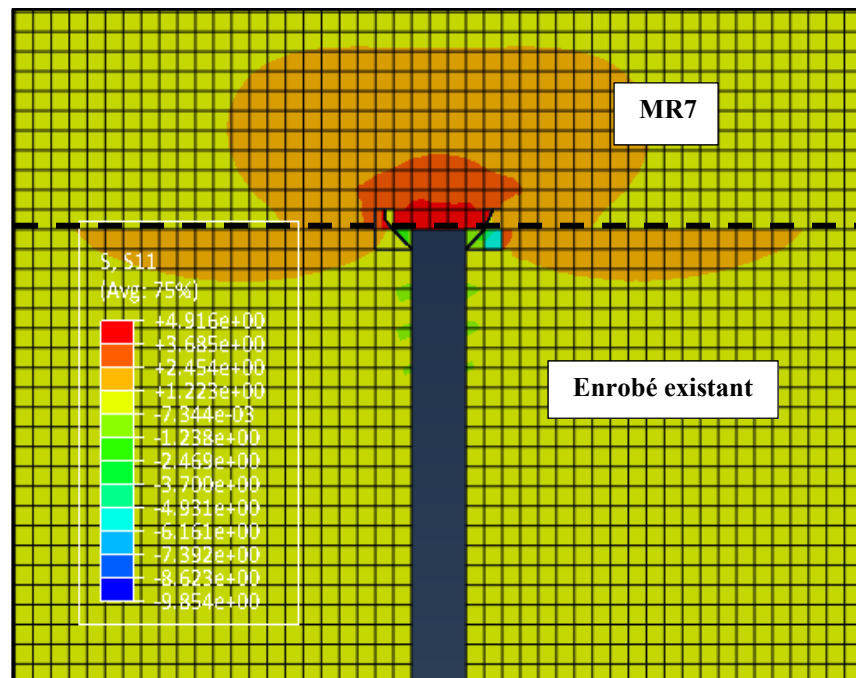


Figure 8.13 Propagation des fissures aux éléments de la base de la couche MR7

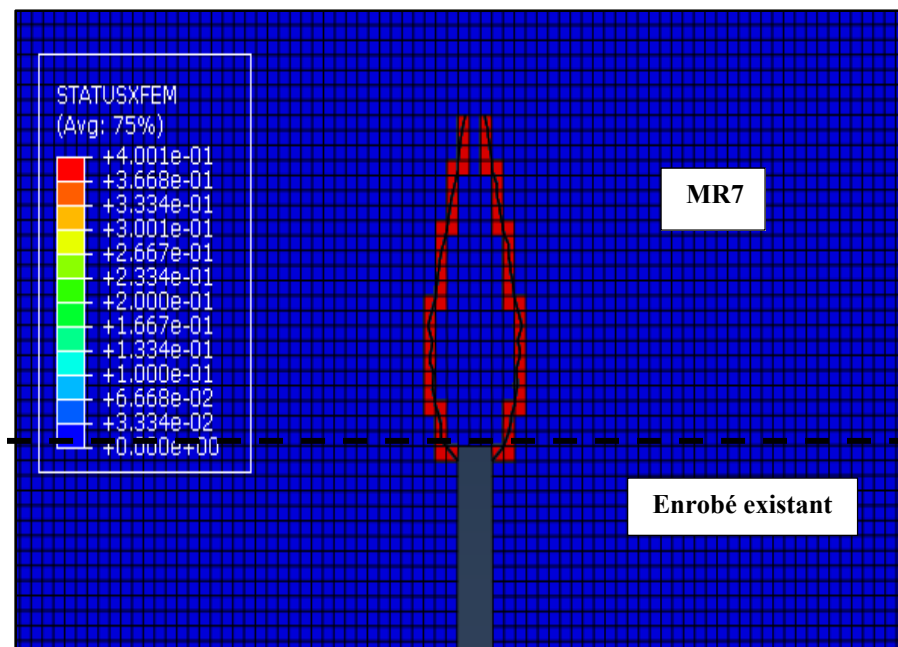


Figure 8.14 STATUXFEM des éléments endommagés

8.5.2 Retraitement type II

La structure de retraitement type II a été soumise au même chargement afin d'évaluer l'initiation et la propagation des fissures. Tel que prédit sous l'essai FWD, les contraintes de traction se concentrent à la base de la couche de MR5 où les fissures vont s'apparaitre. La Figure 8.15 montre l'apparition des microfissures à la base de MR5 puisque les contraintes S11 sont supérieures à la traction cohésive pour les MR5 (1,9 MPa). La variation du STATUXFEM est illustrée dans la Figure 8.16. Sous un déplacement imposé de 15 mm, on observe des éléments totalement fissurés (STATUXFEM égale à 1), autrement dit l'énergie dans ces éléments est supérieure à l'énergie de rupture cohésive. Comparativement à la structure de retraitement type I, il existe des éléments totalement fissurés dans cette structure puisque les MR5 possèdent une faible résistance à la fissuration par rapport aux MR7. Ces résultats révèlent que l'existence d'une fissure initiale dans la structure affecte la performance de la chaussée, cependant il est très important de considérer aussi l'effet des propriétés des matériaux recyclés à la fissuration sur la performance de la chaussée.

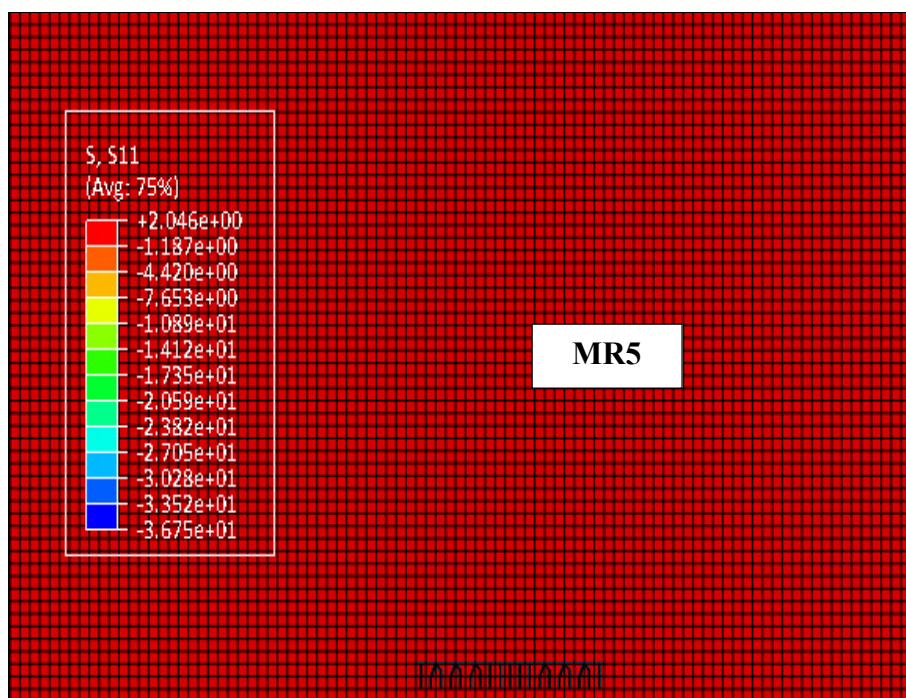


Figure 8.15 Initiation de la fissuration à la base de la couche MR5

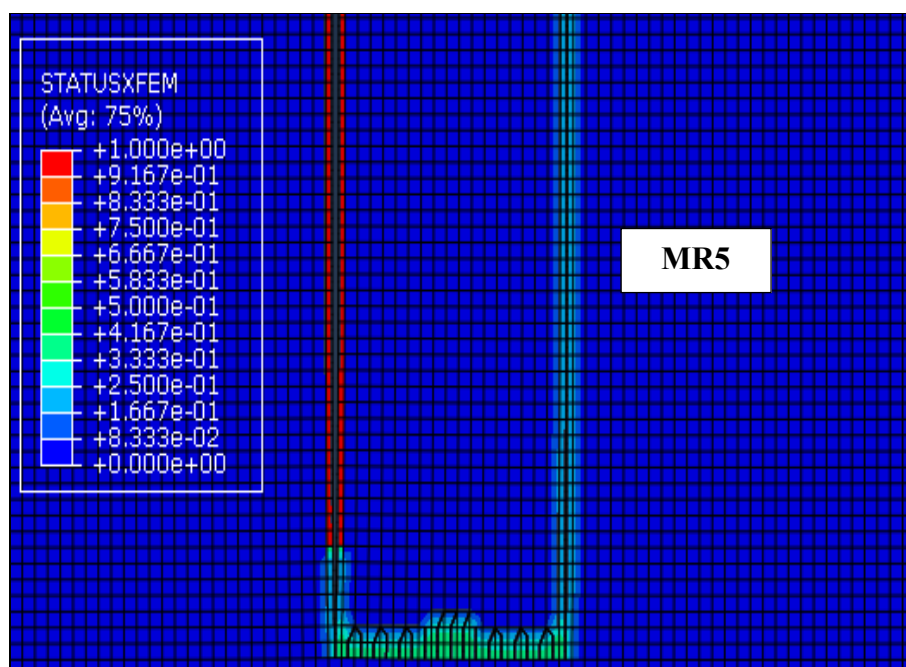


Figure 8.16 STATUXFEM des éléments endommagés

8.6 Comportement des structures réhabilitées sous charges répétées

Cette partie consiste à prédire le comportement des structures réhabilitées par retraitement de type I et de type II au passage répété de trafic. Au Québec, un essieu simple standard a un poids de 80 kN avec une pression 587 kPa pour les pneus et une charge de 20 kN par roue. Pour simuler le passage répété d'une roue, une fonction triangulaire avec une valeur maximale de pression 587 kPa a été appliquée sur une distance de 208 mm (soit le diamètre de la roue). Dans cette étude, on a appliqué 10000 répétitions aux structures étudiées.

La Figure 8.17 montre la variation de la contrainte de traction à la pointe de la fissure existante dans la structure du retraitement type I en fonction du nombre de répétition de la charge. Une contrainte maximale est observée dès les premiers passages de la roue (4,6 MPa). Cependant la variation de cette contrainte est non significative au cours du temps, tel que montré à la Figure 8.18 où dans la zone susceptible à la fissuration les éléments ne sont pas totalement endommagés ($STATUSXFEM < 1$).

En vue de l'évaluation de la performance à la fatigue de la couche de surface de la chaussée réhabilitée par retraitement type I, l'évolution des déformations horizontales de traction à la base de cette couche est mise en évidence (Figure 8.19). Une valeur de 10 μ def a été observée après 10000 répétitions.

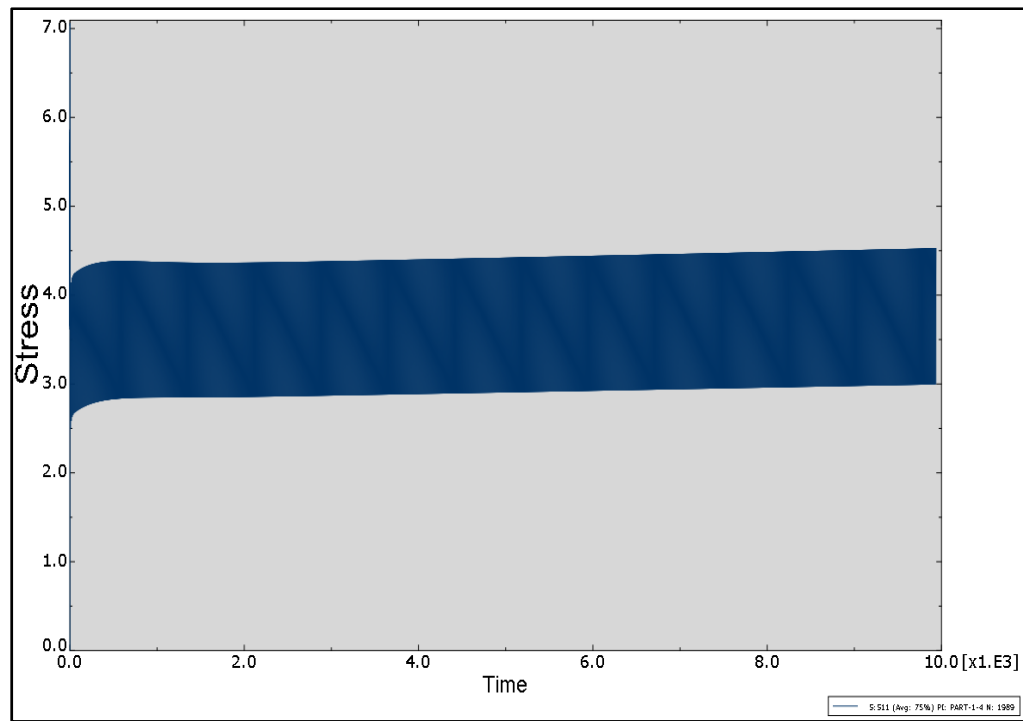


Figure 8.17 Contrainte de traction à la pointe de la fissure existante

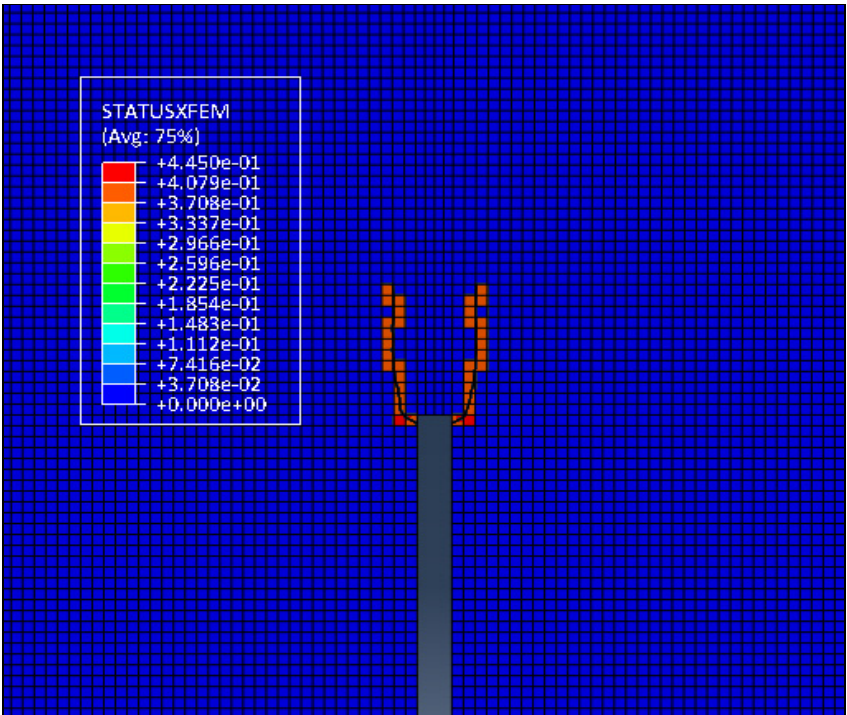


Figure 8.18 STATUSXFEM dans le retraitement type I soumis à 10000 répétitions

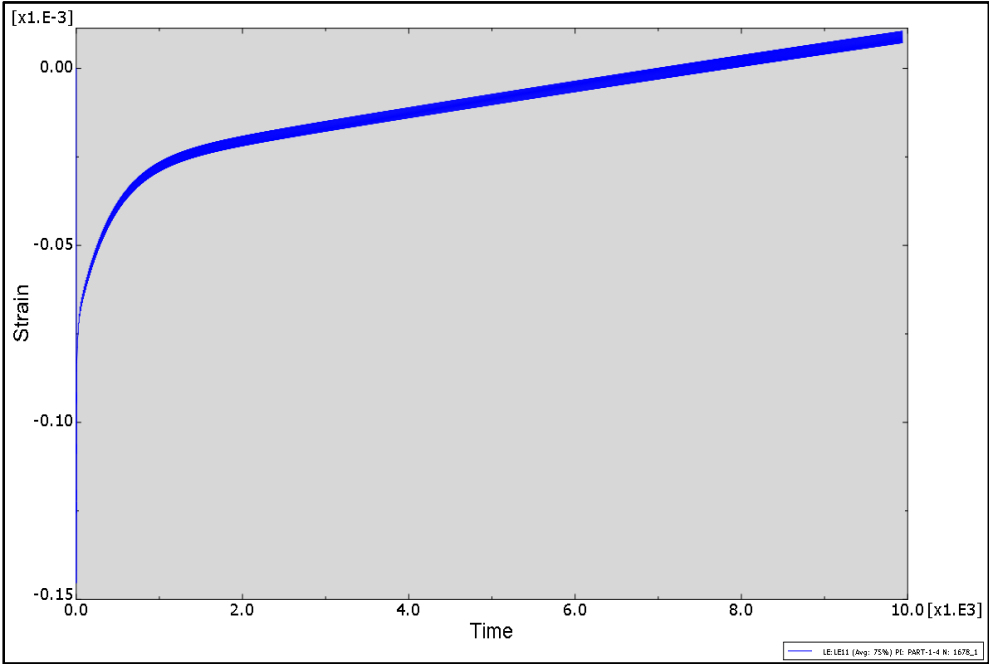


Figure 8.19 Déformation horizontale à la base de la couche de surface

Les Figures 8.20 à 8.23 présentent les résultats de contraintes et de déformations pour la structure du retraitement type II générées après l'application des charges répétées. Après l'application de 10000 répétitions, la contrainte de traction à la base de la couche de MR5 reste constante à 0,55 MPa (Figure 8.20), soit une valeur inférieure à la contrainte de traction cohésive de MR5. Ceci explique la valeur 0 de STATUSXFEM dans la couche de MR5 montré dans la Figure 8.21.

Quant au comportement à la fatigue des couches de surface et de MR5, on observe une déformation de traction de 50 μdef à la base de l'enrobé (Figure 8.22) et de 34 μdef à la base de MR5 (Figure 8.23) sous l'application de 10000 répétitions de charges. Les résultats montrent ainsi que la couche de surface se fatigue plus que la couche de base. En comparaison au retraitement type I, la couche de surface dans le retraitement type II est moins performante à la fatigue, ceci peut être lié à la faible rigidité de la couche de MR5.

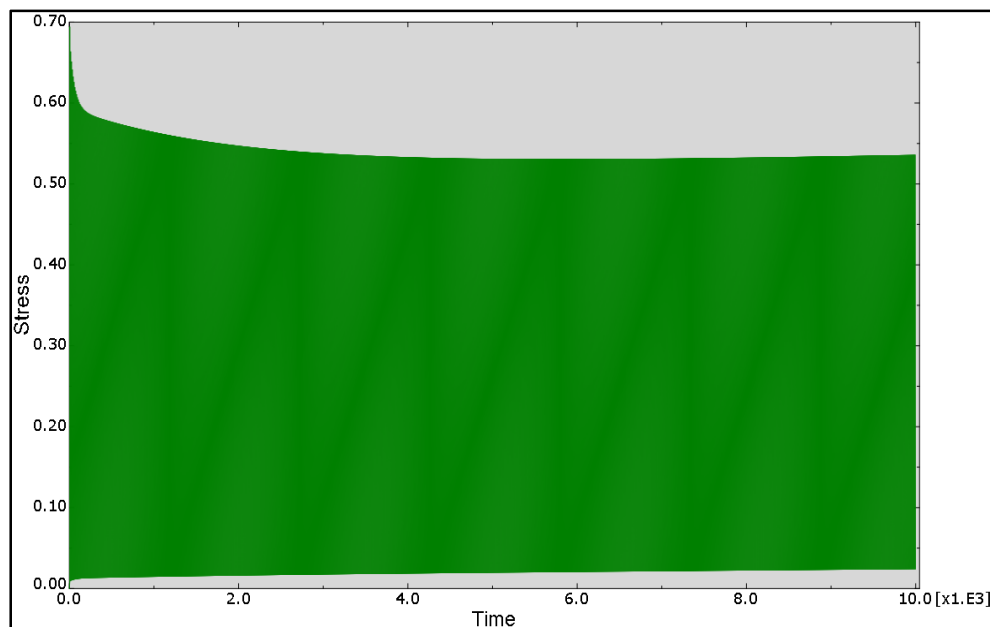


Figure 8.20 Contrainte de traction à la base de la couche de MR5

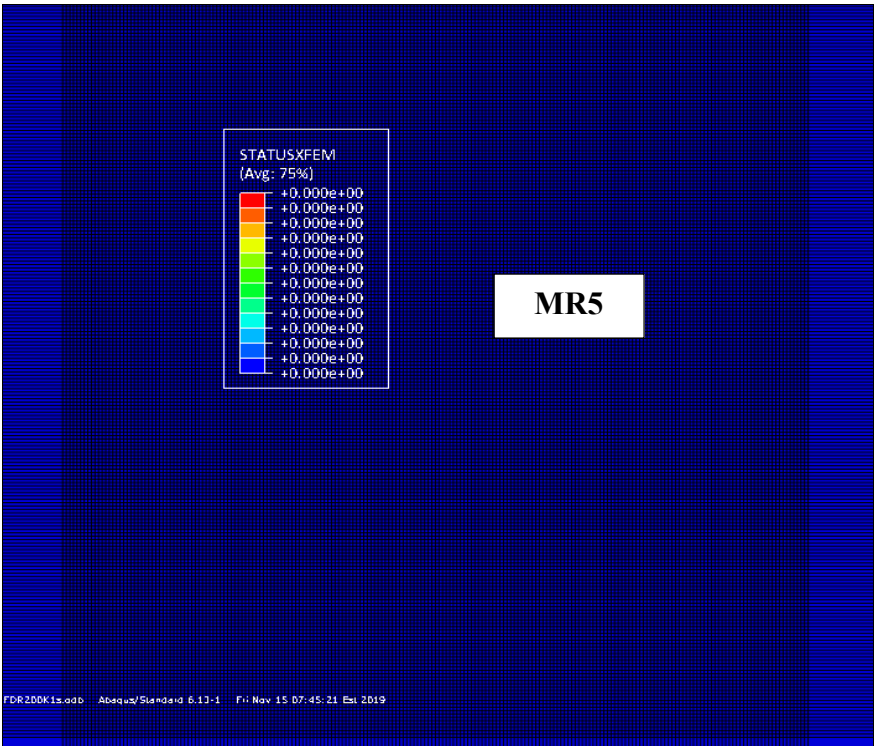


Figure 8.21 STATUSXFEM dans le retraitement type II soumis à 10000 répétitions

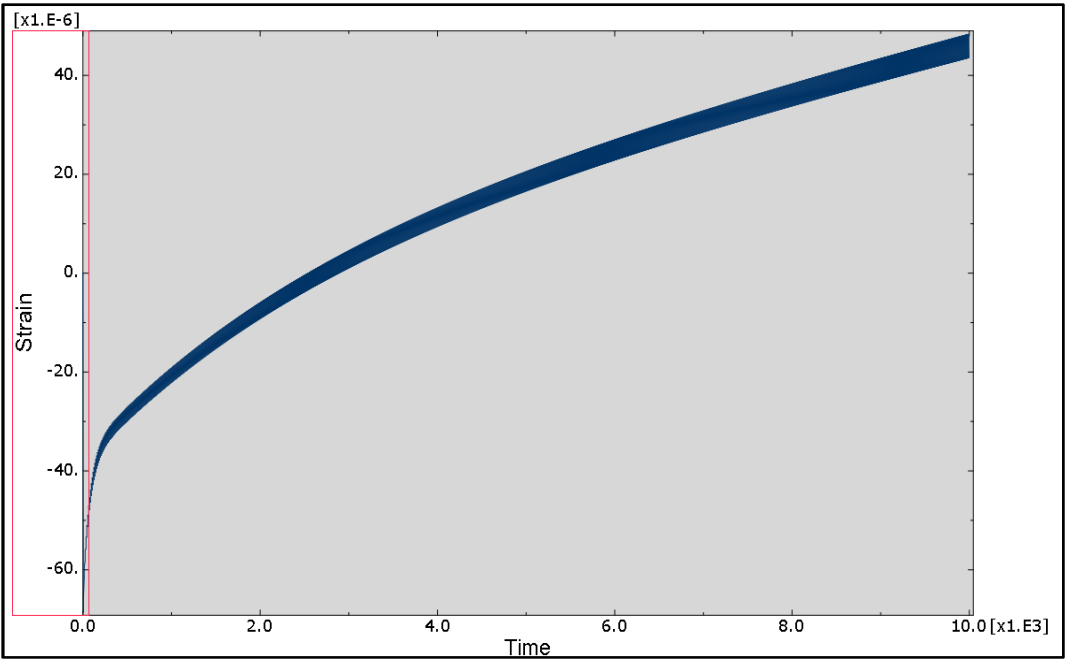


Figure 8.22 Déformation horizontale à la base de la couche de surface

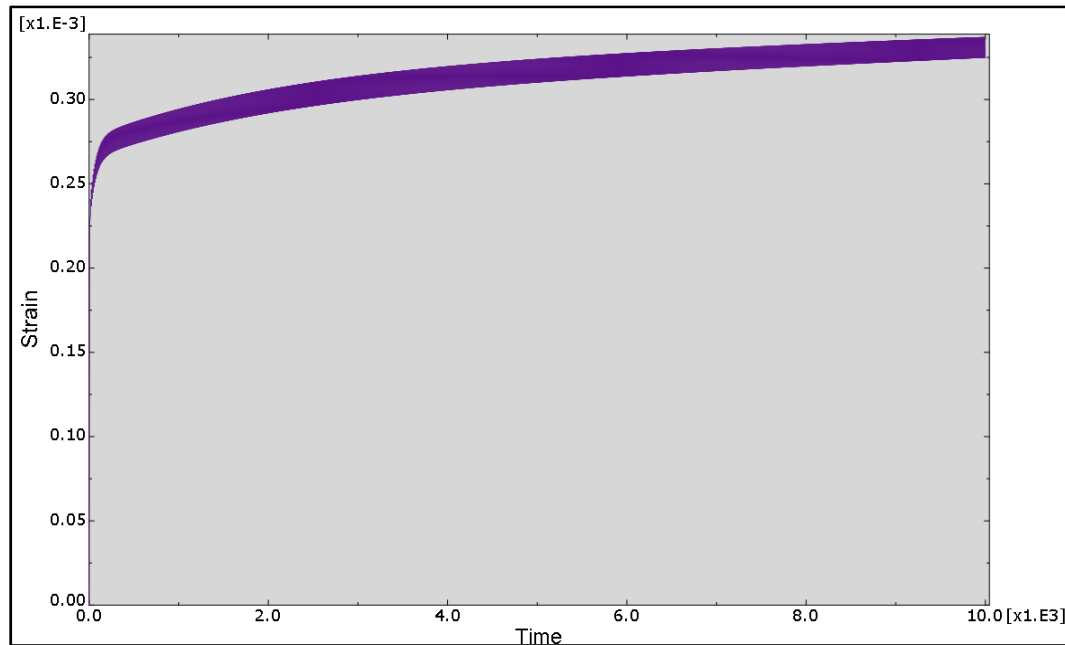


Figure 8.23 Déformation horizontale à la base de couche de MR5

8.7 Analyse paramétrique

Une étude paramétrique a été réalisée afin d'étudier l'influence de certains paramètres sur le comportement des chaussées réhabilitées. Dans un premier temps, l'influence de l'ouverture, la longueur et le nombre des fissures existantes sur la performance à la fissuration du retraitement type I a été étudié. Puis, l'effet de la teneur en ciment sur le comportement du retraitement type II a été investigué en utilisant les résultats présentés dans le chapitre 5.

8.7.1 Retraitement type I

8.7.1.1 Effet du nombre de fissures existantes

Dans cette partie, on a adopté le même modèle et le même chargement utilisés dans la partie 8.5. Un déplacement de 10 mm a été imposé à la structure. Pour des raisons de puissance de l'outil, la fissure existante a été défini selon la méthode décrite dans les travaux de (Mahmoud et al., 2014; H. Wang & Wang, 2014). La méthode consiste à insérer un fil pour identifier les éléments fissurés (les éléments de couleur rouge sur la Figure 8.24). Tous les paramètres

décrits auparavant sont maintenus constants et le nombre de fissures existantes a été varié de 1 à 6 fissures, d'où le développement de six modèles.

La Figure 8.23 montre le STATUXFEM pour les deux modèles contenant, respectivement, une et deux fissures existantes. Comme prédit précédemment, la concentration des contraintes est autour de la pointe de fissure qui provoque la propagation des fissures dans la couche de MR7. Cependant, on remarque que le chemin de propagation de fissures change avec le nombre de fissures. En effet, pour une seule fissure existante, le chemin est tout droit ce qui montre que seulement les contraintes de traction ont généré la propagation (mode I). Dans le cas de deux fissures, le chemin de propagation est divergé ceci éventuellement un mode mixte de rupture qui est généré par les contraintes de traction et de cisaillement (mode I et mode II) (H. Wang & Wang, 2014). La Figure 8.25 illustre la variation de longueur des microfissures (STATUSXFEM <1) en fonction du nombre de fissures existantes. On remarque que la longueur des microfissures suit une évolution logarithmique en fonction du nombre de fissures existantes.

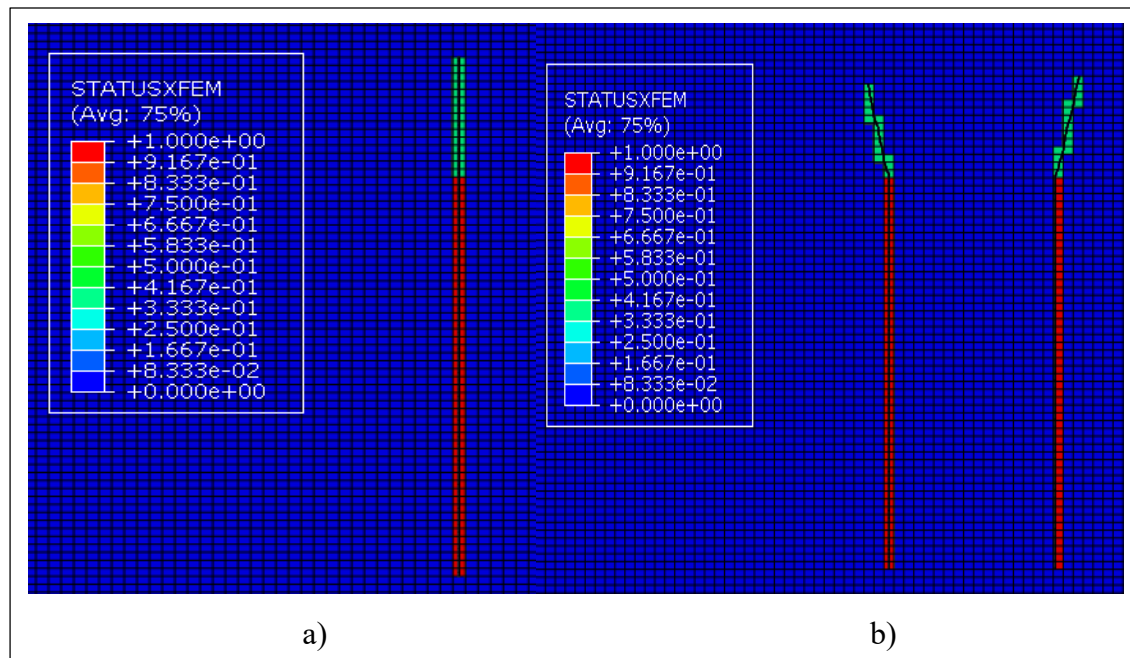


Figure 8.24 Fissuration du retraitement type I (a) contenant une fissure existante
(b) contenant deux fissures existantes

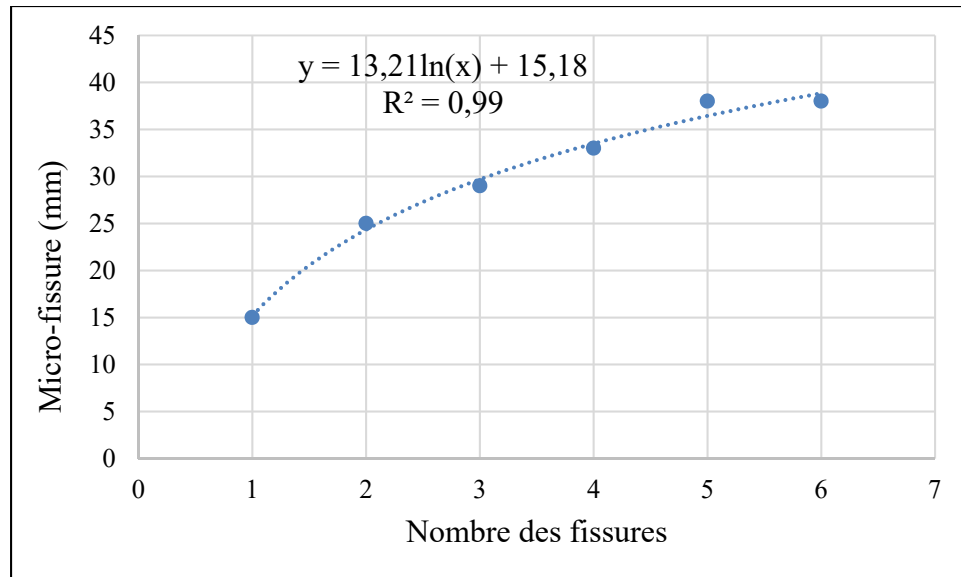


Figure 8.25 Effet du nombre de fissures sur le retraitement type I

8.7.1.2 Effet de l'ouverture de la fissure existante

Dans cette partie, l'ouverture de la fissure existante est modifiée afin d'investiguer l'impact de la largeur de l'ouverture sur la propagation des fissures. Cinq calculs ont été effectués à partir d'une seule fissure existante de la même longueur qu'auparavant, soit de 50 mm mais d'ouverture de : 1, 3, 5, 10 et 15 mm. La Figure 8.26 présente la variation de la longueur des microfissures en fonction de l'ouverture de la fissure. La longueur des microfissures augmente avec l'ouverture, cependant on constate que l'ouverture entre 3 mm et 10 mm est non significative. Les fissures avec une ouverture de moins de 5 mm sont généralement considérées de faible sévérité alors que celles entre 5 et 20 mm sont de moyenne sévérité. Cependant, ces simulations révèlent que l'impact des fissures avec une ouverture de 3 mm est aussi considérable.

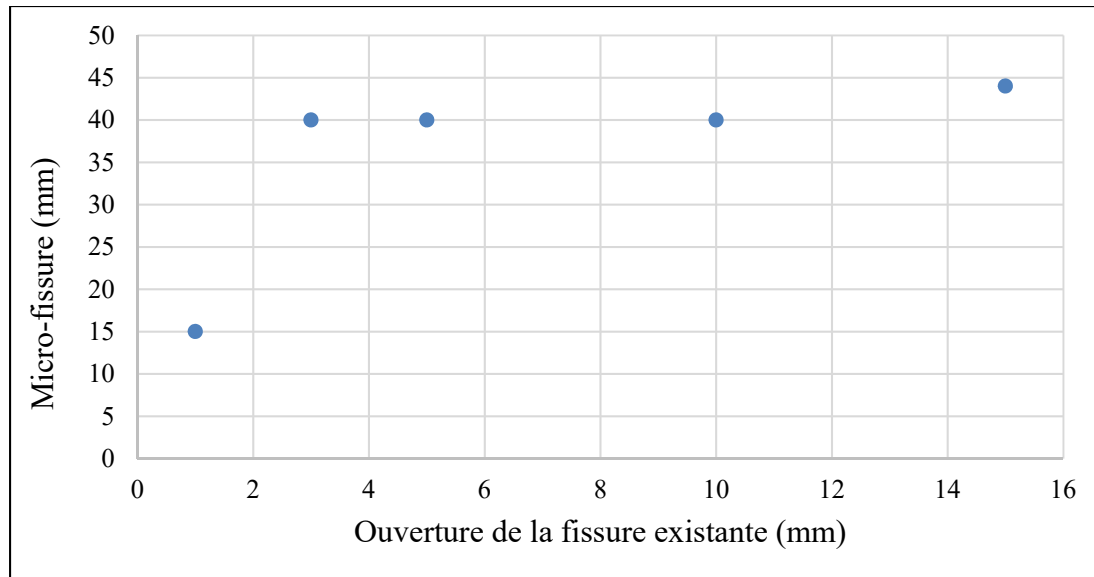


Figure 8.26 Effet de l'ouverture de la fissure existante sur le retraitement de type I

8.7.1.3 Effet de la longueur de fissure existante

La longueur de la fissure initiale représente l'épaisseur de l'enrobé existant, il est ainsi important d'évaluer son impact sur la performance à la fissuration du retraitement type I. Quatre longueurs ont été testées : 25, 50, 75 et 100 mm. La Figure 8.27 présente l'évolution de la longueur des microfissures en fonction de la longueur de la fissure existante. Les résultats montrent que la longueur de microfissures diminue en augmentant la longueur de la fissure existante, ce qui semble surprenant comme résultat, car on s'attend à une tendance inverse. Ceci peut être expliqué par la rigidité de la couche existante. Ainsi, en augmentant l'épaisseur de la couche existante ça augmente la rigidité de la structure.

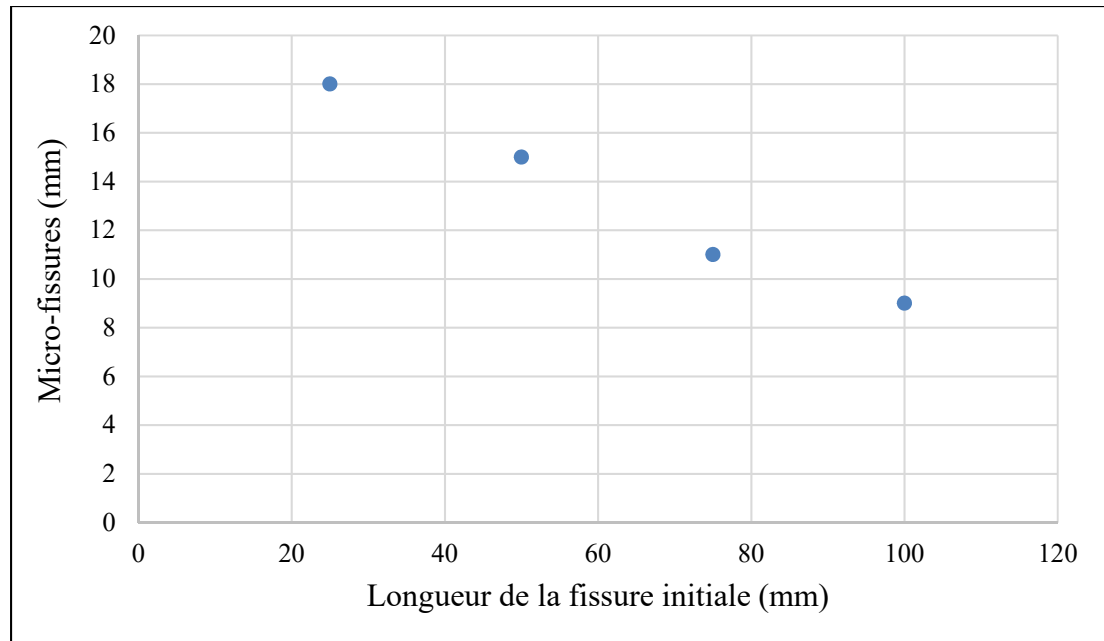


Figure 8.27 Effet de la longueur de la fissure existante le retraitement de type I

8.7.2 Retraitement type II

Les structures réhabilitées par retraitement type II ne contiennent pas des fissures existantes, ainsi c'est le comportement des matériaux à la fissuration qui peut présenter un facteur important dans la performance de cette structure. Dans le chapitre 5, on a trouvé que la teneur en ciment affecte la résistance à la fissuration des MR5. Dans cette partie, on évalue l'effet du ciment sur le comportement du retraitement type II en se basant sur les résultats du chapitre 5. Cinq calculs ont été réalisés en fixant tous les paramètres de la structure et des matériaux et en variant la résistance à la traction cohésive, T_{\max} et l'énergie de rupture cohésive, Γ_c correspondant aux mélanges contenant 1, 2, 3, 4 et 5 % de ciment. Les résultats expérimentaux du chapitre 5 ont été utilisés pour déterminer les valeurs de T_{\max} et Γ_c pour chaque mélange et le module a été supposé le même pour tous les mélanges.

Les valeurs de T_{\max} et Γ_c ont été déterminées en suivant une relation linéaire, entre les valeurs expérimentales et numériques, déterminée à partir du processus de calibration réalisé dans le chapitre 6. Le Tableau 8.2 présente les valeurs T_{\max} et Γ_c pour chaque mélange de MR5.

En appliquant un déplacement de 10 mm, on remarque qu'à partir de 2% de ciment pas de microfissures apparues à la base de la couche de MR5. Cependant des microfissures se sont initiés à la base de la couche de surface, tel qu'illustré sur la Figure 8.28, puisque les contraintes de traction à la base de cette couche ont dépassé la résistance à la traction cohésive de l'enrobé. On peut révéler de ces résultats que l'ajout de ciment rigidifie la structure à l'initiation de la fissure. En revanche, les valeurs de l'énergie à la rupture pour ces mélanges sont très faibles variant de 0,3 à 0,6 mJ/mm², ceci peut accélérer la propagation des fissures une fois se sont initiés et ainsi diminuer la performance à la fissuration de cette structure.

Tableau 8.2 Résistance à la traction et l'énergie de rupture cohésive des MR5 en fonction de la teneur en ciment

Teneur en ciment	1 %	2%	3%	4%	5%
T_{\max} (MPa)	1,9	2,7	3,3	4,4	5,8
Γ_c (mJ/mm ²)	0,3	0,3	0,46	0,5	0,6

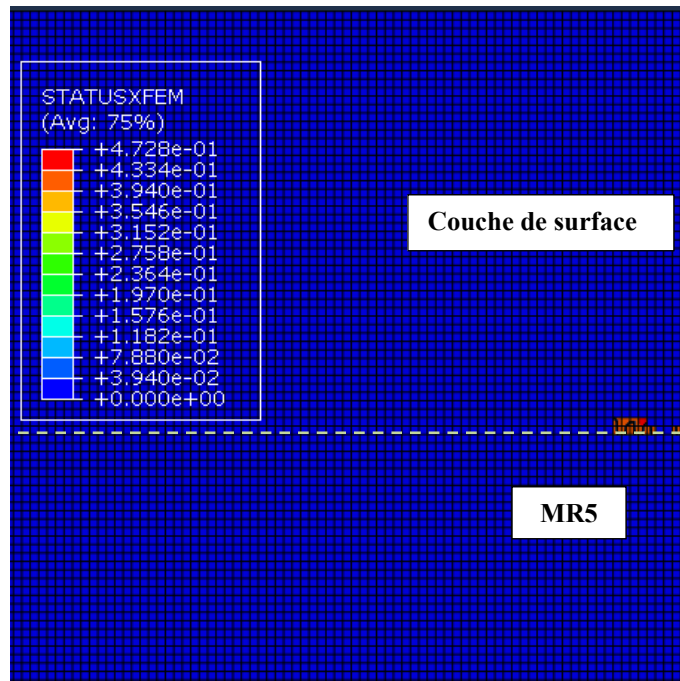


Figure 8.28 Initiation des fissures dans la couche de surface du retraitement de type II

8.8 Conclusion

La modélisation des structures réhabilitées par retraitement type I et type II avait pour but d'évaluer leurs comportements à la fissuration. Elle avait aussi pour but de relever les facteurs pouvant influencer leurs performances. Pour atteindre ces objectifs, des modèles en éléments finis de ces structures ont été développés à l'aide du logiciel ABAQUS. Afin de comparer leurs comportements avec d'autres structures de référence, on a aussi développé une structure totalement dégradée et une structure réhabilitée par planage-resurfaçage.

Les résultats de déflexions et de déformations ont montré que les techniques de retraitement sont plus performantes. En ce qui concerne l'initiation et la propagation des fissures, les résultats ont révélé que le retraitement type I est sensible au phénomène de remontée de fissure dans la couche de MR7. Cependant ces résultats peuvent être affectés par plusieurs facteurs, notamment le collage des couches et le comportement de l'enrobé existant. Plus de recherches sont recommandées à ce niveau, soit d'utiliser des essais de laboratoire effectués sur un enrobé existant. En revanche, la technique de retraitement type II est susceptible à l'initiation de fissure. Sous l'effet d'un chargement, les fissures vont s'initier à la base de la couche de MR5. Une fois apparues, les fissures se propagent plus rapidement en raison de la faible résistance à la propagation des fissures des MR5.

Afin de souligner l'impact de certains facteurs sur la performance à la fissuration des structures réhabilitées, une analyse paramétrique a été effectuée. Les résultats ont montré l'effet significatif du nombre de fissures sur la performance de la technique de retraitement type I. La longueur des microfissures augmente avec le nombre de fissures existantes. La variation de l'ouverture de la fissure existante a montré que la longueur des microfissures est proche pour les ouvertures de 3,5 et 10 mm. Pour la technique de retraitement type II, les résultats ont révélé l'effet significatif de la teneur en ciment sur le comportement de la chaussée. À partir de 2% de ciment, la chaussée est plus performante à l'initiation des fissures. Cependant la faible

résistance à la propagation des fissures des MR5 pourra influencer la performance de la chaussée une fois les fissures initiées.

CONCLUSION

Une structure de chaussées réhabilitée est soumise, en service, à des sollicitations complexes entraînant sa dégradation. La fissuration qui se propage dans les couches bitumineuses constitue l'un des principaux modes de dégradations. Les techniques de retraitement type I (MR7) et type II (MR5) sont très courantes au Québec et sont considérées performantes pour prolonger la durée de vie d'une chaussée fortement dégradée en améliorant son état structural et fonctionnel.

L'étude bibliographique a montré qu'il n'existe pas des méthodes de dimensionnement mécaniste adoptées aux chaussées réhabilitées. En effet, les méthodes actuelles se basent sur des modèles simples qui ne considèrent pas l'effet des fissures existantes dans la chaussée dégradée ainsi que les propriétés à la rupture des matériaux utilisés. La bibliographie recense des travaux menés pour la modélisation de la remontée des fissures dans les chaussées réhabilitées par planage-resurfaçage et dans les chaussées semi-rigides. Cependant, cette approche numérique n'a pas été appliquée pour les chaussées réhabilitées par les techniques retraitement type I et type II. En outre, le mécanisme de fissuration dans les matériaux recyclés à froid (MR5 et MR7) est encore méconnu.

Ce travail de thèse a pour objectif la modélisation des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement type I et type II dans un contexte canadien en utilisant la méthode des éléments finis, en vue de la prédiction mécaniste de la performance à la fissuration de ces structures. Pour ce faire, la thèse est divisée en deux principaux volets : un volet consacré à l'échelle des matériaux pour la caractérisation expérimentale et numérique du comportement des MR5 et MR7 contenant respectivement 50% et 100% de granulats bitumineux recyclés (GBR). Le deuxième volet est dédié à l'étude numérique à l'échelle des structures. Cette partie inclut l'élaboration et la validation du modèle d'une structure de chaussée réelle pour vérifier l'applicabilité de la méthode des éléments finis. Par la suite, cette dernière a été utilisée pour la prédiction de la performance des chaussées réhabilitées.

L'évaluation du comportement des MR5 et MR7 a été réalisée en deux étapes. En premier lieu, le comportement viscoélastique a été prédit en utilisant l'essai de module complexe. Cet essai consiste à soumettre le matériau à des sollicitations sinusoïdales sous différentes combinaisons de températures et de fréquences. L'essai a été réalisé à sept températures et cinq fréquences. Les résultats ont été calibrés avec le modèle 2S2P1D afin d'étendre les résultats de module complexe à des fréquences inaccessibles en laboratoire. Les résultats ont confirmé le comportement rhéologique des mélanges en respectant le principe d'équivalence temps-température et ont montré que les MR7 présentent une rigidité élevée par rapport au MR5 ce qui pourrait être lié à la forte teneur en bitume dans les MR7 provenant des GBR.

Dans un deuxième temps, l'évaluation du comportement des MR5 et MR7 vis-à-vis de la fissuration a été effectuée en laboratoire. Cette évaluation constitue l'originalité et l'innovation dans ce travail. Il ressort des diverses publications sur ce sujet que le mécanisme de fissuration dans les matériaux recyclés à froid, notamment les MR5 et MR7, est relativement peu débattu par les chercheurs. Pour ce faire, on a exploité l'essai de flexion semi-circulaire au LCMB. L'essai consiste à soumettre une éprouvette semi-circulaire pré-fissurée à une flexion 3 points en imposant un déplacement de 0,5 mm/min. La résistance à la fissuration a été prédite en calculant le taux de libération d'énergie critique, qui dépend des courbes de force-déplacement enregistrées lors de l'essai. Les résultats ont montré la même tendance que l'essai de module complexe, en observant une faible résistance à la fissuration au niveau des MR5. Une autre problématique est ressorti de la revue de littérature concernant le comportement à la fissuration des MR5. En effet, des recherches ont montré que la quantité de ciment affecte leurs comportements. Cependant, il existe très peu de travaux publiés sur l'effet du ciment sur la résistance à la fissuration des MR5. Une étude dans le cadre de cette thèse a été réalisée pour investiguer l'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la rupture des MR5. La proportion de ciment a été variée dans les mélanges (1%, 2%, 3%, 4% et 5%) et l'essai SCB a été utilisé pour évaluer la résistance à la fissuration du matériau. Les résultats expérimentaux ont révélé que la résistance à la fissuration est améliorée en augmentant la teneur en ciment dans les MR5, cependant une grande quantité de ciment peut rendre le matériau fragile. De ce fait, selon les

résultats il est recommandé de ne pas excéder une quantité de 3% de ciment dans les MR5 pour garder le comportement flexible du mélange.

Suite à la caractérisation des propriétés viscoélastiques et de la résistance à la fissuration des MR5 et MR7 en laboratoire, la modélisation du comportement de ces matériaux a été réalisée moyennant la méthode des éléments finis. À notre connaissance, il n'existe pas des travaux publiés sur la modélisation du mécanisme de fissuration dans les matériaux recyclés à froid. À l'aide du logiciel ABAQUS, on a exploité les approches numériques qui permettent de simuler le phénomène de fissuration dans l'essai SCB. En tenant compte des spécificités de l'essai et le comportement viscoélastique des MR5 et MR7, on a développé un modèle 2D en éléments finis de l'essai SCB. L'initiation et la propagation des fissures dans le modèle ont été modélisés en utilisant la méthode des éléments finis étendus (XFEM) et le modèle de zone cohésive (CZM). Les comportements viscoélastiques des MR5 et MR7 ont été défini à l'aide des séries de Prony obtenues à partir de l'essai de module complexe. Le modèle développé a permis de simuler la fissuration dans ces matériaux. Afin d'avoir les paramètres définissant les propriétés des MR5 et MR7 et qui sont nécessaires pour la modélisation à l'échelle des structures réhabilitées, les résultats numériques ont été ajustées selon les résultats expérimentaux de l'essai SCB. Le modèle a été finalement validé. Les résultats numériques ont montré un bon accord avec les résultats expérimentaux. Les paramètres ressortis du processus de calibration effectué dans cette partie sont utilisés comme intrants pour les modèles des structures réhabilitées.

Le deuxième volet important de ce travail a été ciblée sur la modélisation à l'échelle de la structure. Bien que la méthode des éléments finis soit souvent utilisée pour simuler la réponse d'une chaussée soumise à un chargement, il s'avère nécessaire de vérifier cette approche avec une structure réelle. Pour ce faire, les données d'une structure et de l'essai FWD disponible dans la base de données LTPP a été utilisé pour développer un modèle en éléments finis d'une chaussée. La bibliographie réalisée au cours de cette thèse recense également les limites des méthodes actuelles adoptées pour la conception des chaussées bitumineuses. En effet, les outils actuels nécessitent encore des améliorations, notamment en ce qui concerne le comportement

viscoélastique des enrobés bitumineux. En effet, les modèles actuels supposent que les enrobés bitumineux ayant un comportement élastique. De ce fait, dans cette partie de la thèse on a modélisé la structure de la chaussée et l'essai FWD en tenant compte le comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux ceci à l'aide des résultats du module de relaxation disponible. La comparaison entre les déflexions calculées moyennant le logiciel ABAQUS et les déflexions mesurées sur la chaussée a montré une différence non significative ceci valide l'applicabilité de la MEF pour la modélisation des chaussées. Les résultats révèlent aussi que l'hypothèse du comportement élastique des enrobés bitumineux sous-estime la réponse des chaussées bitumineuses d'où l'importance de considérer leur comportement viscoélastique dans les méthodes de dimensionnement des chaussées.

Enfin, ce travail a été complété par la modélisation des structures de chaussées réhabilitées tout en considérant les résultats des parties précédentes. Le comportement des chaussées réhabilitées par retraitement type I et type II a été comparé à celui de la structure existante et le planage-resurfaçage en évaluant les contraintes, les déformations et les déflexions critiques. Les résultats ont montré que les techniques de retraitement sont plus performantes aux autres structures. Les résultats ont montré aussi que le retraitement type I est susceptible au phénomène de la remontée de fissure dans la couche de MR7. Concernant, la technique de retraitement type II les fissures vont s'initier à la base de la couche de MR5. Une fois sont apparues, les fissures se propagent plus rapidement en raison de la faible résistance à la propagation des fissures des MR5.

Cette étude a permis de déterminer l'évolution des microfissures en fonction de plusieurs facteurs, notamment le nombre, l'ouverture et la longueur des fissures existantes. Pour la technique de retraitement type II, les résultats ont montré l'effet significatif de la teneur en ciment sur le comportement de la chaussée.

Cette étude a permis de prédire la performance à la fissuration des chaussées réhabilitées ainsi que les différents paramètres à tenir compte dans les méthodes de dimensionnement des chaussées réhabilitées. Cependant, il est important de valider les résultats de ces modèles selon

des relevés en vraie grandeur sur des chaussées réhabilitées. Il est aussi intéressant de mettre l'emphasis sur les hypothèses pouvant influencer les résultats, comme le collage des couches et le comportement de l'enrobé existant et l'enrobé neuf.

RECOMMANDATIONS

Basé sur les résultats et les hypothèses de cette étude, on propose les recommandations suivantes pour les futures recherches :

- Dans cette étude, l'essai SCB a été utilisé pour caractériser le comportement à la fissuration des matériaux recyclés à froid contenant 50 % et 100 % de GBR. Il serait intéressant d'effectuer l'essai avec l'ajout de différents pourcentages de GBR afin d'évaluer son effet sur la résistance à la fissuration des MR. Il serait intéressant aussi de tenir compte de ce comportement dans la formulation des matériaux recyclés à froid.
- Des études ont montré l'importance d'étudier la résistance à la fissuration des enrobés bitumineux à basse température. Dans cette thèse, l'essai SCB a été réalisé à une température intermédiaire. Il serait ainsi intéressant d'évaluer le comportement à la fissuration des matériaux recyclés à froid à des basses températures.
- Il est ressorti de l'étude bibliographique qu'il existe trois modes de fissuration des matériaux dans la mécanique de rupture. Dans la présente étude, seulement le mode I de fissuration a été investigué. Il serait important d'étudier le mode II de fissuration des MR5 et MR7 en laboratoire. Il s'avère intéressant aussi de simuler ce comportement par la MEF.
- D'autres aspects pourraient être améliorées au niveau de la modélisation à l'échelle des structures. Il serait pertinent de simuler le comportement des chaussées réhabilitées aux charges roulantes. Des modèles 3D en éléments finis des structures sont indispensables afin de modéliser ce type de chargement. Pour ce faire, il s'avère indispensable d'avoir des outils numériques performants.
- Les résultats numériques de cette étude ont montré l'importance de considérer le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux dans les méthodes de dimensionnement. Cependant, pour les chaussées réhabilitées, le comportement élastique a été supposé pour

l'enrobé existant et l'enrobé neuf. Ainsi, il est important d'avoir des résultats de module complexe et de SCB de ces enrobés pour les définir dans les modèles développés.

- Un autre objectif était difficile à éteindre lors de ce travail en raison du manque de disponibilité de relevés de performance des chaussées au Québec, c'est la calibration et la validation des modèles de structures réhabilitées développés dans cette étude. Il serait intéressant d'avoir des données du MTQ afin d'atteindre cet objectif.

ANNEXE I

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Tableau-A I-1 Résultats de module complexe pour MR5

Température (°C)	f (Hz)	E* (MPa)	ΦE (rad)
-18,6	1,01	6286	4,00
-18,5	0,30	6015	4,54
-18,8	0,10	5895	4,04
-18,6	0,03	5269	5,70
-19,1	0,01	5044	6,01
-9,4	1,00	5407	4,85
-9,3	0,30	5079	4,78
-9,5	0,10	4906	5,93
-9,5	0,03	4421	6,81
-9,4	0,01	3971	7,89
-0,8	1,01	4305	6,30
-0,9	0,30	3981	6,84
-0,9	0,10	3723	7,40
-1,0	0,03	3560	6,05
-1,0	0,01	3102	9,29
9,9	1,01	3132	8,43
9,9	0,30	3020	8,46
9,9	0,10	2607	9,04
9,9	0,03	2188	10,80
9,9	0,01	1941	11,94
20,1	1,00	2124	11,60
20,0	0,30	1827	11,44
20,0	0,10	1564	13,60
20,1	0,03	1342	13,60
20,0	0,01	1124	14,05
29,9	1,01	1397	14,16
29,9	0,30	1146	14,90
29,9	0,10	951	14,86
29,9	0,03	818	13,77
29,9	0,01	665	14,28
39,6	1,0	910,1	15,90
39,6	0,30	741	15,45
39,6	0,10	619	14,81
39,6	0,03	531	13,56
39,6	0,01	454	12,72

Tableau-A I-2 Résultats de module complexe pour MR7

Température (°C)	f (Hz)	E* (MPa)	ΦE (rad)
-17,3	0,01	7364	7,50
-16,3	0,03	7896	6,59
-17,0	0,10	8510	5,17
-17,0	0,30	8975	5,00
-17,0	1,01	9431	4,67
-8,2	1,00	7343	7,22
-8,1	0,30	6834	7,54
-8,1	0,10	6256	8,03
-8,1	0,03	5820	9,04
-8,1	0,01	4892	11,49
0,1	1,01	5023	9,00
0,1	0,30	4534	9,49
0,1	0,10	4046	10,12
0,0	0,03	3609	10,54
0,2	0,01	3059	12,10
10,6	1,01	3358	11,88
10,6	0,30	2894	12,44
10,7	0,10	2484	13,64
10,7	0,03	2056	15,27
10,6	0,01	1701	16,56
20,4	1,00	2103	15,77
20,3	0,30	1781	16,23
20,4	0,10	1463	17,20
20,4	0,03	1206	17,99
20,4	0,01	970	18,97
29,8	1,00	1417	18,27
29,8	0,30	1080	19,40
29,8	0,10	943	18,97
29,8	0,03	614	21,48
29,8	0,01	525	20,95
38,9	1,0	890,1	19,9
38,9	0,30	696	19,96
38,9	0,09	564	19,85
38,9	0,03	456	19,54
38,9	0,01	376	19,18

Tableau-A I-3 Résultats de l'essai SCB pour différentes longueurs de fissures pour MR5

MR5					
25 mm		32 mm		38 mm	
Déplacement (mm)	Force (N)	Déplacement (mm)	Force (N)	Déplacement (mm)	Force (N)
0,0415	34,5826	0,0713	40,6090	0,0752	41,4700
0,0441	34,5826	0,0817	40,6090	0,0803	41,4700
0,0441	34,5826	0,0739	39,7481	0,0726	39,7481
0,0415	34,5826	0,0739	42,3309	0,0752	38,8872
0,0415	32,8608	0,0765	43,1918	0,0726	39,7481
0,0441	34,5826	0,0765	40,6090	0,0752	37,1654
0,0441	31,9999	0,0765	42,3309	0,0726	37,1654
0,0441	33,7217	0,0791	42,3309	0,0726	38,0263
0,0441	34,5826	0,0765	41,4700	0,0726	36,3044
0,0441	33,7217	0,0817	43,1918	0,0700	34,5826
0,0466	33,7217	0,0791	44,0527	0,0674	33,7217
0,0441	33,7217	0,0817	44,0527	0,0649	33,7217
0,0441	35,4435	0,0791	43,1918	0,0674	32,8608
0,0441	34,5826	0,0843	42,3309	0,0649	31,1389
0,0441	35,4435	0,0791	44,0527	0,0597	31,1389
0,0415	33,7217	0,0868	43,1918	0,0597	30,2780
0,0466	34,5826	0,0868	41,4700	0,0597	31,1389
0,0492	34,5826	0,0817	43,1918	0,0571	27,6953
0,0441	33,7217	0,0920	43,1918	0,0571	27,6953
0,0492	32,8608	0,0920	43,1918	0,0519	26,8343
0,0441	36,3044	0,0920	43,1918	0,0545	26,8343
0,0466	34,5826	0,0894	44,0527	0,0494	24,2516
0,0466	33,7217	0,0920	42,3309	0,0494	25,1125
0,0466	34,5826	0,0920	43,1918	0,0468	23,3907
0,0466	35,4435	0,0920	43,1918	0,0468	21,6688
0,0466	33,7217	0,0946	44,9136	0,0545	22,5297
0,0466	35,4435	0,0972	42,3309	0,0416	19,9470
0,0466	35,4435	0,0946	44,9136	0,0390	19,0861
0,0492	34,5826	0,0972	44,9136	0,0390	18,2252
0,0492	35,4435	0,0972	44,0527	0,0364	19,0861
0,0466	34,5826	0,0998	45,7745	0,0313	17,3642
0,0492	37,1654	0,0972	44,0527	0,0339	16,5033
0,0492	37,1654	0,0946	43,1918	0,0287	16,5033

0,0492	35,4435	0,0972	41,4700	0,0287	13,9206
0,0466	36,3044	0,0972	41,4700	0,0235	13,0596
0,0492	36,3044	0,0972	41,4700	0,0235	11,3378
0,0518	35,4435	0,0946	40,6090	0,0184	11,3378
0,0492	34,5826	0,0946	41,4700	0,0184	10,4769
0,0492	36,3044	0,0920	39,7481	0,0132	10,4769
0,0492	36,3044	0,0894	38,8872	0,0106	8,7551
0,0492	35,4435	0,0920	38,8872	0,0055	7,0332
0,0518	36,3044	0,0894	38,8872	0,0029	7,0332
0,0466	37,1654	0,0868	36,3044	0,0003	7,0332
0,0518	36,3044	0,0843	36,3044	0,0029	8,7551
0,0544	36,3044	0,0817	35,4435	0,0003	9,6160
0,0544	37,1654	0,0868	33,7217	0,0029	10,4769
0,0544	37,1654	0,0817	35,4435	0,0055	8,7551
0,0518	36,3044	0,0791	31,9999	0,0029	10,4769
0,0518	37,1654	0,0791	30,2780	0,0029	10,4769
0,0492	37,1654	0,0817	30,2780	0,0080	11,3378
0,0544	36,3044	0,0739	30,2780	0,0080	11,3378
0,0570	38,0263	0,0739	28,5562	0,0080	11,3378
0,0544	38,0263	0,0713	27,6953	0,0106	10,4769
0,0518	38,0263	0,0662	27,6953	0,0106	11,3378
0,0544	38,8872	0,0713	25,9734	0,0132	13,9206
0,0570	38,8872	0,0636	25,9734	0,0132	12,1987
0,0596	38,0263	0,0636	25,9734	0,0132	13,9206
0,0570	38,0263	0,0584	22,5297	0,0158	14,7815
0,0596	38,8872	0,0610	23,3907	0,0132	13,0596
0,0544	38,0263	0,0558	21,6688	0,0184	14,7815
0,0570	39,7481	0,0533	20,8079	0,0184	13,9206
0,0596	38,8872	0,0481	19,9470	0,0184	13,9206
0,0570	38,0263	0,0481	19,0861	0,0184	14,7815
0,0596	38,0263	0,0429	18,2252	0,0184	14,7815
0,0596	38,0263	0,0403	19,0861	0,0184	13,9206
0,0596	37,1654	0,0403	17,3642	0,0184	15,6424
0,0596	38,0263	0,0352	16,5033	0,0209	15,6424
0,0596	38,0263	0,0326	16,5033	0,0235	14,7815
0,0596	38,0263	0,0274	14,7815	0,0235	16,5033
0,0621	40,6090	0,0249	12,1987	0,0235	15,6424
0,0621	38,8872	0,0223	12,1987	0,0235	17,3642

0,0596	38,8872	0,0197	11,3378	0,0261	17,3642
0,0621	38,8872	0,0145	11,3378	0,0261	17,3642
0,0621	39,7481	0,0145	10,4769	0,0287	17,3642
0,0647	38,8872	0,0068	8,7551	0,0261	19,0861
0,0621	39,7481	0,0016	8,7551	0,0287	19,0861
0,0699	39,7481	0,0042	10,4769	0,0261	19,0861
0,0647	39,7481	0,0016	10,4769	0,0287	22,5297
0,0621	39,7481	0,0068	11,3378	0,0287	19,9470
0,0673	40,6090	0,0068	13,9206	0,0313	19,9470
0,0647	41,4700	0,0068	11,3378	0,0339	20,8079
0,0647	41,4700	0,0068	11,3378	0,0313	21,6688
0,0673	41,4700	0,0068	13,0596	0,0364	21,6688
0,0673	38,8872	0,0119	13,0596	0,0364	21,6688
0,0647	41,4700	0,0094	13,0596	0,0364	22,5297
0,0673	41,4700	0,0145	13,0596	0,0339	21,6688
0,0621	40,6090	0,0119	13,0596	0,0390	21,6688
0,0699	41,4700	0,0145	13,9206	0,0390	21,6688
0,0699	43,1918	0,0119	13,9206	0,0390	21,6688
0,0673	42,3309	0,0145	13,0596	0,0390	24,2516
0,0699	41,4700	0,0171	14,7815	0,0416	24,2516
0,0699	42,3309	0,0171	14,7815	0,0416	24,2516
0,0647	42,3309	0,0171	14,7815	0,0442	25,1125
0,0673	43,1918	0,0197	15,6424	0,0442	24,2516
0,0699	44,0527	0,0197	15,6424	0,0442	25,1125
0,0673	43,1918	0,0197	15,6424	0,0416	23,3907
0,0699	43,1918	0,0223	16,5033	0,0442	24,2516
0,0699	42,3309	0,0197	18,2252	0,0468	26,8343
0,0725	43,1918	0,0223	18,2252	0,0468	24,2516
0,0751	44,0527	0,0249	17,3642	0,0519	22,5297
0,0725	43,1918	0,0223	17,3642	0,0468	26,8343
0,0699	42,3309	0,0249	19,0861	0,0519	25,9734
0,0725	43,1918	0,0223	19,0861	0,0494	25,9734
0,0751	44,0527	0,0300	18,2252	0,0545	25,9734
0,0751	41,4700	0,0249	19,0861	0,0545	26,8343
0,0802	43,1918	0,0274	18,2252	0,0545	27,6953
0,0725	43,1918	0,0274	19,0861	0,0571	27,6953
0,0802	45,7745	0,0326	20,8079	0,0545	26,8343
0,0751	44,0527	0,0300	19,9470	0,0571	28,5562

0,0776	42,3309	0,0300	19,0861	0,0571	27,6953
0,0751	44,0527	0,0326	20,8079	0,0571	28,5562
0,0725	45,7745	0,0352	19,9470	0,0623	30,2780
0,0776	44,9136	0,0326	22,5297	0,0623	31,9999
0,0802	44,9136	0,0326	19,9470	0,0597	31,1389
0,0802	45,7745	0,0352	22,5297	0,0597	30,2780
0,0802	44,0527	0,0378	21,6688	0,0623	31,9999
0,0802	44,0527	0,0378	22,5297	0,0649	31,1389
0,0776	45,7745	0,0378	22,5297	0,0623	31,9999
0,0802	44,9136	0,0403	21,6688	0,0623	31,9999
0,0828	43,1918	0,0429	23,3907	0,0674	32,8608
0,0802	42,3309	0,0429	21,6688	0,0649	31,9999
0,0776	42,3309	0,0403	22,5297	0,0674	33,7217
0,0776	43,1918	0,0429	21,6688	0,0674	29,4171
0,0776	41,4700	0,0429	21,6688	0,0674	36,3044
0,0776	39,7481	0,0378	21,6688	0,0700	33,7217
0,0725	39,7481	0,0429	22,5297	0,0700	32,8608
0,0725	38,0263	0,0429	25,1125	0,0700	35,4435
0,0699	38,0263	0,0455	24,2516	0,0700	32,8608
0,0725	36,3044	0,0507	24,2516	0,0752	33,7217
0,0751	36,3044	0,0481	21,6688	0,0752	37,1654
0,0673	34,5826	0,0481	24,2516	0,0726	34,5826
0,0647	34,5826	0,0481	25,1125	0,0778	35,4435
0,0621	34,5826	0,0507	24,2516	0,0752	33,7217
0,0570	31,9999	0,0533	25,9734	0,0778	35,4435
0,0596	31,9999	0,0507	25,9734	0,0778	33,7217
0,0621	30,2780	0,0558	26,8343	0,0752	34,5826
0,0596	30,2780	0,0558	28,5562	0,0803	35,4435
0,0570	27,6953	0,0533	27,6953	0,0803	32,8608
0,0544	28,5562	0,0584	26,8343	0,0829	34,5826
0,0544	27,6953	0,0584	27,6953	0,0829	33,7217
0,0518	27,6953	0,0558	27,6953	0,0829	36,3044
0,0492	26,8343	0,0584	28,5562	0,0829	35,4435
0,0466	25,1125	0,0610	28,5562	0,0829	36,3044
0,0441	24,2516	0,0584	30,2780	0,0855	36,3044
0,0441	24,2516	0,0610	29,4171	0,0829	37,1654
0,0389	20,8079	0,0610	29,4171	0,0907	37,1654
0,0389	22,5297	0,0662	30,2780	0,0881	38,0263

0,0389	19,9470	0,0662	29,4171	0,0855	38,8872
0,0389	19,0861	0,0662	31,9999	0,0907	37,1654
0,0286	19,0861	0,0713	31,1389	0,0907	38,0263
0,0312	18,2252	0,0688	28,5562	0,0907	37,1654
0,0286	16,5033	0,0713	30,2780	0,0933	37,1654
0,0260	15,6424	0,0662	29,4171	0,0907	39,7481
0,0234	16,5033	0,0713	30,2780	0,0933	37,1654
0,0208	14,7815	0,0713	32,8608	0,0958	39,7481
0,0157	13,0596	0,0713	32,8608	0,0958	38,8872
0,0182	13,0596	0,0713	30,2780	0,0984	40,6090
0,0182	12,1987	0,0739	32,8608	0,0984	39,7481
0,0079	10,4769	0,0739	31,9999	0,0984	42,3309
0,0079	10,4769	0,0713	31,9999	0,0984	39,7481
0,0027	9,6160	0,0739	32,8608	0,1010	37,1654
-0,0024	7,8941	0,0817	32,8608	0,0984	38,8872
-0,0076	8,7551	0,0765	34,5826	0,1010	41,4700
-0,0050	8,7551	0,0817	32,8608	0,1036	38,0263
-0,0076	7,8941	0,0791	31,9999	0,1010	39,7481
-0,0024	9,6160	0,0817	34,5826	0,1036	39,7481
-0,0024	8,7551	0,0791	32,8608	0,1062	39,7481
-0,0024	12,1987	0,0817	34,5826	0,1036	40,6090
-0,0024	12,1987	0,0817	35,4435	0,1062	39,7481
0,0002	11,3378	0,0843	34,5826	0,1062	40,6090
0,0027	10,4769	0,0843	35,4435	0,1113	38,8872
0,0002	12,1987	0,0868	35,4435	0,1088	44,9136
0,0002	12,1987	0,0868	36,3044	0,1088	42,3309
0,0002	13,9206	0,0868	36,3044	0,1088	38,0263
0,0027	11,3378	0,0894	35,4435	0,1113	41,4700
0,0079	11,3378	0,0920	36,3044	0,1139	38,0263
0,0053	11,3378	0,0894	35,4435	0,1139	41,4700
0,0079	13,9206	0,0920	36,3044	0,1139	40,6090
0,0053	13,9206	0,0920	35,4435	0,1139	42,3309
0,0079	13,0596	0,0920	37,1654	0,1139	42,3309
0,0105	15,6424	0,0894	36,3044	0,1139	43,1918
0,0105	15,6424	0,0946	38,8872	0,1191	43,1918
0,0079	13,9206	0,0920	37,1654	0,1165	42,3309
0,0105	14,7815	0,0972	38,8872	0,1139	43,1918
0,0131	14,7815	0,0972	37,1654	0,1165	43,1918

0,0157	14,7815	0,0972	38,8872	0,1191	41,4700
0,0157	17,3642	0,0998	38,0263	0,1217	41,4700
0,0157	13,9206	0,0998	39,7481	0,1191	42,3309
0,0157	16,5033	0,0998	38,8872	0,1217	42,3309
0,0157	16,5033	0,0972	37,1654	0,1217	43,1918
0,0182	19,0861	0,1023	38,8872	0,1243	39,7481
0,0208	17,3642	0,0998	38,0263	0,1243	41,4700
0,0182	18,2252	0,1023	40,6090	0,1268	42,3309
0,0286	21,6688	0,1049	39,7481	0,1268	40,6090
0,0234	18,2252	0,1049	40,6090	0,1268	43,1918
0,0208	18,2252	0,0998	40,6090	0,1320	43,1918
0,0182	19,0861	0,1049	42,3309	0,1294	42,3309
0,0234	19,0861	0,1075	41,4700	0,1475	44,9136
0,0260	19,9470	0,1075	41,4700	0,1372	41,4700
0,0260	19,9470	0,1101	41,4700	0,1294	39,7481
0,0286	20,8079	0,1049	43,1918	0,1346	43,1918
0,0286	19,9470	0,1127	42,3309	0,1320	43,1918
0,0286	19,9470	0,1075	43,1918	0,1372	40,6090
0,0286	21,6688	0,1127	44,0527	0,1320	43,1918
0,0337	20,8079	0,1152	42,3309	0,1372	41,4700
0,0337	23,3907	0,1152	44,9136	0,1346	43,1918
0,0312	20,8079	0,1152	44,0527	0,1346	41,4700
0,0337	20,8079	0,1127	44,9136	0,1372	43,1918
0,0312	22,5297	0,1178	43,1918	0,1398	44,0527
0,0312	23,3907	0,1152	43,1918	0,1372	44,0527
0,0312	23,3907	0,1204	46,6355	0,1346	42,3309
0,0337	24,2516	0,1230	42,3309	0,1398	42,3309
0,0363	22,5297	0,1204	44,0527	0,1346	44,0527
0,0363	24,2516	0,1178	44,0527	0,1475	44,0527
0,0389	25,9734	0,1230	46,6355	0,1423	43,1918
0,0363	27,6953	0,1204	44,9136	0,1449	43,1918
0,0415	24,2516	0,1230	44,9136	0,1449	42,3309
0,0415	27,6953	0,1230	44,9136	0,1449	44,0527
0,0441	26,8343	0,1230	44,0527	0,1501	43,1918
0,0363	25,9734	0,1256	44,0527	0,1449	43,1918
0,0415	28,5562	0,1256	44,9136	0,1475	42,3309
0,0441	25,9734	0,1282	45,7745	0,1501	44,9136
0,0441	27,6953	0,1256	44,0527	0,1527	42,3309

0,0441	27,6953	0,1333	45,7745	0,1449	42,3309
0,0441	29,4171	0,1282	45,7745	0,1552	39,7481
0,0492	27,6953	0,1307	45,7745	0,1449	41,4700
0,0492	28,5562	0,1307	47,4964	0,1552	43,1918
0,0492	29,4171	0,1333	46,6355	0,1578	43,1918
0,0492	28,5562	0,1307	45,7745	0,1578	41,4700
0,0518	31,9999	0,1333	48,3573	0,1578	45,7745
0,0544	31,1389	0,1359	48,3573	0,1552	44,9136
0,0518	31,9999	0,1359	46,6355	0,1578	44,9136
0,0544	31,9999	0,1359	47,4964	0,1604	44,9136
0,0518	31,9999	0,1359	48,3573	0,1552	42,3309
0,0544	29,4171	0,1385	46,6355	0,1630	40,6090
0,0518	31,1389	0,1359	48,3573	0,1630	43,1918
0,0544	31,9999	0,1411	49,2182	0,1630	44,9136
0,0596	31,1389	0,1411	49,2182	0,1630	44,0527
0,0596	32,8608	0,1411	48,3573	0,1630	42,3309
0,0621	33,7217	0,1411	49,2182	0,1630	41,4700
0,0596	33,7217	0,1437	50,0791	0,1630	41,4700
0,0570	33,7217	0,1437	50,0791	0,1682	46,6355
0,0570	32,8608	0,1462	49,2182	0,1682	44,9136
0,0647	36,3044	0,1488	50,9401	0,1682	41,4700
0,0647	35,4435	0,1488	49,2182	0,1682	44,0527
0,0570	33,7217	0,1488	48,3573	0,1707	46,6355
0,0647	35,4435	0,1462	49,2182	0,1682	44,0527
0,0647	34,5826	0,1462	48,3573	0,1707	46,6355
0,0699	39,7481	0,1514	49,2182	0,1707	44,9136
0,0647	37,1654	0,1514	47,4964	0,1733	42,3309
0,0699	37,1654	0,1488	47,4964	0,1707	42,3309
0,0699	38,8872	0,1540	47,4964	0,1759	41,4700
0,0699	38,0263	0,1514	48,3573	0,1759	43,1918
0,0699	40,6090	0,1514	48,3573	0,1759	44,0527
0,0751	38,8872	0,1540	50,0791	0,1759	42,3309
0,0725	38,8872	0,1540	49,2182	0,1785	42,3309
0,0751	38,8872	0,1540	50,9401	0,1811	42,3309
0,0673	40,6090	0,1566	49,2182	0,1759	43,1918
0,0751	40,6090	0,1592	48,3573	0,1811	44,0527
0,0776	43,1918	0,1566	47,4964	0,1759	42,3309
0,0802	41,4700	0,1566	51,8010	0,1811	43,1918

0,0802	39,7481	0,1617	50,9401	0,1811	43,1918
0,0776	40,6090	0,1617	49,2182	0,1837	41,4700
0,0776	41,4700	0,1617	49,2182	0,1837	39,7481
0,0802	43,1918	0,1592	51,8010	0,1862	42,3309
0,0802	44,0527	0,1643	50,9401	0,1862	42,3309
0,0828	44,0527	0,1643	52,6619	0,1888	43,1918
0,0828	43,1918	0,1643	52,6619	0,1862	42,3309
0,0854	42,3309	0,1669	53,5228	0,1888	42,3309
0,0880	44,9136	0,1643	52,6619	0,1888	43,1918
0,0828	41,4700	0,1617	52,6619	0,1914	44,0527
0,0776	44,9136	0,1669	56,1056	0,1914	44,0527
0,0880	45,7745	0,1695	50,9401	0,1940	44,0527
0,0854	44,0527	0,1695	51,8010	0,1888	42,3309
0,0906	46,6355	0,1746	56,1056	0,1940	44,0527
0,0906	44,9136	0,1721	52,6619	0,1914	43,1918
0,0906	46,6355	0,1695	52,6619	0,1940	43,1918
0,0957	47,4964	0,1721	50,9401	0,1992	42,3309
0,0957	44,9136	0,1721	51,8010	0,1966	43,1918
0,0931	49,2182	0,1772	54,3837	0,1992	44,9136
0,0957	48,3573	0,1746	53,5228	0,1992	43,1918
0,0957	49,2182	0,1772	51,8010	0,1992	42,3309
0,0931	49,2182	0,1772	53,5228	0,2017	44,0527
0,0957	47,4964	0,1798	54,3837	0,2017	44,0527
0,0983	49,2182	0,1772	52,6619	0,1992	42,3309
0,0983	48,3573	0,1772	50,9401	0,2017	44,9136
0,0983	50,9401	0,1824	50,9401	0,2043	42,3309
0,0983	49,2182	0,1798	52,6619	0,2043	42,3309
0,0983	50,9401	0,1798	53,5228	0,2043	42,3309
0,0983	50,0791	0,1824	53,5228	0,2043	42,3309
0,1009	50,9401	0,1824	55,2446	0,2095	41,4700
0,1035	50,0791	0,1850	56,1056	0,2069	43,1918
0,0983	53,5228	0,1824	55,2446	0,2095	43,1918
0,1035	50,9401	0,1876	55,2446	0,2095	40,6090
0,1035	50,9401	0,1850	54,3837	0,2121	42,3309
0,1086	51,8010	0,1901	54,3837	0,2095	38,8872
0,1086	50,9401	0,1876	56,1056	0,2121	39,7481
0,1086	53,5228	0,1901	56,9665	0,2121	40,6090
0,1086	55,2446	0,1927	55,2446	0,2121	39,7481

0,1112	52,6619	0,1901	57,8274	0,2146	39,7481
0,1112	54,3837	0,1901	56,9665	0,2172	40,6090
0,1138	53,5228	0,1927	57,8274	0,2121	40,6090
0,1138	52,6619	0,1927	56,1056	0,2172	39,7481
0,1164	57,8274	0,1953	56,9665	0,2172	40,6090
0,1086	51,8010	0,1953	56,1056	0,2198	40,6090
0,1138	53,5228	0,1979	57,8274	0,2198	39,7481
0,1164	52,6619	0,1979	56,9665	0,2172	43,1918
0,1190	57,8274	0,1979	57,8274	0,2198	39,7481
0,1164	56,1056	0,2005	56,1056	0,2198	42,3309
0,1190	56,9665	0,2005	58,6883	0,2250	42,3309
0,1190	56,9665	0,2005	57,8274	0,2172	42,3309
0,1190	54,3837	0,2056	57,8274	0,2250	38,8872
0,1215	59,5492	0,2031	56,1056	0,2224	41,4700
0,1190	56,9665	0,2005	57,8274	0,2250	38,8872
0,1241	57,8274	0,2005	55,2446	0,2276	41,4700
0,1215	58,6883	0,2056	57,8274	0,2301	39,7481
0,1241	60,4102	0,2056	56,1056	0,2276	40,6090
0,1241	58,6883	0,2082	56,9665	0,2301	38,8872
0,1267	58,6883	0,2056	55,2446	0,2327	38,8872
0,1241	58,6883	0,2082	56,9665	0,2327	39,7481
0,1190	56,9665	0,2160	57,8274	0,2327	39,7481
0,1267	58,6883	0,2082	57,8274	0,2327	40,6090
0,1293	58,6883	0,2108	58,6883	0,2327	38,8872
0,1319	62,9929	0,2160	58,6883	0,2379	38,8872
0,1293	61,2711	0,2134	58,6883	0,2379	37,1654
0,1319	59,5492	0,2160	56,9665	0,2353	39,7481
0,1293	64,7148	0,2134	57,8274	0,2405	38,0263
0,1345	60,4102	0,2160	59,5492	0,2379	38,0263
0,1345	60,4102	0,2134	60,4102	0,2405	39,7481
0,1345	63,8538	0,2160	59,5492	0,2431	40,6090
0,1345	62,1320	0,2160	57,8274	0,2431	38,8872
0,1422	62,1320	0,2186	60,4102	0,2405	39,7481
0,1396	62,1320	0,2186	61,2711	0,2405	39,7481
0,1422	63,8538	0,2211	60,4102	0,2456	37,1654
0,1370	63,8538	0,2211	59,5492	0,2456	38,0263
0,1422	62,9929	0,2263	59,5492	0,2431	38,8872
0,1396	62,9929	0,2211	60,4102	0,2456	39,7481

0,1396	64,7148	0,2237	62,1320	0,2456	39,7481
0,1422	61,2711	0,2237	61,2711	0,2508	39,7481
0,1448	63,8538	0,2237	57,8274	0,2456	38,8872
0,1448	64,7148	0,2263	61,2711	0,2482	38,8872
0,1474	62,9929	0,2237	58,6883	0,2508	38,0263
0,1474	64,7148	0,2263	60,4102	0,2508	40,6090
0,1448	65,5757	0,2289	61,2711	0,2508	40,6090
0,1474	65,5757	0,2315	60,4102	0,2534	40,6090
0,1525	65,5757	0,2263	58,6883	0,2534	38,8872
0,1500	68,1584	0,2289	60,4102	0,2534	38,0263
0,1525	69,0193	0,2315	60,4102	0,2534	38,0263
0,1500	67,2975	0,2315	61,2711	0,2534	37,1654
0,1525	68,1584	0,2315	59,5492	0,2586	38,8872
0,1525	68,1584	0,2341	60,4102	0,2560	37,1654
0,1525	67,2975	0,2341	59,5492	0,2586	38,0263
0,1525	71,6021	0,2341	60,4102	0,2586	38,8872
0,1551	67,2975	0,2341	62,1320	0,2611	38,0263
0,1551	68,1584	0,2366	61,2711	0,2637	36,3044
0,1525	70,7412	0,2392	59,5492	0,2637	34,5826
0,1577	70,7412	0,2392	60,4102	0,2637	37,1654
0,1577	69,0193	0,2392	63,8538	0,2637	36,3044
0,1577	69,0193	0,2366	62,9929	0,2663	37,1654
0,1603	66,4366	0,2392	62,1320	0,2663	37,1654
0,1603	68,1584	0,2418	61,2711	0,2689	36,3044
0,1603	70,7412	0,2418	62,1320	0,2663	35,4435
0,1629	72,4630	0,2418	62,9929	0,2689	34,5826
0,1629	69,0193	0,2418	62,1320	0,2663	35,4435
0,1629	69,8803	0,2444	63,8538	0,2689	35,4435
0,1655	69,0193	0,2444	62,9929	0,2689	37,1654
0,1655	74,1849	0,2470	63,8538	0,2715	36,3044
0,1680	73,3239	0,2470	62,9929	0,2689	37,1654
0,1680	71,6021	0,2470	62,9929	0,2715	35,4435
0,1655	75,0458	0,2521	63,8538	0,2741	35,4435
0,1680	73,3239	0,2495	62,1320	0,2741	36,3044
0,1655	71,6021	0,2495	64,7148	0,2715	34,5826
0,1680	71,6021	0,2521	62,9929	0,2766	36,3044
0,1706	71,6021	0,2521	63,8538	0,2766	33,7217
0,1706	74,1849	0,2521	63,8538	0,2766	36,3044

0,1758	73,3239	0,2547	62,9929	0,2792	35,4435
0,1732	74,1849	0,2547	62,1320	0,2792	36,3044
0,1732	72,4630	0,2547	61,2711	0,2792	36,3044
0,1706	79,3504	0,2573	62,1320	0,2818	35,4435
0,1784	75,0458	0,2573	62,9929	0,2844	35,4435
0,1784	77,6285	0,2573	62,1320	0,2844	35,4435
0,1758	80,2113	0,2625	64,7148	0,2844	34,5826
0,1784	71,6021	0,2625	62,9929	0,2818	36,3044
0,1784	75,0458	0,2573	63,8538	0,2844	38,0263
0,1809	76,7676	0,2599	64,7148	0,2870	33,7217
0,1835	76,7676	0,2650	63,8538	0,2895	37,1654
0,1809	76,7676	0,2625	64,7148	0,2895	34,5826
0,1835	74,1849	0,2625	62,9929	0,2844	34,5826
0,1835	76,7676	0,2650	64,7148	0,2921	35,4435
0,1861	78,4894	0,2650	65,5757	0,2895	35,4435
0,1861	77,6285	0,2650	64,7148	0,2921	36,3044
0,1861	79,3504	0,2676	64,7148	0,2921	33,7217
0,1861	79,3504	0,2676	64,7148	0,2947	32,8608
0,1887	77,6285	0,2676	63,8538	0,2973	33,7217
0,1887	81,0722	0,2676	65,5757	0,2973	34,5826
0,1887	77,6285	0,2676	63,8538	0,3025	33,7217
0,1887	77,6285	0,2702	65,5757	0,2947	35,4435
0,1939	81,0722	0,2728	68,1584	0,2973	33,7217
0,1913	78,4894	0,2702	66,4366	0,2973	34,5826
0,1939	80,2113	0,2728	67,2975	0,2999	31,1389
0,1939	80,2113	0,2780	65,5757	0,2999	35,4435
0,1964	80,2113	0,2728	65,5757	0,2973	31,9999
0,1964	81,9331	0,2780	65,5757	0,2999	34,5826
0,1939	82,7940	0,2754	67,2975	0,2999	32,8608
0,1964	84,5159	0,2805	67,2975	0,3025	34,5826
0,1964	84,5159	0,2780	69,0193	0,3050	34,5826
0,2016	83,6550	0,2805	66,4366	0,3050	32,8608
0,1964	81,9331	0,2754	64,7148	0,3050	33,7217
0,1964	79,3504	0,2805	63,8538	0,3076	33,7217
0,2016	85,3768	0,2831	63,8538	0,3076	33,7217
0,1990	82,7940	0,2831	64,7148	0,3076	34,5826
0,2042	83,6550	0,2857	64,7148	0,3076	33,7217
0,2042	82,7940	0,2831	64,7148	0,3102	33,7217

0,2042	84,5159	0,2831	64,7148	0,3128	32,8608
0,2042	88,8205	0,2857	62,9929	0,3102	31,9999
0,2042	85,3768	0,2857	65,5757	0,3128	31,1389
0,2094	89,6814	0,2883	63,8538	0,3154	33,7217
0,2068	85,3768	0,2883	65,5757	0,3128	32,8608
0,2068	89,6814	0,2935	64,7148	0,3154	29,4171
0,2119	87,0986	0,2883	64,7148	0,3154	31,9999
0,2119	87,9595	0,2935	66,4366	0,3205	32,8608
0,2119	87,9595	0,2883	63,8538	0,3205	30,2780
0,2119	85,3768	0,2935	64,7148	0,3154	29,4171
0,2119	89,6814	0,2935	67,2975	0,3205	29,4171
0,2119	86,2377	0,2986	66,4366	0,3154	29,4171
0,2145	88,8205	0,2986	67,2975	0,3205	30,2780
0,2145	85,3768	0,2935	66,4366	0,3205	29,4171
0,2145	87,0986	0,2986	66,4366	0,3205	31,1389
0,2197	87,0986	0,2960	66,4366	0,3231	31,9999
0,2171	87,9595	0,2986	68,1584	0,3257	31,1389
0,2171	89,6814	0,3012	69,0193	0,3205	29,4171
0,2249	88,8205	0,3012	66,4366	0,3257	30,2780
0,2197	87,9595	0,2986	67,2975	0,3283	31,1389
0,2197	87,0986	0,2960	69,0193	0,3283	29,4171
0,2223	87,9595	0,3012	69,0193	0,3257	30,2780
0,2249	87,9595	0,3038	68,1584	0,3283	29,4171
0,2223	91,4032	0,3038	66,4366	0,3309	32,8608
0,2249	90,5423	0,3064	63,8538	0,3335	29,4171
0,2249	92,2641	0,3090	66,4366	0,3309	30,2780
0,2223	91,4032	0,3064	65,5757	0,3335	31,9999
0,2249	92,2641	0,3090	67,2975	0,3309	30,2780
0,2300	93,9860	0,3064	67,2975	0,3335	31,9999
0,2300	92,2641	0,3090	63,8538	0,3360	32,8608
0,2300	88,8205	0,3115	63,8538	0,3360	31,1389
0,2274	94,8469	0,3090	65,5757	0,3360	30,2780
0,2300	91,4032	0,3064	64,7148	0,3386	30,2780
0,2352	93,9860	0,3115	63,8538	0,3412	28,5562
0,2300	93,9860	0,3115	63,8538	0,3360	31,1389
0,2300	94,8469	0,3141	63,8538	0,3360	31,1389
0,2352	97,4296	0,3167	67,2975	0,3412	31,1389
0,2326	94,8469	0,3193	65,5757	0,3412	31,9999

0,2352	97,4296	0,3193	63,8538	0,3438	30,2780
0,2352	93,9860	0,3193	66,4366	0,3438	28,5562
0,2352	92,2641	0,3219	67,2975	0,3438	28,5562
0,2378	95,7078	0,3193	67,2975	0,3464	28,5562
0,2378	98,2906	0,3193	68,1584	0,3438	28,5562
0,2378	93,1251	0,3219	67,2975	0,3515	29,4171
0,2404	93,9860	0,3219	66,4366	0,3490	31,1389
0,2404	94,8469	0,3270	68,1584	0,3490	31,1389
0,2378	95,7078	0,3167	69,0193	0,3490	26,8343
0,2429	98,2906	0,3244	68,1584	0,3464	27,6953
0,2429	96,5687	0,3270	67,2975	0,3515	27,6953
0,2455	97,4296	0,3296	67,2975	0,3490	28,5562
0,2455	98,2906	0,3296	68,1584	0,3515	25,9734
0,2429	97,4296	0,3296	69,0193	0,3541	30,2780
0,2481	96,5687	0,3296	68,1584	0,3515	29,4171
0,2481	93,9860	0,3270	69,0193	0,3541	30,2780
0,2507	95,7078	0,3322	68,1584	0,3515	26,8343
0,2507	95,7078	0,3296	67,2975	0,3567	27,6953
0,2481	97,4296	0,3348	64,7148	0,3567	28,5562
0,2507	96,5687	0,3348	66,4366	0,3593	29,4171
0,2507	96,5687	0,3322	68,1584	0,3515	29,4171
0,2558	99,1515	0,3322	67,2975	0,3593	27,6953
0,2507	100,8733	0,3348	66,4366	0,3619	29,4171
0,2558	98,2906	0,3374	65,5757	0,3619	28,5562
0,2558	101,7342	0,3374	66,4366	0,3593	28,5562
0,2533	100,8733	0,3399	65,5757	0,3619	28,5562
0,2584	102,5952	0,3399	67,2975	0,3619	27,6953
0,2584	98,2906	0,3374	67,2975	0,3670	28,5562
0,2584	99,1515	0,3399	65,5757	0,3619	29,4171
0,2610	99,1515	0,3425	66,4366	0,3644	27,6953
0,2610	97,4296	0,3425	65,5757	0,3670	29,4171
0,2584	104,3170	0,3451	67,2975	0,3670	25,9734
0,2584	103,4561	0,3451	65,5757	0,3670	26,8343
0,2636	104,3170	0,3451	66,4366	0,3670	25,9734
0,2610	102,5952	0,3477	67,2975	0,3696	27,6953
0,2636	102,5952	0,3503	66,4366	0,3748	26,8343
0,2662	103,4561	0,3477	67,2975	0,3722	24,2516
0,2636	104,3170	0,3503	67,2975	0,3696	25,9734

0,2662	103,4561	0,3503	68,1584	0,3748	25,1125
0,2636	106,8998	0,3503	66,4366	0,3748	25,9734
0,2688	106,8998	0,3529	67,2975	0,3748	25,9734
0,2688	100,8733	0,3529	69,0193	0,3774	27,6953
0,2713	103,4561	0,3503	67,2975	0,3774	26,8343
0,2636	104,3170	0,3503	67,2975	0,3774	25,9734
0,2688	104,3170	0,3529	67,2975	0,3774	26,8343
0,2765	106,0388	0,3529	68,1584	0,3799	27,6953
0,2713	104,3170	0,3554	66,4366	0,3799	26,8343
0,2713	102,5952	0,3580	68,1584	0,3825	28,5562
0,2739	101,7342	0,3580	67,2975	0,3851	26,8343
0,2765	101,7342	0,3580	67,2975	0,3799	27,6953
0,2765	106,0388	0,3606	66,4366	0,3825	26,8343
0,2791	102,5952	0,3580	68,1584	0,3851	28,5562
0,2765	106,8998	0,3606	67,2975	0,3877	29,4171
0,2817	103,4561	0,3658	66,4366	0,3877	26,8343
0,2817	109,4825	0,3658	65,5757	0,3877	26,8343
0,2817	106,0388	0,3632	64,7148	0,3903	27,6953
0,2868	104,3170	0,3658	66,4366	0,3903	27,6953
0,2791	105,1779	0,3658	67,2975	0,3851	26,8343
0,2791	103,4561	0,3709	65,5757	0,3903	27,6953
0,2843	108,6216	0,3658	63,8538	0,3903	26,8343
0,2868	106,8998	0,3709	64,7148	0,3903	26,8343
0,2843	109,4825	0,3684	64,7148	0,3903	26,8343
0,2868	110,3434	0,3684	66,4366	0,3903	26,8343
0,2894	109,4825	0,3709	63,8538	0,3954	26,8343
0,2894	109,4825	0,3709	64,7148	0,3954	25,9734
0,2868	111,2043	0,3761	66,4366	0,3954	24,2516
0,2894	107,7607	0,3709	66,4366	0,3954	25,1125
0,2920	107,7607	0,3761	67,2975	0,3954	25,9734
0,2920	107,7607	0,3735	67,2975	0,4006	25,1125
0,2920	111,2043	0,3735	65,5757	0,3980	24,2516
0,2946	111,2043	0,3787	65,5757	0,4006	22,5297
0,2920	111,2043	0,3761	64,7148	0,3980	23,3907
0,2946	112,0653	0,3761	66,4366	0,4032	24,2516
0,2946	110,3434	0,3787	65,5757	0,4058	26,8343
0,2972	110,3434	0,3787	67,2975	0,4032	24,2516
0,2972	109,4825	0,3787	65,5757	0,4058	26,8343

0,2972	111,2043	0,3838	65,5757	0,4032	25,1125
0,2998	108,6216	0,3813	66,4366	0,4058	24,2516
0,2998	106,0388	0,3916	66,4366	0,4032	25,1125
0,2972	111,2043	0,3813	66,4366	0,4109	27,6953
0,2998	112,0653	0,3864	68,1584	0,4084	27,6953
0,3023	106,8998	0,3864	67,2975	0,4084	25,1125
0,3023	108,6216	0,3864	65,5757	0,4084	25,9734
0,3049	112,0653	0,3864	63,8538	0,4109	25,9734
0,3075	111,2043	0,3890	65,5757	0,4109	24,2516
0,3075	113,7871	0,3890	63,8538	0,4135	25,9734
0,3075	113,7871	0,3916	64,7148	0,4109	25,1125
0,3075	113,7871	0,3890	64,7148	0,4135	26,8343
0,3075	114,6480	0,3942	64,7148	0,4161	25,9734
0,3101	110,3434	0,3890	62,9929	0,4161	26,8343
0,3075	111,2043	0,3968	63,8538	0,4161	26,8343
0,3127	112,0653	0,3890	62,1320	0,4187	25,9734
0,3101	115,5089	0,3968	62,9929	0,4135	25,1125
0,3178	113,7871	0,3942	62,1320	0,4161	26,8343
0,3127	113,7871	0,3968	61,2711	0,4187	25,1125
0,3178	113,7871	0,3968	62,9929	0,4213	25,1125
0,3178	114,6480	0,3942	62,9929	0,4187	24,2516
0,3178	112,9262	0,3993	63,8538	0,4213	23,3907
0,3178	112,0653	0,4019	64,7148	0,4213	23,3907
0,3152	113,7871	0,4045	63,8538	0,4213	24,2516
0,3204	113,7871	0,4019	63,8538	0,4264	23,3907
0,3204	118,0917	0,4019	63,8538	0,4238	24,2516
0,3178	117,2308	0,3993	66,4366	0,4290	23,3907
0,3230	115,5089	0,4045	62,9929	0,4238	23,3907
0,3204	118,0917	0,4071	64,7148	0,4290	23,3907
0,3256	115,5089	0,4071	62,1320	0,4290	22,5297
0,3230	119,8135	0,4097	63,8538	0,4264	22,5297
0,3230	112,0653	0,4071	62,1320	0,4316	20,8079
0,3230	114,6480	0,4071	65,5757	0,4290	23,3907
0,3256	115,5089	0,4097	63,8538	0,4316	23,3907
0,3282	118,0917	0,4097	62,9929	0,4316	25,1125
0,3256	112,9262	0,4123	61,2711	0,4368	25,1125
0,3307	113,7871	0,4123	62,9929	0,4342	25,1125
0,3256	118,9526	0,4148	62,1320	0,4342	23,3907

0,3307	118,0917	0,4123	63,8538	0,4368	25,1125
0,3307	118,9526	0,4148	62,9929	0,4368	21,6688
0,3307	115,5089	0,4174	61,2711	0,4342	25,1125
0,3333	117,2308	0,4148	62,9929	0,4393	23,3907
0,3359	118,9526	0,4200	60,4102	0,4393	23,3907
0,3333	118,9526	0,4148	61,2711	0,4393	24,2516
0,3333	118,0917	0,4200	62,1320	0,4393	25,1125
0,3385	115,5089	0,4174	60,4102	0,4393	23,3907
0,3359	118,0917	0,4200	58,6883	0,4419	25,9734
0,3411	118,9526	0,4200	61,2711	0,4419	23,3907
0,3385	118,9526	0,4200	61,2711	0,4445	24,2516
0,3411	120,6744	0,4226	60,4102	0,4471	23,3907
0,3437	119,8135	0,4278	59,5492	0,4445	23,3907
0,3359	120,6744	0,4252	59,5492	0,4471	23,3907
0,3411	115,5089	0,4200	61,2711	0,4471	21,6688
0,3437	118,0917	0,4252	61,2711	0,4497	21,6688
0,3437	117,2308	0,4278	58,6883	0,4523	24,2516
0,3437	116,3699	0,4278	60,4102	0,4548	22,5297
0,3462	114,6480	0,4278	58,6883	0,4523	23,3907
0,3488	118,0917	0,4278	62,1320	0,4497	21,6688
0,3514	115,5089	0,4329	59,5492	0,4523	22,5297
0,3488	117,2308	0,4303	59,5492	0,4548	21,6688
0,3514	113,7871	0,4278	58,6883	0,4548	23,3907
0,3488	118,0917	0,4329	57,8274	0,4574	22,5297
0,3540	119,8135	0,4355	62,1320	0,4548	22,5297
0,3540	118,9526	0,4355	59,5492	0,4574	20,8079
0,3540	118,0917	0,4329	59,5492	0,4600	22,5297
0,3540	112,9262	0,4355	58,6883	0,4574	23,3907
0,3540	118,9526	0,4381	57,8274	0,4600	21,6688
0,3566	116,3699	0,4381	58,6883	0,4600	20,8079
0,3566	115,5089	0,4381	58,6883	0,4600	24,2516
0,3592	118,9526	0,4407	58,6883	0,4600	22,5297
0,3566	118,0917	0,4381	58,6883	0,4626	19,9470
0,3592	118,0917	0,4407	57,8274	0,4626	20,8079
0,3592	118,9526	0,4407	58,6883	0,4600	22,5297
0,3617	118,0917	0,4407	59,5492	0,4626	23,3907
0,3643	119,8135	0,4407	57,8274	0,4678	22,5297
0,3617	115,5089	0,4433	57,8274	0,4652	21,6688

0,3643	116,3699	0,4433	58,6883	0,4652	25,1125
0,3643	118,0917	0,4458	56,1056	0,4678	21,6688
0,3643	118,9526	0,4458	55,2446	0,4729	22,5297
0,3695	118,0917	0,4484	56,9665	0,4703	21,6688
0,3669	117,2308	0,4458	53,5228	0,4703	20,8079
0,3695	118,0917	0,4484	56,1056	0,4703	22,5297
0,3721	116,3699	0,4510	54,3837	0,4729	19,9470
0,3695	119,8135	0,4510	56,9665	0,4729	19,9470
0,3695	115,5089	0,4510	54,3837	0,4729	21,6688
0,3721	120,6744	0,4536	56,9665	0,4755	20,8079
0,3721	116,3699	0,4536	55,2446	0,4755	21,6688
0,3721	118,0917	0,4536	54,3837	0,4781	20,8079
0,3721	117,2308	0,4536	55,2446	0,4781	18,2252
0,3798	115,5089	0,4562	55,2446	0,4781	20,8079
0,3747	115,5089	0,4562	51,8010	0,4833	19,9470
0,3798	117,2308	0,4562	53,5228	0,4781	20,8079
0,3772	121,5354	0,4587	56,9665	0,4807	20,8079
0,3798	116,3699	0,4613	56,1056	0,4781	19,0861
0,3772	118,0917	0,4613	54,3837	0,4781	20,8079
0,3798	117,2308	0,4639	54,3837	0,4858	19,9470
0,3798	117,2308	0,4639	56,1056	0,4833	21,6688
0,3798	116,3699	0,4639	54,3837	0,4833	19,9470
0,3824	118,9526	0,4613	56,1056	0,4833	21,6688
0,3824	118,9526	0,4639	54,3837	0,4858	19,0861
0,3824	114,6480	0,4639	55,2446	0,4858	20,8079
0,3850	116,3699	0,4665	53,5228	0,4807	19,9470
0,3901	117,2308	0,4691	55,2446	0,4910	19,9470
0,3850	116,3699	0,4691	53,5228		
0,3876	114,6480	0,4665	53,5228		
0,3850	116,3699	0,4691	52,6619		
0,3901	117,2308	0,4665	52,6619		
0,3876	117,2308	0,4691	52,6619		
0,3901	119,8135	0,4691	51,8010		
0,3876	117,2308	0,4717	51,8010		
0,3901	116,3699	0,4742	50,9401		
0,3901	114,6480	0,4742	53,5228		
0,3953	118,9526	0,4768	50,9401		
0,3979	118,0917	0,4717	48,3573		

0,3953	116,3699	0,4846	50,0791		
0,3953	120,6744	0,4794	50,0791		
0,3927	115,5089	0,4846	49,2182		
0,3953	112,9262	0,4794	50,0791		
0,3979	114,6480	0,4820	50,0791		
0,3979	118,0917	0,4820	50,9401		
0,4005	117,2308	0,4794	48,3573		
0,4031	115,5089	0,4846	50,0791		
0,3979	116,3699	0,4820	50,9401		
0,4031	117,2308	0,4846	49,2182		
0,4031	118,0917	0,4846	50,0791		
0,4056	117,2308	0,4820	50,0791		
0,4056	118,0917	0,4846	50,0791		
0,4082	114,6480	0,4820	50,0791		
0,4082	113,7871	0,4872	49,2182		
0,4082	113,7871	0,4872	50,9401		
0,4056	112,0653	0,4872	51,8010		
0,4082	113,7871	0,4923	50,9401		
0,4082	112,0653	0,4949	50,9401		
0,4082	113,7871	0,4897	50,0791		
0,4108	112,0653	0,4975	48,3573		
0,4134	108,6216	0,4923	47,4964		
0,4082	113,7871	0,4975	49,2182		
0,4160	114,6480	0,4949	49,2182		
0,4160	115,5089	0,4975	50,0791		
0,4186	112,9262	0,4975	47,4964		
0,4186	112,0653	0,4975	44,0527		
0,4134	112,0653	0,5001	44,9136		
0,4186	110,3434	0,4975	47,4964		
0,4211	113,7871	0,4975	45,7745		
0,4211	110,3434	0,4975	46,6355		
0,4211	114,6480	0,5001	45,7745		
0,4211	112,0653	0,5052	44,0527		
0,4237	114,6480				
0,4237	112,9262				
0,4237	108,6216				
0,4263	111,2043				
0,4263	112,0653				

0,4263	111,2043				
0,4263	109,4825				
0,4289	109,4825				
0,4289	107,7607				
0,4289	107,7607				
0,4263	109,4825				
0,4315	106,8998				
0,4341	108,6216				
0,4366	108,6216				
0,4341	107,7607				
0,4366	106,8998				
0,4366	106,0388				
0,4392	105,1779				
0,4366	106,8998				
0,4418	108,6216				
0,4366	102,5952				
0,4418	108,6216				
0,4392	106,0388				
0,4418	109,4825				
0,4418	103,4561				
0,4444	106,0388				
0,4392	101,7342				
0,4470	104,3170				
0,4521	101,7342				
0,4495	102,5952				
0,4470	104,3170				
0,4470	103,4561				
0,4521	105,1779				
0,4495	104,3170				
0,4547	102,5952				
0,4521	106,0388				
0,4521	105,1779				
0,4547	106,8998				
0,4547	104,3170				
0,4547	104,3170				
0,4547	100,8733				
0,4547	100,8733				
0,4573	105,1779				

0,4573	101,7342				
0,4625	102,5952				
0,4599	101,7342				
0,4599	100,8733				
0,4599	97,4296				
0,4650	102,5952				
0,4625	100,8733				
0,4650	99,1515				
0,4625	100,0124				
0,4625	98,2906				
0,4650	101,7342				
0,4676	97,4296				
0,4676	100,8733				
0,4676	99,1515				
0,4728	98,2906				
0,4676	97,4296				
0,4728	98,2906				
0,4728	99,1515				
0,4754	96,5687				
0,4728	100,0124				
0,4754	97,4296				
0,4754	98,2906				
0,4780	96,5687				
0,4780	98,2906				
0,4754	100,0124				
0,4805	98,2906				
0,4780	96,5687				
0,4805	96,5687				
0,4805	95,7078				
0,4831	96,5687				
0,4831	95,7078				
0,4831	95,7078				
0,4831	92,2641				
0,4883	92,2641				
0,4831	91,4032				
0,4883	94,8469				
0,4883	91,4032				
0,4883	94,8469				

0,4857	90,5423				
0,4909	93,1251				
0,4909	91,4032				
0,4909	90,5423				
0,4909	92,2641				
0,4935	90,5423				
0,4986	92,2641				
0,4935	87,9595				
0,4935	91,4032				
0,4960	91,4032				
0,4960	89,6814				
0,4960	89,6814				
0,4986	89,6814				
0,4986	88,8205				
0,4986	88,8205				
0,5012	92,2641				
0,5038	89,6814				

Tableau-A I-4 Résultats de l'essai SCB pour différentes longueurs de fissures pour MR7

MR7					
25 mm		32 mm		38 mm	
Déplacement (mm)	Force (N)	Déplacement (mm)	Force (N)	Déplacement (mm)	Force (N)
0,0000	4,450	0,0000	0,0000	0,0000	3,5895
0,0155	11,338	0,0595	38,8872	0,1240	50,0791
0,0258	17,364	0,0569	38,0263	0,1679	111,2043
0,0413	19,086	0,0517	37,1654	0,1601	109,4825
0,0465	25,113	0,0517	38,0263	0,1627	107,7607
0,0491	26,834	0,0491	34,5826	0,1627	105,1779
0,0542	26,834	0,0517	34,5826	0,1575	102,5952
0,0568	29,417	0,0466	37,1654	0,1550	99,1515
0,0568	28,556	0,0491	38,0263	0,1575	97,4296
0,0594	31,139	0,0517	36,3044	0,1575	94,8469
0,0594	30,278	0,0517	38,8872	0,1498	92,2641
0,0620	32,000	0,0517	39,7481	0,1498	90,5423
0,0594	31,139	0,0543	38,8872	0,1446	87,0986
0,0672	30,278	0,0595	40,6090	0,1446	84,5159
0,0620	31,139	0,0569	38,8872	0,1395	82,7940

0,0620	31,139	0,0569	40,6090	0,1446	81,0722
0,0620	30,278	0,0595	41,4700	0,1369	79,3504
0,0620	29,417	0,0569	42,3309	0,1369	77,6285
0,0620	31,139	0,0569	44,0527	0,1317	75,0458
0,0646	32,000	0,0595	43,1918	0,1317	72,4630
0,0646	30,278	0,0595	44,9136	0,1291	70,7412
0,0646	32,000	0,0621	45,7745	0,1317	71,6021
0,0620	30,278	0,0621	46,6355	0,1240	69,0193
0,0646	29,417	0,0646	45,7745	0,1214	65,5757
0,0646	31,139	0,0646	44,9136	0,1214	62,9929
0,0646	32,000	0,0621	44,9136	0,1188	62,1320
0,0620	31,139	0,0646	49,2182	0,1136	56,1056
0,0620	29,417	0,0621	49,2182	0,1136	58,6883
0,0646	32,000	0,0672	49,2182	0,1162	60,4102
0,0646	31,139	0,0672	49,2182	0,1162	62,1320
0,0620	31,139	0,0698	50,0791	0,1162	64,7148
0,0646	31,139	0,0672	52,6619	0,1136	64,7148
0,0646	30,278	0,0698	50,9401	0,1162	64,7148
0,0620	29,417	0,0698	52,6619	0,1214	65,5757
0,0646	31,139	0,0698	54,3837	0,1162	65,5757
0,0620	31,139	0,0776	54,3837	0,1162	67,2975
0,0620	30,278	0,0750	54,3837	0,1214	68,1584
0,0620	31,139	0,0776	53,5228	0,1214	69,0193
0,0646	31,139	0,0750	52,6619	0,1214	69,8803
0,0672	31,139	0,0750	54,3837	0,1240	69,8803
0,0620	30,278	0,0776	55,2446	0,1266	69,8803
0,0620	30,278	0,0776	56,9665	0,1240	71,6021
0,0646	30,278	0,0801	56,1056	0,1291	71,6021
0,0646	30,278	0,0801	57,8274	0,1240	70,7412
0,0646	30,278	0,0801	55,2446	0,1266	72,4630
0,0646	31,139	0,0827	56,9665	0,1291	73,3239
0,0620	30,278	0,0905	59,5492	0,1291	72,4630
0,0646	30,278	0,0827	59,5492	0,1291	73,3239
0,0646	30,278	0,0853	60,4102	0,1343	76,7676
0,0646	32,000	0,0827	58,6883	0,1291	75,9067
0,0646	29,417	0,0879	58,6883	0,1317	75,9067
0,0594	30,278	0,0853	59,5492	0,1317	76,7676
0,0620	30,278	0,0853	60,4102	0,1369	75,9067

0,0646	32,000	0,0879	62,1320	0,1343	77,6285
0,0672	31,139	0,0930	64,7148	0,1343	79,3504
0,0672	32,000	0,0905	65,5757	0,1343	79,3504
0,0646	32,861	0,0905	65,5757	0,1395	80,2113
0,0646	32,861	0,0905	63,8538	0,1369	81,9331
0,0672	30,278	0,0905	64,7148	0,1369	81,0722
0,0646	30,278	0,0905	64,7148	0,1395	83,6550
0,0620	31,139	0,0956	65,5757	0,1420	83,6550
0,0646	32,000	0,0982	64,7148	0,1395	83,6550
0,0697	32,000	0,0956	66,4366	0,1420	84,5159
0,0672	31,139	0,0982	68,1584	0,1472	85,3768
0,0594	32,000	0,0982	67,2975	0,1420	86,2377
0,0672	31,139	0,0982	69,0193	0,1446	87,9595
0,0672	32,861	0,0982	69,0193	0,1472	86,2377
0,0646	31,139	0,0982	69,8803	0,1446	87,9595
0,0646	29,417	0,1008	71,6021	0,1472	88,8205
0,0697	32,861	0,1034	71,6021	0,1472	88,8205
0,0646	31,139	0,1034	71,6021	0,1498	86,2377
0,0646	31,139	0,1008	69,8803	0,1524	89,6814
0,0646	32,000	0,1034	72,4630	0,1498	89,6814
0,0672	31,139	0,1060	70,7412	0,1524	87,9595
0,0672	32,000	0,1060	73,3239	0,1524	91,4032
0,0646	31,139	0,1060	71,6021	0,1550	88,8205
0,0672	32,000	0,1060	73,3239	0,1524	90,5423
0,0672	31,139	0,1111	75,0458	0,1524	91,4032
0,0672	32,000	0,1085	75,0458	0,1550	92,2641
0,0672	32,861	0,1111	75,9067	0,1575	93,1251
0,0646	32,000	0,1085	74,1849	0,1550	93,1251
0,0697	31,139	0,1137	76,7676	0,1575	93,9860
0,0646	32,000	0,1111	75,9067	0,1575	94,8469
0,0672	32,861	0,1137	76,7676	0,1627	93,9860
0,0672	32,000	0,1085	75,9067	0,1627	95,7078
0,0697	32,000	0,1137	78,4894	0,1627	96,5687
0,0697	32,861	0,1137	77,6285	0,1627	96,5687
0,0672	32,861	0,1137	76,7676	0,1627	96,5687
0,0672	34,583	0,1189	81,0722	0,1627	96,5687
0,0723	33,722	0,1163	81,9331	0,1679	100,0124
0,0672	33,722	0,1189	81,9331	0,1653	100,8733

0,0697	33,722	0,1215	79,3504	0,1653	98,2906
0,0697	32,861	0,1189	82,7940	0,1653	100,8733
0,0697	33,722	0,1240	83,6550	0,1679	101,7342
0,0672	32,861	0,1215	81,9331	0,1679	99,1515
0,0723	32,861	0,1240	86,2377	0,1705	102,5952
0,0697	34,583	0,1240	83,6550	0,1705	102,5952
0,0697	35,444	0,1266	84,5159	0,1653	106,8998
0,0697	36,304	0,1266	84,5159	0,1730	102,5952
0,0697	33,722	0,1318	85,3768	0,1730	103,4561
0,0723	35,444	0,1240	87,0986	0,1756	104,3170
0,0697	34,583	0,1266	87,0986	0,1756	104,3170
0,0697	34,583	0,1292	89,6814	0,1756	104,3170
0,0723	34,583	0,1292	88,8205	0,1782	104,3170
0,0697	33,722	0,1318	88,8205	0,1756	108,6216
0,0723	35,444	0,1344	88,8205	0,1782	105,1779
0,0723	36,304	0,1318	89,6814	0,1782	105,1779
0,0749	34,583	0,1344	90,5423	0,1808	106,8998
0,0723	35,444	0,1344	90,5423	0,1834	105,1779
0,0723	36,304	0,1344	92,2641	0,1834	106,0388
0,0749	34,583	0,1344	88,8205	0,1834	106,0388
0,0749	35,444	0,1370	90,5423	0,1885	106,8998
0,0749	35,444	0,1370	92,2641	0,1834	100,8733
0,0723	34,583	0,1370	90,5423	0,1885	106,0388
0,0723	36,304	0,1370	90,5423	0,1885	108,6216
0,0749	36,304	0,1395	91,4032	0,1860	107,7607
0,0775	36,304	0,1395	91,4032	0,1885	111,2043
0,0749	36,304	0,1421	93,9860	0,1989	107,7607
0,0749	37,165	0,1395	93,9860	0,1885	108,6216
0,0697	36,304	0,1447	94,8469	0,1989	110,3434
0,0749	36,304	0,1447	96,5687	0,1911	112,9262
0,0775	38,026	0,1473	97,4296	0,1911	112,0653
0,0775	38,887	0,1447	95,7078	0,1860	112,9262
0,0801	38,026	0,1447	98,2906	0,1937	112,0653
0,0775	37,165	0,1473	99,1515	0,1989	113,7871
0,0749	37,165	0,1499	97,4296	0,1937	115,5089
0,0749	38,026	0,1473	95,7078	0,1963	113,7871
0,0801	37,165	0,1525	100,8733	0,1989	115,5089
0,0775	38,887	0,1473	100,8733	0,1963	117,2308

0,0801	38,887	0,1499	100,8733	0,1989	116,3699
0,0801	37,165	0,1525	100,8733	0,1989	116,3699
0,0775	38,026	0,1576	100,0124	0,1989	118,9526
0,0775	38,026	0,1550	101,7342	0,2040	118,0917
0,0801	37,165	0,1499	101,7342	0,1963	118,9526
0,0801	38,887	0,1550	102,5952	0,2040	117,2308
0,0826	37,165	0,1550	100,8733	0,2040	116,3699
0,0801	38,887	0,1602	100,8733	0,2092	117,2308
0,0826	38,887	0,1602	100,8733	0,2040	115,5089
0,0801	39,748	0,1628	100,0124	0,2092	118,0917
0,0801	39,748	0,1602	100,8733	0,2066	120,6744
0,0826	38,887	0,1628	102,5952	0,2092	116,3699
0,0801	39,748	0,1628	100,0124	0,2092	121,5354
0,0801	41,470	0,1628	100,8733	0,2092	120,6744
0,0826	39,748	0,1628	100,8733	0,2092	121,5354
0,0826	40,609	0,1654	100,0124	0,2144	119,8135
0,0775	40,609	0,1602	100,8733	0,2066	120,6744
0,0826	38,887	0,1628	100,0124	0,2169	121,5354
0,0801	38,887	0,1679	102,5952	0,2144	121,5354
0,0801	40,609	0,1679	103,4561	0,2169	122,3963
0,0826	38,887	0,1679	102,5952	0,2169	124,1181
0,0852	39,748	0,1679	101,7342	0,2169	122,3963
0,0801	40,609	0,1731	104,3170	0,2195	123,2572
0,0852	40,609	0,1705	102,5952	0,2169	124,1181
0,0852	41,470	0,1679	105,1779	0,2169	124,1181
0,0852	41,470	0,1757	103,4561	0,2195	121,5354
0,0852	40,609	0,1757	105,1779	0,2221	125,8400
0,0826	41,470	0,1757	105,1779	0,2299	124,1181
0,0826	40,609	0,1731	106,8998	0,2221	124,1181
0,0852	42,331	0,1757	106,0388	0,2247	127,5618
0,0852	42,331	0,1783	105,1779	0,2273	127,5618
0,0852	41,470	0,1783	108,6216	0,2273	127,5618
0,0878	42,331	0,1783	108,6216	0,2299	128,4227
0,0852	42,331	0,1783	109,4825	0,2273	126,7009
0,0852	43,192	0,1834	106,8998	0,2299	130,1445
0,0878	43,192	0,1834	108,6216	0,2273	128,4227
0,0826	41,470	0,1809	107,7607	0,2299	129,2836
0,0852	42,331	0,1834	108,6216	0,2324	129,2836

0,0878	41,470	0,1834	112,0653	0,2350	131,0055
0,0904	43,192	0,1834	109,4825	0,2324	130,1445
0,0878	43,192	0,1860	108,6216	0,2350	127,5618
0,0878	44,053	0,1860	108,6216	0,2350	130,1445
0,0930	44,914	0,1938	108,6216	0,2402	132,7273
0,0852	44,914	0,1886	105,1779	0,2324	130,1445
0,0878	44,914	0,1886	106,8998	0,2376	130,1445
0,0878	44,053	0,1912	108,6216	0,2376	130,1445
0,0904	45,775	0,1912	110,3434	0,2402	129,2836
0,0878	44,053	0,1912	108,6216	0,2402	132,7273
0,0930	44,053	0,1938	107,7607	0,2402	132,7273
0,0930	45,775	0,1912	109,4825	0,2402	133,5882
0,0904	44,914	0,1938	109,4825	0,2376	132,7273
0,0904	45,775	0,1964	109,4825	0,2428	131,8664
0,0878	44,914	0,1964	108,6216	0,2454	132,7273
0,0930	44,914	0,1938	108,6216	0,2454	131,0055
0,0930	44,053	0,2041	110,3434	0,2428	129,2836
0,0904	44,053	0,1964	110,3434	0,2479	131,8664
0,0878	42,331	0,2041	108,6216	0,2454	133,5882
0,0930	41,470	0,2015	111,2043	0,2479	131,0055
0,0878	40,609	0,1989	110,3434	0,2479	136,1710
0,0852	40,609	0,2041	110,3434	0,2505	134,4491
0,0852	38,026	0,2015	113,7871	0,2505	135,3101
0,0826	36,304	0,2041	112,0653	0,2505	137,0319
0,0826	35,444	0,2041	114,6480	0,2479	135,3101
0,0826	36,304	0,2041	114,6480	0,2557	139,6146
0,0801	35,444	0,2041	114,6480	0,2531	137,8928
0,0826	34,583	0,2093	115,5089	0,2531	136,1710
0,0775	33,722	0,2067	114,6480	0,2583	139,6146
0,0775	33,722	0,2093	113,7871	0,2557	134,4491
0,0775	32,861	0,2119	116,3699	0,2557	139,6146
0,0775	31,139	0,2093	116,3699	0,2609	138,7537
0,0775	30,278	0,2144	117,2308	0,2609	137,8928
0,0723	29,417	0,2119	116,3699	0,2583	138,7537
0,0697	27,695	0,2144	116,3699	0,2609	137,0319
0,0723	28,556	0,2144	115,5089	0,2609	138,7537
0,0723	25,973	0,2196	118,0917	0,2609	143,0583
0,0723	25,113	0,2144	115,5089	0,2634	139,6146

0,0672	24,252	0,2119	115,5089	0,2660	137,0319
0,0646	25,113	0,2144	118,9526	0,2660	136,1710
0,0620	23,391	0,2119	115,5089	0,2660	137,8928
0,0620	20,808	0,2144	115,5089	0,2660	139,6146
0,0594	20,808	0,2170	117,2308	0,2686	137,8928
0,0594	20,808	0,2222	118,9526	0,2686	138,7537
0,0594	19,086	0,2196	117,2308	0,2686	136,1710
0,0568	18,225	0,2222	116,3699	0,2660	137,0319
0,0542	18,225	0,2248	117,2308	0,2686	137,0319
0,0542	16,503	0,2248	117,2308	0,2738	139,6146
0,0517	15,642	0,2248	117,2308	0,2738	140,4756
0,0491	15,642	0,2248	115,5089	0,2764	139,6146
0,0465	13,921	0,2248	118,0917	0,2738	139,6146
0,0517	12,199	0,2248	116,3699	0,2764	141,3365
0,0439	12,199	0,2299	116,3699	0,2789	143,0583
0,0413	12,199	0,2299	118,9526	0,2789	141,3365
0,0387	8,755	0,2325	118,9526	0,2764	140,4756
0,0413	9,616	0,2299	118,0917	0,2789	142,1974
0,0362	7,894	0,2299	119,8135	0,2789	138,7537
0,0336	7,033	0,2325	117,2308	0,2815	141,3365
0,0336	7,894	0,2325	117,2308	0,2789	142,1974
0,0310	7,894	0,2325	121,5354	0,2815	142,1974
0,0310	7,033	0,2351	120,6744	0,2815	143,9192
0,0336	6,172	0,2325	122,3963	0,2815	143,0583
0,0336	7,894	0,2351	121,5354	0,2841	142,1974
0,0336	9,616	0,2377	124,1181	0,2841	145,6411
0,0362	8,755	0,2403	121,5354	0,2841	142,1974
0,0362	8,755	0,2403	120,6744	0,2867	142,1974
0,0362	9,616	0,2403	120,6744	0,2867	143,0583
0,0413	9,616	0,2403	120,6744	0,2841	142,1974
0,0439	11,338	0,2428	122,3963	0,2867	141,3365
0,0387	10,477	0,2428	120,6744	0,2893	144,7802
0,0387	12,199	0,2454	121,5354	0,2918	143,9192
0,0387	11,338	0,2454	120,6744	0,2893	145,6411
0,0413	12,199	0,2454	124,1181	0,2918	143,9192
0,0413	13,060	0,2454	122,3963	0,2918	141,3365
0,0465	13,921	0,2454	119,8135	0,2918	143,0583
0,0439	13,921	0,2480	124,9790	0,2918	142,1974

0,0439	16,503	0,2454	121,5354	0,2944	144,7802
0,0465	15,642	0,2480	122,3963	0,2970	144,7802
0,0439	16,503	0,2506	122,3963	0,2970	143,0583
0,0465	15,642	0,2532	120,6744	0,3022	143,0583
0,0491	16,503	0,2506	118,0917	0,2996	145,6411
0,0491	16,503	0,2532	123,2572	0,2996	142,1974
0,0491	18,225	0,2558	122,3963	0,3022	143,0583
0,0491	19,086	0,2532	122,3963	0,2996	143,9192
0,0517	20,808	0,2532	123,2572	0,2996	146,5020
0,0517	17,364	0,2558	126,7009	0,3022	143,9192
0,0491	20,808	0,2558	121,5354	0,3022	144,7802
0,0542	20,808	0,2558	124,9790	0,3073	145,6411
0,0568	19,947	0,2583	123,2572	0,3048	147,3629
0,0568	20,808	0,2583	122,3963	0,3073	146,5020
0,0568	23,391	0,2583	123,2572	0,3073	147,3629
0,0594	22,530	0,2583	125,8400	0,3073	146,5020
0,0594	21,669	0,2635	124,1181	0,3099	143,9192
0,0594	22,530	0,2609	125,8400	0,3073	144,7802
0,0620	24,252	0,2635	125,8400	0,3099	144,7802
0,0620	25,113	0,2661	124,1181	0,3099	145,6411
0,0620	23,391	0,2635	126,7009	0,3125	148,2238
0,0620	24,252	0,2661	127,5618	0,3151	146,5020
0,0646	25,113	0,2661	128,4227	0,3151	144,7802
0,0672	26,834	0,2661	127,5618	0,3125	146,5020
0,0646	27,695	0,2687	126,7009	0,3151	148,2238
0,0672	25,973	0,2713	128,4227	0,3099	144,7802
0,0672	27,695	0,2661	127,5618	0,3125	146,5020
0,0672	26,834	0,2713	128,4227	0,3099	147,3629
0,0723	27,695	0,2713	129,2836	0,3177	148,2238
0,0723	31,139	0,2687	127,5618	0,3177	144,7802
0,0723	29,417	0,2738	127,5618	0,3203	143,9192
0,0697	30,278	0,2635	129,2836	0,3203	143,9192
0,0749	31,139	0,2738	124,1181	0,3228	145,6411
0,0723	32,000	0,2764	125,8400	0,3228	147,3629
0,0749	33,722	0,2790	129,2836	0,3203	145,6411
0,0723	32,000	0,2790	129,2836	0,3228	145,6411
0,0775	33,722	0,2816	129,2836	0,3254	144,7802
0,0801	34,583	0,2816	125,8400	0,3254	144,7802

0,0775	34,583	0,2816	131,0055	0,3254	143,9192
0,0775	34,583	0,2790	128,4227	0,3280	144,7802
0,0801	36,304	0,2790	130,1445	0,3280	143,0583
0,0775	35,444	0,2816	128,4227	0,3280	145,6411
0,0801	37,165	0,2842	129,2836	0,3280	147,3629
0,0801	35,444	0,2842	130,1445	0,3306	146,5020
0,0826	37,165	0,2842	130,1445	0,3306	148,2238
0,0826	36,304	0,2842	128,4227	0,3306	144,7802
0,0852	38,887	0,2842	129,2836	0,3332	147,3629
0,0878	38,887	0,2868	129,2836	0,3332	150,8066
0,0852	40,609	0,2893	131,0055	0,3332	146,5020
0,0878	38,887	0,2919	131,8664	0,3358	149,0848
0,0878	39,748	0,2893	134,4491	0,3383	145,6411
0,0852	38,026	0,2893	132,7273	0,3383	148,2238
0,0878	41,470	0,2919	130,1445	0,3383	149,9457
0,0904	42,331	0,2919	131,0055	0,3383	149,0848
0,0904	40,609	0,2919	131,0055	0,3383	149,0848
0,0904	43,192	0,2945	132,7273	0,3383	148,2238
0,0904	44,053	0,2945	136,1710	0,3409	146,5020
0,0930	44,914	0,2971	132,7273	0,3383	148,2238
0,0930	44,053	0,2945	133,5882	0,3435	149,9457
0,0956	44,914	0,2971	133,5882	0,3435	147,3629
0,0930	44,053	0,2997	136,1710	0,3409	148,2238
0,0956	48,357	0,2997	135,3101	0,3409	146,5020
0,0956	50,940	0,3022	131,0055	0,3461	147,3629
0,0981	49,218	0,3022	134,4491	0,3487	147,3629
0,0981	47,496	0,2997	131,0055	0,3461	144,7802
0,0981	50,079	0,3048	136,1710	0,3538	146,5020
0,1007	49,218	0,3022	133,5882	0,3487	145,6411
0,1033	49,218	0,3048	134,4491	0,3487	145,6411
0,1033	54,384	0,3048	133,5882	0,3512	145,6411
0,1007	51,801	0,3048	133,5882	0,3512	144,7802
0,1059	52,662	0,3074	135,3101	0,3538	144,7802
0,1033	50,940	0,3048	136,1710	0,3538	149,0848
0,1033	52,662	0,3100	135,3101	0,3538	146,5020
0,1136	56,966	0,3126	134,4491	0,3564	148,2238
0,1136	56,106	0,3126	137,0319	0,3564	149,0848
0,1085	55,245	0,3100	137,8928	0,3590	148,2238

0,1085	54,384	0,3100	137,0319	0,3564	146,5020
0,1136	53,523	0,3100	137,8928	0,3564	143,9192
0,1111	56,106	0,3177	134,4491	0,3590	146,5020
0,1111	55,245	0,3126	137,0319	0,3590	148,2238
0,1111	56,966	0,3177	137,8928	0,3590	144,7802
0,1111	58,688	0,3177	137,0319	0,3590	147,3629
0,1136	58,688	0,3177	137,8928	0,3616	148,2238
0,1162	56,106	0,3152	138,7537	0,3616	147,3629
0,1188	60,410	0,3152	138,7537	0,3667	147,3629
0,1162	60,410	0,3177	140,4756	0,3642	148,2238
0,1162	60,410	0,3203	139,6146	0,3745	149,0848
0,1188	59,549	0,3203	139,6146	0,3642	149,0848
0,1214	62,132	0,3152	141,3365	0,3642	148,2238
0,1214	62,993	0,3229	140,4756	0,3693	147,3629
0,1188	62,993	0,3229	140,4756	0,3667	147,3629
0,1240	61,271	0,3255	137,8928	0,3693	147,3629
0,1240	62,993	0,3255	141,3365	0,3693	145,6411
0,1240	62,993	0,3255	140,4756	0,3745	145,6411
0,1240	65,576	0,3255	142,1974	0,3719	147,3629
0,1266	66,437	0,3255	139,6146	0,3719	146,5020
0,1240	69,019	0,3255	140,4756	0,3719	144,7802
0,1266	69,019	0,3281	140,4756	0,3719	145,6411
0,1266	66,437	0,3281	141,3365	0,3771	146,5020
0,1266	68,158	0,3281	141,3365	0,3771	144,7802
0,1266	69,880	0,3307	141,3365	0,3771	145,6411
0,1291	69,880	0,3332	141,3365	0,3797	143,9192
0,1291	69,880	0,3332	141,3365	0,3771	147,3629
0,1343	72,463	0,3358	138,7537	0,3797	143,0583
0,1317	71,602	0,3358	143,0583	0,3797	143,0583
0,1317	73,324	0,3358	143,0583	0,3797	143,9192
0,1317	75,046	0,3358	141,3365	0,3822	145,6411
0,1369	75,046	0,3384	143,0583	0,3822	143,0583
0,1395	74,185	0,3384	142,1974	0,3848	146,5020
0,1369	73,324	0,3410	142,1974	0,3848	146,5020
0,1395	78,489	0,3384	141,3365	0,3848	144,7802
0,1395	76,768	0,3384	145,6411	0,3848	146,5020
0,1369	74,185	0,3410	144,7802	0,3848	146,5020
0,1395	74,185	0,3410	143,9192	0,3900	145,6411

0,1421	76,768	0,3436	148,2238	0,3900	147,3629
0,1421	75,907	0,3410	144,7802	0,3900	145,6411
0,1446	80,211	0,3436	145,6411	0,3874	142,1974
0,1421	76,768	0,3436	146,5020	0,3900	147,3629
0,1446	78,489	0,3487	143,9192	0,3926	145,6411
0,1446	80,211	0,3462	148,2238	0,3926	147,3629
0,1446	81,072	0,3487	146,5020	0,3926	145,6411
0,1472	82,794	0,3487	149,0848	0,3977	144,7802
0,1446	81,072	0,3539	146,5020	0,3952	143,9192
0,1472	80,211	0,3513	144,7802	0,3952	145,6411
0,1498	81,933	0,3539	147,3629	0,3977	146,5020
0,1498	84,516	0,3462	146,5020	0,3926	147,3629
0,1524	84,516	0,3565	145,6411	0,4003	142,1974
0,1524	83,655	0,3539	142,1974	0,3977	143,0583
0,1524	83,655	0,3539	148,2238	0,4003	143,0583
0,1550	87,099	0,3565	146,5020	0,4003	143,0583
0,1550	85,377	0,3539	146,5020	0,4003	143,9192
0,1550	88,820	0,3565	144,7802	0,4055	141,3365
0,1550	87,960	0,3591	148,2238	0,4055	143,0583
0,1524	90,542	0,3591	147,3629	0,4055	143,9192
0,1575	88,820	0,3591	146,5020	0,4055	142,1974
0,1601	88,820	0,3591	146,5020	0,4055	143,9192
0,1601	92,264	0,3591	148,2238	0,4055	140,4756
0,1601	93,125	0,3616	146,5020	0,4081	143,0583
0,1627	92,264	0,3616	147,3629	0,4081	143,0583
0,1601	92,264	0,3616	150,8066	0,4081	140,4756
0,1601	91,403	0,3616	145,6411	0,4107	143,9192
0,1601	96,569	0,3642	148,2238	0,4081	142,1974
0,1627	96,569	0,3668	149,9457	0,4107	142,1974
0,1627	95,708	0,3668	149,9457	0,4132	143,0583
0,1653	93,986	0,3694	151,6675	0,4158	143,0583
0,1653	95,708	0,3746	149,9457	0,4184	145,6411
0,1679	96,569	0,3694	151,6675	0,4184	145,6411
0,1679	98,291	0,3694	148,2238	0,4158	142,1974
0,1679	97,430	0,3668	151,6675	0,4158	143,0583
0,1679	97,430	0,3720	152,5284	0,4184	144,7802
0,1705	98,291	0,3746	150,8066	0,4210	142,1974
0,1730	97,430	0,3720	151,6675	0,4132	143,0583

0,1705	96,569	0,3720	152,5284	0,4184	142,1974
0,1730	98,291	0,3771	153,3893	0,4184	141,3365
0,1730	99,151	0,3720	150,8066	0,4210	143,0583
0,1756	99,151	0,3797	154,2502	0,4261	140,4756
0,1756	101,734	0,3797	153,3893	0,4236	138,7537
0,1756	100,012	0,3771	149,9457	0,4236	140,4756
0,1756	103,456	0,3797	153,3893	0,4261	140,4756
0,1782	100,012	0,3797	153,3893	0,4261	141,3365
0,1782	102,595	0,3823	153,3893	0,4261	137,8928
0,1808	103,456	0,3797	152,5284	0,4287	141,3365
0,1808	106,900	0,3797	153,3893	0,4261	143,0583
0,1808	106,900	0,3823	154,2502	0,4287	137,8928
0,1808	108,622	0,3849	153,3893	0,4339	140,4756
0,1860	107,761	0,3823	153,3893	0,4313	141,3365
0,1808	108,622	0,3849	153,3893	0,4236	137,0319
0,1834	107,761	0,3875	151,6675	0,4313	141,3365
0,1860	112,926	0,3875	152,5284	0,4339	137,8928
0,1834	111,204	0,3875	152,5284	0,4313	137,8928
0,1860	112,926	0,3875	152,5284	0,4365	137,8928
0,1911	112,926	0,3901	152,5284	0,4365	138,7537
0,1860	113,787	0,3901	153,3893	0,4339	138,7537
0,1885	112,926	0,3926	155,1112	0,4365	138,7537
0,1885	114,648	0,3875	155,1112	0,4339	141,3365
0,1911	113,787	0,3952	154,2502	0,4365	140,4756
0,1885	117,231	0,3875	155,1112	0,4416	141,3365
0,1911	115,509	0,3952	155,9721	0,4416	139,6146
0,1911	117,231	0,3952	156,8330	0,4416	141,3365
0,1937	118,092	0,3952	155,1112	0,4442	137,0319
0,1937	118,092	0,3952	156,8330	0,4468	137,0319
0,1937	117,231	0,4004	156,8330	0,4442	137,8928
0,1963	118,953	0,3978	157,6939	0,4442	137,8928
0,1963	121,535	0,4004	156,8330	0,4468	139,6146
0,1989	118,092	0,4004	157,6939	0,4468	135,3101
0,1989	118,953	0,4030	157,6939	0,4468	138,7537
0,1989	118,092	0,4107	156,8330	0,4494	135,3101
0,2015	122,396	0,4030	155,9721	0,4520	135,3101
0,2015	120,674	0,4004	157,6939	0,4494	135,3101
0,2015	121,535	0,4056	156,8330	0,4520	136,1710

0,2066	119,814	0,4030	156,8330	0,4546	138,7537
0,2040	122,396	0,4056	156,8330	0,4546	137,0319
0,2040	124,118	0,4081	156,8330	0,4520	134,4491
0,2066	123,257	0,4081	154,2502	0,4546	137,0319
0,2040	125,840	0,4081	156,8330	0,4597	133,5882
0,2066	126,701	0,4081	156,8330	0,4597	137,0319
0,2066	125,840	0,4081	156,8330	0,4597	136,1710
0,2092	126,701	0,4107	157,6939	0,4546	135,3101
0,2066	128,423	0,4133	156,8330	0,4597	132,7273
0,2092	126,701	0,4133	155,9721	0,4597	134,4491
0,2092	127,562	0,4159	159,4158	0,4597	134,4491
0,2118	130,145	0,4159	156,8330	0,4623	135,3101
0,2144	132,727	0,4133	157,6939	0,4623	135,3101
0,2144	131,005	0,4159	160,2767	0,4623	131,8664
0,2144	131,005	0,4159	157,6939	0,4675	136,1710
0,2169	135,310	0,4185	159,4158	0,4649	134,4491
0,2169	135,310	0,4185	158,5548	0,4675	136,1710
0,2144	132,727	0,4185	157,6939	0,4675	135,3101
0,2195	136,171	0,4211	156,8330	0,4649	134,4491
0,2195	134,449	0,4211	160,2767	0,4701	136,1710
0,2195	137,893	0,4211	161,1376	0,4701	136,1710
0,2221	137,893	0,4236	161,1376	0,4726	132,7273
0,2195	137,032	0,4262	161,1376	0,4726	136,1710
0,2221	138,754	0,4236	161,1376	0,4726	134,4491
0,2221	139,615	0,4262	161,9985	0,4778	134,4491
0,2273	139,615	0,4236	161,1376	0,4726	133,5882
0,2247	140,476	0,4185	160,2767	0,4752	134,4491
0,2195	139,615	0,4288	160,2767	0,4752	131,8664
0,2273	138,754	0,4262	160,2767	0,4778	132,7273
0,2247	141,336	0,4288	161,9985	0,4752	134,4491
0,2273	142,197	0,4288	163,7204	0,4778	131,8664
0,2273	142,197	0,4288	160,2767	0,4778	131,8664
0,2299	143,919	0,4314	161,1376	0,4804	131,8664
0,2299	141,336	0,4340	161,9985	0,4804	132,7273
0,2324	141,336	0,4314	161,1376	0,4804	132,7273
0,2324	143,919	0,4340	161,1376	0,4856	131,8664
0,2324	143,058	0,4365	162,8594	0,4830	131,8664
0,2324	143,919	0,4391	161,1376	0,4856	129,2836

0,2324	143,919	0,4365	160,2767	0,4856	131,8664
0,2376	147,363	0,4417	160,2767	0,4881	131,0055
0,2376	148,224	0,4391	161,9985	0,4881	131,8664
0,2350	149,085	0,4417	159,4158	0,4856	129,2836
0,2376	147,363	0,4417	164,5813	0,4881	130,1445
0,2402	148,224	0,4417	161,1376	0,4881	130,1445
0,2376	149,946	0,4443	161,9985	0,4856	131,0055
0,2376	149,946	0,4417	161,9985	0,4907	130,1445
0,2350	147,363	0,4443	160,2767	0,4933	131,8664
0,2402	152,528	0,4469	161,9985	0,4907	131,0055
0,2428	153,389	0,4417	160,2767	0,4933	131,0055
0,2454	152,528	0,4495	164,5813	0,4933	130,1445
0,2428	155,972	0,4469	163,7204	0,4959	129,2836
0,2479	154,250	0,4469	162,8594	0,4985	130,1445
0,2454	155,111	0,4495	164,5813	0,4959	129,2836
0,2454	157,694	0,4495	162,8594	0,5036	132,7273
0,2505	156,833	0,4546	163,7204	0,4985	131,0055
0,2479	156,833	0,4520	163,7204	0,5010	130,1445
0,2479	155,972	0,4520	164,5813	0,5010	131,0055
0,2479	156,833	0,4572	163,7204	0,4985	124,9790
0,2505	157,694	0,4546	164,5813	0,5036	126,7009
0,2531	158,555	0,4546	165,4422	0,5036	130,1445
0,2531	163,720	0,4520	161,9985	0,5036	127,5618
0,2531	158,555	0,4546	163,7204	0,5062	127,5618
0,2557	161,999	0,4598	167,1640	0,5036	127,5618
0,2583	160,277	0,4572	165,4422	0,5062	125,8400
0,2557	160,277	0,4624	165,4422	0,5062	127,5618
0,2557	161,138	0,4572	167,1640	0,5088	129,2836
0,2609	161,138	0,4624	166,3031	0,5088	125,8400
0,2583	163,720	0,4624	167,1640	0,5088	126,7009
0,2583	166,303	0,4624	166,3031	0,5088	125,8400
0,2583	163,720	0,4624	166,3031	0,5114	127,5618
0,2609	164,581	0,4675	165,4422	0,5114	125,8400
0,2634	165,442	0,4650	167,1640	0,5140	124,9790
0,2609	165,442	0,4675	166,3031	0,5114	125,8400
0,2686	164,581	0,4675	166,3031	0,5140	127,5618
0,2660	167,164	0,4701	164,5813	0,5165	124,9790
0,2634	168,025	0,4701	164,5813	0,5165	121,5354

0,2634	166,303	0,4675	165,4422	0,5140	127,5618
0,2712	168,025	0,4675	166,3031	0,5140	122,3963
0,2660	168,025	0,4701	165,4422	0,5191	125,8400
0,2686	172,330	0,4727	167,1640	0,5191	127,5618
0,2712	172,330	0,4701	164,5813	0,5243	124,9790
0,2712	169,747	0,4727	166,3031	0,5191	124,9790
0,2686	171,469	0,4701	164,5813	0,5243	129,2836
0,2738	173,190	0,4753	166,3031	0,5217	129,2836
0,2738	172,330	0,4753	168,0250	0,5243	125,8400
0,2738	174,051	0,4779	166,3031	0,5243	124,9790
0,2738	173,190	0,4830	167,1640	0,5295	124,1181
0,2738	176,634	0,4779	165,4422	0,5269	126,7009
0,2764	174,051	0,4805	168,8859	0,5295	125,8400
0,2789	176,634	0,4779	166,3031	0,5269	126,7009
0,2789	179,217	0,4805	166,3031	0,5295	124,9790
0,2789	179,217	0,4830	168,0250	0,5320	127,5618
0,2815	179,217	0,4856	168,0250	0,5295	124,1181
0,2789	178,356	0,4856	168,0250	0,5346	123,2572
0,2764	176,634	0,4856	167,1640	0,5320	124,9790
0,2841	178,356	0,4830	166,3031	0,5346	123,2572
0,2841	179,217	0,4856	168,8859	0,5372	123,2572
0,2815	180,078	0,4856	166,3031	0,5346	123,2572
0,2841	180,078	0,4882	168,8859	0,5398	124,9790
0,2867	180,939	0,4856	167,1640	0,5346	124,1181
0,2867	181,800	0,4934	167,1640	0,5372	122,3963
0,2867	180,078	0,4934	169,7468	0,5398	123,2572
0,2867	181,800	0,4908	168,8859	0,5372	122,3963
0,2893	185,243	0,4908	168,0250	0,5424	123,2572
0,2867	185,243	0,4934	168,0250	0,5424	124,1181
0,2893	185,243	0,4934	168,8859	0,5475	121,5354
0,2918	186,965	0,4934	166,3031	0,5424	118,9526
0,2996	184,382	0,4934	168,0250	0,5424	120,6744
0,2944	189,548	0,4960	167,1640	0,5450	120,6744
0,2918	187,826	0,4908	167,1640	0,5450	120,6744
0,2944	188,687	0,4960	166,3031	0,5501	121,5354
0,2944	186,104	0,4960	167,1640	0,5475	120,6744
0,2970	189,548	0,5011	168,8859	0,5501	122,3963
0,2970	186,965	0,4985	170,6077	0,5475	123,2572

0,2996	190,409	0,5011	169,7468	0,5501	122,3963
0,2970	192,131	0,5037	168,8859	0,5527	118,9526
0,2996	191,270	0,5063	168,0250	0,5501	118,9526
0,2996	191,270	0,5063	168,0250	0,5553	122,3963
0,3022	194,713	0,5011	170,6077	0,5527	118,9526
0,3022	193,852	0,5089	167,1640	0,5527	119,8135
0,3022	193,852	0,5089	168,0250	0,5527	120,6744
0,3048	194,713	0,5089	169,7468	0,5553	117,2308
0,3022	193,852	0,5089	169,7468	0,5553	118,9526
0,3073	196,435	0,5114	168,8859	0,5579	122,3963
0,3073	193,852	0,5089	169,7468	0,5553	120,6744
0,3099	196,435	0,5114	170,6077	0,5579	120,6744
0,3048	196,435	0,5140	171,4686	0,5579	119,8135
0,3099	198,157	0,5140	171,4686	0,5630	117,2308
0,3125	196,435	0,5140	168,8859	0,5604	119,8135
0,3099	199,879	0,5140	169,7468	0,5604	119,8135
0,3151	199,879	0,5140	170,6077	0,5630	118,9526
0,3125	196,435	0,5140	169,7468	0,5630	120,6744
0,3151	198,157	0,5166	169,7468	0,5630	118,9526
0,3125	200,740	0,5166	167,1640	0,5656	118,9526
0,3125	199,018	0,5166	168,8859	0,5656	118,0917
0,3151	201,601	0,5192	168,8859	0,5656	120,6744
0,3177	199,018	0,5166	167,1640	0,5682	115,5089
0,3203	202,462	0,5192	169,7468	0,5656	114,6480
0,3177	201,601	0,5218	168,8859	0,5708	118,0917
0,3203	200,740	0,5218	169,7468	0,5708	114,6480
0,3177	203,323	0,5244	168,8859	0,5708	115,5089
0,3228	205,044	0,5218	168,8859	0,5708	118,0917
0,3228	204,184	0,5244	171,4686	0,5708	115,5089
0,3228	207,627	0,5218	169,7468	0,5734	118,9526
0,3177	205,044	0,5269	169,7468	0,5759	117,2308
0,3254	205,044	0,5269	168,8859	0,5734	117,2308
0,3228	205,905	0,5269	172,3295	0,5734	119,8135
0,3254	206,766	0,5295	171,4686	0,5759	117,2308
0,3254	211,071	0,5295	168,0250	0,5785	117,2308
0,3280	209,349	0,5321	172,3295	0,5759	118,0917
0,3306	208,488	0,5321	169,7468	0,5785	117,2308
0,3280	209,349	0,5321	169,7468	0,5811	117,2308

0,3280	211,071	0,5347	169,7468	0,5811	118,0917
0,3306	210,210	0,5347	169,7468	0,5837	117,2308
0,3332	212,793	0,5373	170,6077	0,5811	115,5089
0,3332	211,932	0,5347	170,6077	0,5811	114,6480
0,3358	213,654	0,5399	170,6077	0,5811	115,5089
0,3332	210,210	0,5399	170,6077	0,5837	114,6480
0,3358	210,210	0,5373	168,0250	0,5863	116,3699
0,3358	212,793	0,5450	170,6077	0,5837	118,0917
0,3383	213,654	0,5399	168,8859	0,5863	116,3699
0,3358	210,210	0,5399	170,6077	0,5889	118,0917
0,3409	213,654	0,5424	172,3295	0,5889	112,9262
0,3409	216,236	0,5450	170,6077	0,5889	113,7871
0,3409	214,515	0,5424	169,7468	0,5914	112,9262
0,3383	217,097	0,5450	168,8859	0,5914	113,7871
0,3435	217,958	0,5450	172,3295	0,5914	115,5089
0,3409	215,375	0,5476	169,7468	0,5914	116,3699
0,3461	218,819	0,5502	170,6077	0,5940	113,7871
0,3435	218,819	0,5476	170,6077	0,5940	112,9262
0,3435	217,958	0,5476	169,7468	0,5966	112,9262
0,3461	220,541	0,5476	168,8859	0,5966	112,0653
0,3487	218,819	0,5424	170,6077	0,5966	114,6480
0,3487	222,263	0,5502	168,0250	0,5966	112,0653
0,3487	219,680	0,5502	171,4686	0,5992	111,2043
0,3512	220,541	0,5528	169,7468	0,6018	112,0653
0,3512	223,124	0,5528	168,8859	0,6018	112,0653
0,3512	222,263	0,5528	168,8859	0,6018	112,0653
0,3512	222,263	0,5528	171,4686	0,5992	114,6480
0,3512	226,567	0,5554	171,4686	0,6069	112,0653
0,3512	223,124	0,5579	171,4686	0,6044	114,6480
0,3564	223,985	0,5579	169,7468	0,6018	112,0653
0,3564	225,706	0,5605	171,4686	0,6044	112,9262
0,3564	223,985	0,5605	171,4686	0,6069	113,7871
0,3564	223,124	0,5631	169,7468	0,6069	112,0653
0,3590	224,846	0,5657	169,7468	0,6121	111,2043
0,3616	225,706	0,5631	169,7468	0,6069	108,6216
0,3616	227,428	0,5657	169,7468	0,6095	112,0653
0,3616	228,289	0,5631	168,0250	0,6121	113,7871
0,3590	228,289	0,5657	171,4686	0,6095	108,6216

0,3616	226,567	0,5657	170,6077	0,6121	109,4825
0,3667	230,872	0,5683	173,1905	0,6173	111,2043
0,3642	230,011	0,5683	170,6077	0,6121	109,4825
0,3642	230,011	0,5708	171,4686	0,6121	109,4825
0,3642	229,150	0,5683	174,0514	0,6121	106,8998
0,3642	230,011	0,5657	168,0250	0,6147	110,3434
0,3719	229,150	0,5683	169,7468	0,6173	109,4825
0,3693	230,872	0,5708	173,1905	0,6198	110,3434
0,3667	230,872	0,5708	170,6077	0,6173	106,8998
0,3642	232,594	0,5631	171,4686	0,6198	111,2043
0,3693	230,872	0,5683	169,7468	0,6198	106,0388
0,3719	234,316	0,5760	171,4686	0,6224	109,4825
0,3719	236,037	0,5734	168,8859	0,6224	106,8998
0,3693	235,177	0,5734	172,3295	0,6224	108,6216
0,3771	234,316	0,5760	170,6077	0,6224	108,6216
0,3771	233,455	0,5760	168,8859	0,6224	109,4825
0,3771	232,594	0,5786	170,6077	0,6198	107,7607
0,3771	232,594	0,5812	168,0250	0,6224	106,0388
0,3771	236,037	0,5786	170,6077	0,6276	110,3434
0,3771	236,898	0,5812	167,1640	0,6250	106,0388
0,3797	238,620	0,5786	169,7468	0,6276	104,3170
0,3822	235,177	0,5812	167,1640	0,6302	106,0388
0,3822	239,481	0,5838	168,0250	0,6276	108,6216
0,3822	238,620	0,5838	168,8859	0,6302	106,0388
0,3848	237,759	0,5838	168,8859	0,6302	106,0388
0,3822	237,759	0,5838	168,0250	0,6328	103,4561
0,3874	239,481	0,5863	168,0250	0,6328	109,4825
0,3848	242,064	0,5889	170,6077	0,6379	106,8998
0,3848	238,620	0,5889	168,8859	0,6353	108,6216
0,3848	241,203	0,5889	168,0250	0,6353	108,6216
0,3874	239,481	0,5889	169,7468	0,6379	108,6216
0,3900	241,203	0,5915	170,6077	0,6379	106,8998
0,3900	242,064	0,5915	170,6077	0,6379	106,8998
0,3900	242,064	0,5889	169,7468	0,6353	104,3170
0,3900	238,620	0,5941	168,8859	0,6431	105,1779
0,3926	246,369	0,5941	171,4686	0,6379	105,1779
0,3926	241,203	0,5889	167,1640	0,6431	104,3170
0,3926	243,786	0,5941	168,0250	0,6431	106,8998

0,3926	242,064	0,5941	169,7468	0,6431	102,5952
0,3952	242,064	0,5967	168,8859	0,6405	102,5952
0,3952	242,064	0,5993	170,6077	0,6457	105,1779
0,3977	246,369	0,5993	168,0250	0,6431	102,5952
0,3952	242,064	0,6044	169,7468	0,6457	103,4561
0,3977	244,647	0,6018	166,3031	0,6457	101,7342
0,3952	242,064	0,5993	166,3031	0,6483	101,7342
0,4029	247,229	0,6018	166,3031	0,6483	102,5952
0,4029	247,229	0,6018	162,8594	0,6483	100,0124
0,4003	246,369	0,6018	165,4422	0,6508	102,5952
0,4029	246,369	0,6044	166,3031	0,6483	102,5952
0,4055	246,369	0,6044	164,5813	0,6534	103,4561
0,4003	249,812	0,6096	165,4422	0,6534	103,4561
0,4055	248,951	0,6044	166,3031	0,6534	105,1779
0,4107	247,229	0,5941	168,0250	0,6560	101,7342
0,4081	250,673	0,6070	163,7204	0,6560	103,4561
0,4081	248,951	0,6096	164,5813	0,6534	103,4561
0,4081	248,951	0,6122	166,3031	0,6560	104,3170
0,4081	248,090	0,6122	163,7204	0,6560	101,7342
0,4132	250,673	0,6148	166,3031	0,6560	103,4561
0,4107	253,256	0,6122	164,5813	0,6638	104,3170
0,4107	248,090	0,6122	164,5813	0,6586	101,7342
0,4132	250,673	0,6148	163,7204	0,6638	100,0124
0,4132	249,812	0,6148	163,7204	0,6586	102,5952
0,4132	252,395	0,6148	163,7204	0,6638	103,4561
0,4184	251,534	0,6148	166,3031	0,6638	101,7342
0,4158	250,673	0,6199	163,7204	0,6612	101,7342
0,4184	248,090	0,6199	163,7204	0,6638	104,3170
0,4158	250,673	0,6173	162,8594	0,6663	104,3170
0,4236	251,534	0,6199	162,8594	0,6689	101,7342
0,4210	252,395	0,6199	161,1376	0,6689	100,0124
0,4184	254,117	0,6277	162,8594	0,6663	99,1515
0,4184	251,534	0,6225	163,7204	0,6689	97,4296
0,4184	250,673	0,6199	161,1376	0,6689	100,0124
0,4236	251,534	0,6251	161,9985	0,6689	101,7342
0,4236	253,256	0,6277	160,2767	0,6715	99,1515
0,4210	255,839	0,6251	161,9985	0,6715	99,1515
0,4236	253,256	0,6277	161,1376	0,6741	97,4296

0,4287	254,978	0,6303	162,8594	0,6741	98,2906
0,4287	254,978	0,6303	161,1376	0,6767	97,4296
0,4261	251,534	0,6277	158,5548	0,6741	99,1515
0,4287	255,839	0,6277	161,1376	0,6715	97,4296
0,4313	254,117	0,6328	159,4158	0,6767	99,1515
0,4313	255,839	0,6303	159,4158	0,6793	99,1515
0,4313	254,117	0,6328	159,4158	0,6793	98,2906
0,4339	256,700	0,6328	157,6939	0,6818	97,4296
0,4339	254,978	0,6354	159,4158	0,6844	97,4296
0,4339	257,560	0,6354	161,1376	0,6818	96,5687
0,4339	254,978	0,6354	160,2767	0,6844	95,7078
0,4339	256,700	0,6380	157,6939	0,6793	101,7342
0,4313	256,700	0,6354	160,2767	0,6844	98,2906
0,4391	254,117	0,6380	157,6939	0,6844	100,8733
0,4339	257,560	0,6354	159,4158	0,6844	99,1515
0,4391	257,560	0,6380	159,4158	0,6844	96,5687
0,4365	256,700	0,6406	157,6939	0,6896	99,1515
0,4365	256,700	0,6380	157,6939	0,6870	100,0124
0,4416	253,256	0,6380	159,4158	0,6896	96,5687
0,4442	256,700	0,6406	155,9721	0,6922	99,1515
0,4391	256,700	0,6432	158,5548	0,6896	94,8469
0,4442	260,143	0,6432	156,8330	0,6896	96,5687
0,4442	259,282	0,6432	156,8330	0,6922	98,2906
0,4416	259,282	0,6483	160,2767	0,6947	98,2906
0,4468	258,421	0,6457	157,6939	0,6922	97,4296
0,4468	257,560	0,6483	159,4158	0,6947	94,8469
0,4468	258,421	0,6483	159,4158	0,6922	95,7078
0,4494	256,700	0,6509	154,2502	0,6947	94,8469
0,4494	257,560	0,6535	155,9721	0,6973	95,7078
0,4494	256,700	0,6509	155,9721	0,6973	94,8469
0,4520	259,282	0,6509	156,8330	0,6999	94,8469
0,4520	259,282	0,6509	154,2502	0,6973	93,9860
0,4546	259,282	0,6535	153,3893	0,6999	96,5687
0,4546	256,700	0,6535	154,2502	0,7051	92,2641
0,4520	259,282	0,6535	150,8066	0,7025	93,1251
0,4546	258,421	0,6587	154,2502	0,7051	94,8469
0,4546	259,282	0,6561	152,5284	0,7051	96,5687
0,4546	259,282	0,6587	153,3893	0,7051	92,2641

0,4571	258,421	0,6587	151,6675	0,7051	93,1251
0,4597	258,421	0,6612	153,3893	0,7025	95,7078
0,4623	261,004	0,6587	153,3893	0,7051	93,1251
0,4623	263,587	0,6561	149,9457	0,7102	93,1251
0,4597	258,421	0,6612	152,5284	0,7102	96,5687
0,4597	261,004	0,6690	153,3893	0,7102	93,1251
0,4597	260,143	0,6638	151,6675	0,7102	95,7078
0,4649	258,421	0,6612	152,5284	0,7102	92,2641
0,4649	260,143	0,6638	151,6675	0,7128	94,8469
0,4649	260,143	0,6664	152,5284	0,7128	96,5687
0,4675	260,143	0,6664	151,6675	0,7128	94,8469
0,4649	257,560	0,6664	151,6675	0,7180	93,9860
0,4701	261,865	0,6690	151,6675	0,7180	94,8469
0,4701	260,143	0,6742	150,8066	0,7154	94,8469
0,4701	260,143	0,6716	151,6675	0,7180	93,1251
0,4675	260,143	0,6742	151,6675	0,7180	93,9860
0,4701	257,560	0,6742	151,6675	0,7206	94,8469
0,4701	258,421	0,6716	150,8066	0,7206	95,7078
0,4701	258,421	0,6716	149,0848	0,7206	93,1251
0,4726	261,004	0,6767	151,6675	0,7206	91,4032
0,4701	257,560	0,6742	147,3629	0,7206	91,4032
0,4726	259,282	0,6767	148,2238	0,7232	93,1251
0,4726	258,421	0,6767	147,3629	0,7232	93,1251
0,4752	258,421	0,6742	149,0848	0,7257	90,5423
0,4778	258,421	0,6793	149,0848	0,7257	93,9860
0,4752	259,282	0,6793	148,2238	0,7283	91,4032
0,4752	258,421	0,6793	146,5020	0,7257	92,2641
0,4804	255,839	0,6845	146,5020	0,7283	89,6814
0,4778	256,700	0,6819	146,5020	0,7283	88,8205
0,4804	257,560	0,6845	144,7802	0,7309	92,2641
0,4804	254,978	0,6845	143,9192	0,7309	91,4032
0,4804	256,700	0,6845	145,6411	0,7309	88,8205
0,4856	256,700	0,6845	147,3629	0,7335	89,6814
0,4856	260,143	0,6871	143,9192	0,7335	90,5423
0,4881	257,560	0,6871	145,6411	0,7361	90,5423
0,4881	258,421	0,6871	144,7802	0,7361	92,2641
0,4881	257,560	0,6897	146,5020	0,7361	90,5423
0,4881	258,421	0,6922	146,5020	0,7361	88,8205

0,4881	259,282	0,6922	147,3629	0,7387	92,2641
0,4907	256,700	0,6922	146,5020	0,7387	89,6814
0,4881	254,978	0,6922	145,6411	0,7387	87,9595
0,4907	257,560	0,6922	145,6411	0,7412	88,8205
0,4933	255,839	0,6948	143,9192	0,7412	89,6814
0,4933	254,978	0,6948	143,0583	0,7412	92,2641
0,4907	253,256	0,6974	143,9192	0,7464	93,1251
0,4933	252,395	0,6948	142,1974	0,7438	92,2641
0,4933	255,839	0,6948	143,9192	0,7412	88,8205
0,4933	253,256	0,7000	143,0583	0,7438	89,6814
0,5010	257,560	0,7000	145,6411	0,7438	88,8205
0,4959	251,534	0,7026	144,7802	0,7490	90,5423
0,4985	250,673	0,7051	143,0583	0,7490	87,9595
0,4985	252,395	0,7000	144,7802	0,7516	90,5423
0,4985	252,395	0,7026	141,3365	0,7490	88,8205
0,5010	253,256	0,7051	142,1974	0,7542	87,9595
0,5036	251,534	0,7051	142,1974	0,7490	86,2377
0,5010	248,090	0,7026	139,6146	0,7516	84,5159
0,5062	249,812	0,7077	142,1974	0,7516	85,3768
0,5036	249,812	0,7051	140,4756	0,7516	84,5159
0,5036	253,256	0,7077	139,6146	0,7516	86,2377
0,5062	248,951	0,7103	141,3365	0,7567	87,0986
0,5062	250,673	0,7077	141,3365	0,7567	84,5159
0,5114	250,673	0,7103	141,3365	0,7567	88,8205
0,5088	250,673	0,7077	139,6146	0,7567	86,2377
0,5062	248,951	0,7103	139,6146	0,7593	84,5159
0,5114	247,229	0,7155	143,0583	0,7593	85,3768
0,5088	247,229	0,7129	137,8928	0,7619	84,5159
0,5114	248,090	0,7129	139,6146	0,7645	85,3768
0,5140	245,508	0,7129	137,0319	0,7671	86,2377
0,5114	247,229	0,7181	139,6146	0,7645	84,5159
0,5140	246,369	0,7155	137,8928	0,7671	87,0986
0,5165	246,369	0,7206	137,0319	0,7671	87,9595
0,5165	247,229	0,7206	138,7537	0,7671	86,2377
0,5165	244,647	0,7181	137,0319	0,7671	87,9595
0,5191	249,812	0,7181	138,7537	0,7671	84,5159
0,5191	244,647	0,7232	138,7537	0,7696	88,8205
0,5191	243,786	0,7232	137,8928	0,7696	86,2377

0,5191	242,925	0,7232	137,8928	0,7722	88,8205
0,5191	245,508	0,7206	136,1710	0,7722	87,9595
0,5269	242,064	0,7232	137,8928	0,7722	85,3768
0,5217	240,342	0,7310	134,4491	0,7722	85,3768
0,5243	242,064	0,7258	137,0319	0,7748	88,8205
0,5243	243,786	0,7232	135,3101	0,7774	84,5159
0,5243	241,203	0,7284	134,4491	0,7748	85,3768
0,5295	240,342	0,7310	135,3101	0,7774	81,0722
0,5269	241,203	0,7258	134,4491	0,7774	84,5159
0,5243	242,925	0,7310	136,1710	0,7800	83,6550
0,5269	239,481	0,7284	135,3101	0,7800	81,9331
0,5320	238,620	0,7310	134,4491	0,7800	81,9331
0,5295	237,759	0,7336	133,5882	0,7774	81,0722
0,5295	237,759	0,7336	135,3101	0,7826	81,0722
0,5320	239,481	0,7361	133,5882	0,7826	81,0722
0,5346	234,316	0,7336	133,5882	0,7877	80,2113
0,5320	234,316	0,7361	131,8664	0,7826	79,3504
0,5346	237,759	0,7361	133,5882	0,7851	81,9331
0,5346	236,898	0,7361	131,8664	0,7851	85,3768
0,5346	232,594	0,7361	131,8664	0,7851	84,5159
0,5372	235,177	0,7336	131,0055	0,7851	83,6550
0,5372	234,316	0,7387	131,0055	0,7851	83,6550
0,5372	230,011	0,7413	133,5882	0,7877	81,9331
0,5398	233,455	0,7413	131,0055	0,7877	79,3504
0,5398	232,594	0,7439	131,8664	0,7903	82,7940
0,5372	230,011	0,7413	131,8664	0,7903	82,7940
0,5398	229,150	0,7439	133,5882	0,7929	83,6550
0,5424	229,150	0,7465	131,0055	0,7903	82,7940
0,5424	230,872	0,7465	129,2836	0,7929	79,3504
0,5475	227,428	0,7516	130,1445	0,7981	82,7940
0,5450	227,428	0,7465	131,8664	0,7981	82,7940
0,5475	225,706	0,7491	130,1445	0,7981	80,2113
0,5475	228,289	0,7491	128,4227	0,7955	79,3504
0,5450	229,150	0,7516	129,2836	0,7981	80,2113
0,5475	225,706	0,7491	128,4227	0,7981	80,2113
0,5475	225,706	0,7516	129,2836	0,8006	82,7940
0,5501	226,567	0,7568	131,0055	0,8006	79,3504
0,5501	222,263	0,7542	127,5618	0,8032	81,9331

0,5501	223,124	0,7568	128,4227	0,8032	77,6285
0,5527	222,263	0,7568	128,4227	0,8032	76,7676
0,5527	223,985	0,7594	130,1445	0,8032	78,4894
0,5527	222,263	0,7568	127,5618	0,8032	76,7676
0,5553	220,541	0,7568	124,9790	0,8058	76,7676
0,5553	219,680	0,7568	127,5618	0,8058	78,4894
0,5553	221,402	0,7620	124,9790	0,8058	77,6285
0,5579	218,819	0,7594	124,1181	0,8110	76,7676
0,5604	218,819	0,7594	125,8400	0,8058	78,4894
0,5553	218,819	0,7594	125,8400	0,8136	77,6285
0,5630	217,097	0,7620	123,2572	0,8084	79,3504
0,5682	214,515	0,7620	124,9790	0,8110	76,7676
0,5604	216,236	0,7671	122,3963	0,8110	79,3504
0,5604	215,375	0,7671	124,9790	0,8110	78,4894
0,5630	211,071	0,7646	123,2572	0,8161	78,4894
0,5630	211,932	0,7697	124,1181	0,8136	78,4894
0,5656	211,071	0,7697	124,9790	0,8161	78,4894
0,5682	213,654	0,7671	124,1181	0,8161	75,9067
0,5682	211,071	0,7697	123,2572	0,8187	78,4894
0,5682	211,071	0,7697	123,2572	0,8161	78,4894
0,5708	209,349	0,7697	124,1181	0,8187	78,4894
0,5682	211,071	0,7749	124,9790	0,8187	74,1849
0,5708	211,071	0,7723	124,1181	0,8187	75,9067
0,5708	208,488	0,7723	124,9790	0,8239	75,0458
0,5759	210,210	0,7749	122,3963	0,8213	76,7676
0,5734	205,905	0,7775	124,1181	0,8213	79,3504
0,5734	207,627	0,7749	121,5354	0,8213	77,6285
0,5734	205,044	0,7775	123,2572	0,8265	76,7676
0,5708	204,184	0,7775	121,5354	0,8265	78,4894
0,5734	205,044	0,7749	121,5354	0,8239	76,7676
0,5759	205,044	0,7800	121,5354	0,8291	75,9067
0,5734	205,044	0,7826	121,5354	0,8265	75,9067
0,5785	203,323	0,7800	118,9526	0,8265	75,0458
0,5785	202,462	0,7826	120,6744	0,8316	76,7676
0,5811	202,462	0,7852	120,6744	0,8291	75,0458
0,5785	201,601	0,7878	119,8135	0,8316	76,7676
0,5811	201,601	0,7800	118,0917	0,8342	75,9067
0,5863	199,879	0,7852	118,9526	0,8316	68,1584

0,5811	196,435	0,7878	119,8135	0,8316	73,3239
0,5837	196,435	0,7852	116,3699	0,8342	75,0458
0,5837	198,157	0,7800	120,6744	0,8368	72,4630
0,5837	197,296	0,7904	118,0917	0,8368	73,3239
0,5914	198,157	0,7904	118,0917	0,8368	75,9067
0,5863	195,574	0,7904	116,3699	0,8394	75,9067
0,5889	196,435	0,7904	116,3699	0,8394	73,3239
0,5914	196,435	0,7904	119,8135	0,8394	73,3239
0,5914	194,713	0,7904	117,2308	0,8394	70,7412
0,5914	195,574	0,7904	116,3699	0,8420	73,3239
0,5914	195,574	0,7930	117,2308	0,8420	71,6021
0,5940	194,713	0,7955	117,2308	0,8420	75,0458
0,5863	192,131	0,7955	118,0917	0,8445	75,0458
0,5940	193,852	0,7981	117,2308	0,8471	71,6021
0,5940	193,852	0,7981	115,5089	0,8445	70,7412
0,5940	190,409	0,7955	115,5089	0,8497	73,3239
0,5966	190,409	0,8007	117,2308	0,8420	72,4630
0,5966	192,131	0,8007	117,2308	0,8497	71,6021
0,5992	190,409	0,8007	114,6480	0,8471	71,6021
0,6018	191,270	0,8033	115,5089	0,8497	70,7412
0,5992	186,104	0,8033	115,5089	0,8497	72,4630
0,6018	190,409	0,8007	116,3699	0,8523	75,0458
0,5966	186,965	0,8033	116,3699	0,8549	73,3239
0,6095	187,826	0,8059	115,5089	0,8549	70,7412
0,6018	185,243	0,8059	115,5089	0,8523	70,7412
0,6044	186,104	0,8085	115,5089	0,8523	72,4630
0,6044	186,965	0,8110	113,7871	0,8549	73,3239
0,6069	186,965	0,8085	115,5089	0,8549	73,3239
0,6095	184,382	0,8110	114,6480	0,8549	72,4630
0,6095	185,243	0,8136	112,9262	0,8575	72,4630
0,6095	181,800	0,8110	114,6480	0,8600	71,6021
0,6095	185,243	0,8136	112,9262	0,8600	71,6021
0,6095	182,661	0,8162	113,7871	0,8600	70,7412
0,6095	183,521	0,8136	112,9262	0,8600	66,4366
0,6147	180,939	0,8110	113,7871	0,8626	69,8803
0,6121	180,939	0,8162	112,9262	0,8626	69,8803
0,6147	180,078	0,8162	113,7871	0,8652	67,2975
0,6147	179,217	0,8188	112,0653	0,8704	67,2975

0,6147	179,217	0,8188	112,9262	0,8626	66,4366
0,6173	179,217	0,8214	110,3434	0,8678	66,4366
0,6147	179,217	0,8188	112,0653	0,8652	67,2975
0,6173	178,356	0,8214	111,2043	0,8678	68,1584
0,6199	179,217	0,8240	114,6480	0,8678	67,2975
0,6224	178,356	0,8214	110,3434	0,8678	69,8803
0,6199	178,356	0,8240	112,0653	0,8678	69,0193
0,6199	175,773	0,8240	112,0653	0,8730	69,8803
0,6199	176,634	0,8240	114,6480	0,8730	69,8803
0,6224	174,051	0,8265	110,3434	0,8755	73,3239
0,6250	174,051	0,8291	109,4825	0,8704	69,0193
0,6224	175,773	0,8265	111,2043	0,8755	67,2975
0,6276	174,912	0,8291	109,4825	0,8755	68,1584
0,6250	172,330	0,8291	107,7607	0,8755	68,1584
0,6276	171,469	0,8291	107,7607	0,8807	67,2975
0,6276	174,051	0,8317	111,2043	0,8807	68,1584
0,6276	172,330	0,8317	109,4825	0,8755	68,1584
0,6302	173,190	0,8317	107,7607	0,8807	68,1584
0,6302	168,886	0,8343	107,7607	0,8833	69,8803
0,6405	168,886	0,8343	107,7607	0,8807	67,2975
0,6328	171,469	0,8343	108,6216	0,8807	66,4366
0,6328	169,747	0,8369	106,8998	0,8807	64,7148
0,6328	169,747	0,8369	106,8998	0,8807	63,8538
0,6353	167,164	0,8395	106,8998	0,8859	63,8538
0,6353	167,164	0,8369	107,7607	0,8859	67,2975
0,6379	168,886	0,8395	106,8998	0,8833	65,5757
0,6328	165,442	0,8420	106,0388	0,8859	63,8538
0,6379	166,303	0,8420	106,0388	0,8859	65,5757
0,6379	164,581	0,8420	107,7607	0,8885	65,5757
0,6405	165,442	0,8395	106,0388	0,8885	64,7148
0,6379	164,581	0,8420	104,3170	0,8910	64,7148
0,6431	164,581	0,8446	104,3170	0,8885	63,8538
0,6431	163,720	0,8472	103,4561	0,8910	63,8538
0,6457	166,303	0,8446	102,5952	0,8910	64,7148
0,6457	162,859	0,8472	103,4561	0,8936	63,8538
0,6457	161,999	0,8446	102,5952	0,8936	64,7148
0,6457	160,277	0,8498	104,3170	0,8936	64,7148
0,6483	160,277	0,8472	102,5952	0,8936	63,8538

0,6483	161,999	0,8498	103,4561	0,8962	62,9929
0,6483	162,859	0,8524	102,5952	0,8962	63,8538
0,6483	160,277	0,8524	105,1779	0,8988	65,5757
0,6483	161,138	0,8498	102,5952	0,8988	63,8538
0,6508	159,416	0,8524	101,7342	0,9039	64,7148
0,6508	158,555	0,8524	102,5952	0,8988	65,5757
0,6508	159,416	0,8549	102,5952	0,8988	65,5757
0,6534	155,972	0,8524	101,7342	0,9014	64,7148
0,6560	159,416	0,8575	101,7342	0,9014	63,8538
0,6560	160,277	0,8601	103,4561	0,9039	65,5757
0,6534	155,972	0,8575	104,3170	0,9065	63,8538
0,6560	157,694	0,8575	102,5952	0,9039	63,8538
0,6560	156,833	0,8601	100,0124	0,9039	63,8538
0,6560	156,833	0,8601	103,4561	0,9065	62,1320
0,6586	155,111	0,8653	103,4561	0,9039	63,8538
0,6638	154,250	0,8627	100,8733	0,9065	61,2711
0,6638	153,389	0,8653	102,5952	0,9065	66,4366
0,6638	152,528	0,8627	99,1515	0,9117	63,8538
0,6638	155,111	0,8627	100,0124	0,9091	64,7148
0,6638	152,528	0,8627	99,1515	0,9117	62,1320
0,6586	151,668	0,8679	100,8733	0,9143	62,9929
0,6638	150,807	0,8704	99,1515	0,9117	62,1320
0,6715	151,668	0,8679	98,2906	0,9117	58,6883
0,6689	151,668	0,8679	98,2906	0,9117	59,5492
0,6663	149,946	0,8679	96,5687	0,9169	61,2711
0,6586	149,946	0,8704	99,1515	0,9169	62,1320
0,6689	149,085	0,8704	97,4296	0,9169	62,1320
0,6715	149,946	0,8730	97,4296	0,9169	62,1320
0,6767	149,946	0,8730	98,2906	0,9194	62,9929
0,6715	148,224	0,8730	96,5687	0,9194	62,9929
0,6689	148,224	0,8730	97,4296	0,9194	60,4102
0,6741	149,085	0,8730	97,4296	0,9194	62,1320
0,6767	148,224	0,8730	95,7078	0,9246	62,1320
0,6689	149,946	0,8782	95,7078	0,9220	60,4102
0,6767	147,363	0,8782	97,4296	0,9246	62,9929
0,6793	146,502	0,8808	98,2906	0,9246	59,5492
0,6767	146,502	0,8782	96,5687	0,9246	58,6883
0,6793	147,363	0,8782	97,4296	0,9272	62,1320

0,6818	148,224	0,8808	95,7078	0,9324	62,9929
0,6793	146,502	0,8808	96,5687	0,9272	62,1320
0,6818	146,502	0,8834	98,2906	0,9272	60,4102
0,6818	145,641	0,8834	98,2906	0,9324	62,1320
0,6870	147,363	0,8834	96,5687	0,9324	60,4102
0,6844	145,641	0,8834	95,7078	0,9349	60,4102
0,6870	143,058	0,8859	96,5687	0,9324	60,4102
0,6844	143,919	0,8885	96,5687	0,9298	61,2711
0,6922	143,919	0,8859	94,8469	0,9324	58,6883
0,6870	142,197	0,8885	94,8469	0,9298	61,2711
0,6870	144,780	0,8911	95,7078	0,9349	57,8274
0,6896	141,336	0,8911	95,7078	0,9375	61,2711
0,6922	138,754	0,8911	92,2641	0,9349	57,8274
0,6922	140,476	0,8911	93,9860	0,9375	57,8274
0,6922	140,476	0,8911	93,9860	0,9427	59,5492
0,6922	139,615	0,8911	93,9860	0,9401	58,6883
0,6922	139,615	0,8937	92,2641	0,9401	56,9665
0,6947	137,893	0,8963	93,1251	0,9427	57,8274
0,6973	140,476	0,8937	93,9860	0,9427	56,1056
0,6973	137,893	0,8963	93,1251	0,9427	57,8274
0,6947	136,171	0,9014	93,9860	0,9427	57,8274
0,6999	138,754	0,8989	91,4032	0,9427	57,8274
0,6947	136,171	0,9014	91,4032	0,9453	58,6883
0,6999	137,893	0,8989	93,1251	0,9453	55,2446
0,6947	137,893	0,9014	91,4032	0,9479	56,1056
0,7025	135,310	0,9040	92,2641	0,9479	57,8274
0,7025	136,171	0,9040	92,2641	0,9479	56,9665
0,7025	137,032	0,8989	90,5423	0,9504	58,6883
0,7025	135,310	0,9014	91,4032	0,9504	57,8274
0,7025	137,032	0,9040	91,4032	0,9504	57,8274
0,7051	136,171	0,9066	92,2641	0,9504	60,4102
0,7051	136,171	0,9040	91,4032	0,9504	57,8274
0,7077	134,449	0,9092	91,4032	0,9556	56,9665
0,7051	137,032	0,9092	90,5423	0,9556	56,9665
0,7077	133,588	0,9092	91,4032	0,9582	57,8274
0,7077	133,588	0,9118	92,2641	0,9556	59,5492
0,7102	131,866	0,9144	93,1251	0,9582	56,9665
0,7102	131,866	0,9144	91,4032	0,9582	56,9665

0,7128	131,866	0,9118	91,4032	0,9582	55,2446
0,7102	132,727	0,9169	87,0986	0,9608	57,8274
0,7102	131,005	0,9118	91,4032	0,9608	55,2446
0,7154	133,588	0,9144	88,8205	0,9582	59,5492
0,7128	130,145	0,9169	91,4032	0,9634	56,1056
0,7154	131,005	0,9144	89,6814	0,9634	56,9665
0,7154	128,423	0,9169	90,5423	0,9659	55,2446
0,7180	128,423	0,9195	87,9595	0,9659	55,2446
0,7180	126,701	0,9169	88,8205	0,9685	54,3837
0,7154	129,284	0,9195	87,9595	0,9659	55,2446
0,7232	129,284	0,9195	87,0986	0,9685	56,9665
0,7232	125,840	0,9221	88,8205	0,9634	51,8010
0,7206	128,423	0,9221	87,0986	0,9711	55,2446
0,7206	125,840	0,9221	87,0986	0,9711	55,2446
0,7206	125,840	0,9247	87,0986	0,9737	54,3837
0,7206	125,840	0,9273	89,6814	0,9711	53,5228
0,7257	128,423	0,9247	86,2377	0,9737	52,6619
0,7283	125,840	0,9273	87,0986	0,9711	53,5228
0,7283	125,840	0,9247	85,3768	0,9763	54,3837
0,7283	125,840	0,9273	86,2377	0,9763	52,6619
0,7283	125,840	0,9298	87,9595	0,9788	55,2446
0,7283	123,257	0,9273	88,8205	0,9763	54,3837
0,7309	124,979	0,9273	87,0986	0,9788	53,5228
0,7309	125,840	0,9298	87,9595	0,9788	54,3837
0,7335	124,979	0,9324	87,9595	0,9763	53,5228
0,7335	125,840	0,9324	85,3768	0,9814	55,2446
0,7309	124,118	0,9324	85,3768	0,9788	54,3837
0,7387	124,979	0,9324	87,9595	0,9788	54,3837
0,7361	123,257	0,9350	90,5423	0,9814	53,5228
0,7335	123,257	0,9350	86,2377	0,9840	53,5228
0,7387	124,118	0,9376	87,0986	0,9840	55,2446
0,7361	122,396	0,9402	87,9595	0,9840	53,5228
0,7309	120,674	0,9402	86,2377	0,9866	55,2446
0,7387	123,257	0,9350	85,3768	0,9866	54,3837
0,7387	122,396	0,9376	86,2377	0,9892	54,3837
0,7387	118,953	0,9428	87,0986	0,9892	52,6619
0,7412	118,953	0,9428	84,5159	0,9866	53,5228
0,7412	119,814	0,9453	85,3768	0,9892	52,6619

0,7412	118,092	0,9453	84,5159	0,9918	50,9401
0,7412	118,953	0,9428	84,5159	0,9892	53,5228
0,7438	116,370	0,9453	83,6550	0,9918	51,8010
0,7464	117,231	0,9479	83,6550	0,9918	51,8010
0,7464	113,787	0,9479	81,9331	0,9892	53,5228
0,7464	117,231	0,9479	84,5159	0,9943	51,8010
0,7464	117,231	0,9479	80,2113	0,9969	50,9401
0,7490	118,953	0,9505	81,0722	0,9969	49,2182
0,7464	115,509	0,9531	81,9331	0,9969	53,5228
0,7516	118,092	0,9531	81,0722	0,9969	49,2182
0,7490	117,231	0,9531	81,0722	0,9995	51,8010
0,7542	116,370	0,9505	81,0722	1,0021	49,2182
0,7542	116,370	0,9557	81,0722	1,0047	51,8010
0,7542	116,370	0,9557	82,7940	1,0021	50,0791
0,7542	115,509	0,9583	81,0722	1,0021	49,2182
0,7542	116,370	0,9557	82,7940	1,0047	51,8010
0,7567	114,648	0,9557	81,0722	1,0073	51,8010
0,7567	117,231	0,9583	82,7940	1,0047	50,0791
0,7593	118,092	0,9557	82,7940	1,0073	52,6619
0,7593	115,509	0,9583	81,0722	1,0073	49,2182
0,7593	115,509	0,9608	83,6550	1,0047	50,0791
0,7593	115,509	0,9608	82,7940	1,0098	49,2182
0,7619	114,648	0,9608	83,6550	1,0124	51,8010
0,7619	113,787	0,9634	80,2113	1,0073	50,9401
0,7645	114,648	0,9634	84,5159	1,0073	51,8010
0,7671	112,065	0,9634	81,9331	1,0098	51,8010
0,7671	113,787	0,9686	80,2113	1,0124	50,9401
0,7645	111,204	0,9660	80,2113	1,0098	50,9401
0,7645	110,343	0,9660	81,0722	1,0124	51,8010
0,7619	109,483	0,9660	81,9331	1,0124	50,0791
0,7671	111,204	0,9660	81,0722	1,0150	48,3573
0,7671	108,622	0,9686	80,2113	1,0176	50,0791
0,7671	111,204	0,9686	81,0722	1,0202	50,0791
0,7671	109,483	0,9686	80,2113	1,0150	47,4964
0,7696	106,900	0,9712	79,3504	1,0253	48,3573
0,7722	108,622	0,9738	79,3504	1,0202	48,3573
0,7696	109,483	0,9712	78,4894	1,0253	48,3573
0,7722	108,622	0,9738	80,2113	1,0253	47,4964

0,7748	106,900	0,9738	78,4894	1,0228	45,7745
0,7748	112,065	0,9763	78,4894	1,0228	47,4964
0,7774	110,343	0,9789	81,0722	1,0253	49,2182
0,7722	107,761	0,9763	77,6285	1,0228	46,6355
0,7774	108,622	0,9789	77,6285	1,0279	47,4964
0,7774	107,761	0,9789	81,0722	1,0305	46,6355
0,7774	108,622	0,9815	79,3504	1,0305	46,6355
0,7722	109,483	0,9815	78,4894	1,0305	49,2182
0,7826	108,622	0,9815	76,7676	1,0305	45,7745
0,7826	110,343	0,9815	77,6285	1,0305	46,6355
0,7800	106,900	0,9841	78,4894	1,0305	45,7745
0,7826	107,761	0,9867	78,4894	1,0305	47,4964
0,7826	109,483	0,9867	78,4894	1,0331	47,4964
0,7851	108,622	0,9867	77,6285	1,0305	47,4964
0,7851	106,900	0,9867	78,4894	1,0357	46,6355
0,7877	106,900	0,9841	76,7676	1,0382	46,6355
0,7877	103,456	0,9892	79,3504	1,0357	45,7745
0,7877	104,317	0,9892	76,7676	1,0357	47,4964
0,7877	106,039	0,9892	78,4894	1,0382	45,7745
0,7903	106,900	0,9918	77,6285	1,0382	46,6355
0,7929	102,595	0,9892	76,7676	1,0382	45,7745
0,7903	103,456	0,9944	76,7676	1,0408	46,6355
0,7903	102,595	0,9892	78,4894	1,0408	44,0527
0,7929	103,456	0,9944	76,7676	1,0408	46,6355
0,7955	100,873	0,9970	75,0458	1,0408	44,0527
0,7929	102,595	0,9970	75,9067	1,0460	47,4964
0,7929	100,873	0,9970	75,9067	1,0460	44,9136
0,7955	100,012	0,9970	75,0458	1,0434	45,7745
0,7955	100,012	0,9970	76,7676	1,0486	44,0527
0,7981	101,734	0,9970	74,1849	1,0460	44,9136
0,7981	100,012	1,0022	75,0458	1,0512	44,9136
0,7981	100,873	1,0022	75,0458	1,0486	44,0527
0,7981	100,012	1,0022	74,1849	1,0512	43,1918
0,8006	99,151	1,0022	75,0458	1,0486	41,4700

ANNEXE II

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

Tableau-A II-1 Déflexions dans les géophones (D1 à D9) à la surface de la section 35-0801
du LTPP

Déflexions à la surface de la chaussée									
t (s)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)	D7 (mm)	D8 (mm)	D9 (mm)
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1,75E-03	-2,08E-04	-8,29E-05	-3,31E-05	-2,36E-06	4,21E-06	2,66E-07	-7,43E-08	1,26E-08	2,12E-09
3,75E-03	-3,69E-05	-5,77E-05	-6,77E-05	-5,26E-05	-1,95E-05	1,05E-05	2,62E-06	-2,12E-08	1,26E-07
5,75E-03	-5,12E-04	-3,45E-04	-2,21E-04	-7,73E-05	-1,55E-05	-1,05E-05	7,16E-06	6,06E-06	1,08E-06
7,75E-03	-6,11E-04	-3,34E-04	-2,14E-04	-1,33E-04	-8,98E-05	-9,61E-06	7,10E-06	5,32E-06	6,50E-06
9,75E-03	-2,87E-04	-2,64E-04	-2,39E-04	-1,76E-04	-1,13E-04	-4,86E-05	-1,16E-05	8,30E-06	8,63E-06
1,18E-02	-6,64E-03	-2,89E-03	-1,16E-03	-1,10E-04	1,58E-05	-7,58E-05	-3,36E-05	-4,71E-06	8,78E-06
1,38E-02	-3,45E-02	-1,73E-02	-8,78E-03	-2,17E-03	1,01E-04	3,49E-04	-1,11E-05	-3,01E-05	6,07E-07
1,58E-02	-1,28E-01	-6,80E-02	-3,68E-02	-1,15E-02	-1,71E-03	1,44E-03	6,78E-04	1,50E-04	3,11E-05
1,78E-02	-2,73E-01	-1,61E-01	-9,83E-02	-4,07E-02	-1,26E-02	3,02E-03	2,62E-03	1,15E-03	4,27E-04
1,98E-02	-3,66E-01	-2,34E-01	-1,60E-01	-8,55E-02	-4,15E-02	-2,31E-03	5,60E-03	3,95E-03	1,94E-03
2,18E-02	-3,81E-01	-2,53E-01	-1,84E-01	-1,15E-01	-7,31E-02	-2,28E-02	1,20E-03	7,04E-03	5,23E-03
2,38E-02	-3,83E-01	-2,53E-01	-1,84E-01	-1,21E-01	-8,62E-02	-4,53E-02	-1,57E-02	2,55E-03	8,00E-03
2,58E-02	-3,94E-01	-2,57E-01	-1,85E-01	-1,20E-01	-8,58E-02	-5,40E-02	-3,25E-02	-1,14E-02	3,74E-03
2,78E-02	-3,78E-01	-2,50E-01	-1,82E-01	-1,19E-01	-8,51E-02	-5,31E-02	-3,80E-02	-2,39E-02	-7,70E-03
2,98E-02	-3,23E-01	-2,16E-01	-1,61E-01	-1,11E-01	-8,30E-02	-5,26E-02	-3,70E-02	-2,76E-02	-1,71E-02
3,18E-02	-2,53E-01	-1,68E-01	-1,27E-01	-9,14E-02	-7,27E-02	-5,12E-02	-3,64E-02	-2,64E-02	-1,93E-02
3,38E-02	-1,88E-01	-1,22E-01	-9,07E-02	-6,63E-02	-5,50E-02	-4,38E-02	-3,44E-02	-2,51E-02	-1,72E-02
3,58E-02	-1,30E-01	-7,98E-02	-5,76E-02	-4,15E-02	-3,50E-02	-3,05E-02	-2,73E-02	-2,16E-02	-1,38E-02
3,78E-02	-7,62E-02	-4,16E-02	-2,75E-02	-1,87E-02	-1,59E-02	-1,50E-02	-1,49E-02	-1,29E-02	-9,14E-03
3,98E-02	-3,09E-02	-8,50E-03	-9,32E-04	2,03E-03	1,77E-03	7,26E-04	2,45E-04	-1,12E-03	-4,67E-03
4,18E-02	2,31E-03	1,72E-02	2,11E-02	2,10E-02	1,93E-02	1,68E-02	1,41E-02	7,88E-03	-2,22E-03
4,38E-02	2,57E-02	3,69E-02	3,93E-02	3,84E-02	3,62E-02	3,08E-02	2,26E-02	1,12E-02	-8,06E-04
4,58E-02	4,41E-02	5,29E-02	5,41E-02	5,18E-02	4,79E-02	3,76E-02	2,45E-02	1,16E-02	1,60E-03
4,78E-02	5,48E-02	6,12E-02	6,08E-02	5,59E-02	4,94E-02	3,56E-02	2,28E-02	1,26E-02	5,12E-03
4,98E-02	4,88E-02	5,34E-02	5,23E-02	4,68E-02	4,04E-02	2,88E-02	2,02E-02	1,39E-02	8,34E-03
5,18E-02	2,52E-02	2,99E-02	2,99E-02	2,75E-02	2,48E-02	2,06E-02	1,71E-02	1,38E-02	1,05E-02
5,38E-02	-2,08E-03	3,50E-03	5,03E-03	6,06E-03	7,45E-03	1,07E-02	1,22E-02	1,22E-02	1,20E-02
5,58E-02	-1,86E-02	-1,34E-02	-1,19E-02	-1,03E-02	-7,86E-03	-1,22E-03	4,94E-03	9,64E-03	1,33E-02

5,78E-02	-2,48E-02	-2,04E-02	-1,96E-02	-1,93E-02	-1,81E-02	-1,21E-02	-3,12E-03	5,98E-03	1,33E-02
5,98E-02	-2,72E-02	-2,32E-02	-2,26E-02	-2,29E-02	-2,24E-02	-1,78E-02	-9,18E-03	1,17E-03	1,06E-02
6,00E-02	-2,74E-02	-2,34E-02	-2,29E-02	-2,31E-02	-2,26E-02	-1,81E-02	-9,68E-03	5,54E-04	1,01E-02

Tableau-A II-2 Déformation horizontale (E11) et verticale (E22) de la section 35-0801 du LTPP

Base de l'enrobé		Base de la fondation	
t	E11	t	E22
0	0	0	0
0,00175	2,5322E-07	0,00175	-9,0743E-08
0,00175	2,37011E-07	0,00175	-2,2479E-07
0,00375	-9,94311E-08	0,00375	-1,4565E-07
0,00375	-8,76103E-08	0,00375	-4,173E-08
0,00575	3,79451E-07	0,00575	-5,5956E-07
0,00575	3,52502E-07	0,00575	-8,0213E-07
0,00775	6,01973E-07	0,00775	-1,4923E-07
0,00775	5,4519E-07	0,00775	-5,1311E-07
0,00975	-5,29525E-08	0,00975	-4,9656E-07
0,00975	-3,42367E-08	0,00975	-3,716E-07
0,01175	8,54862E-06	0,01175	-2,4135E-06
0,01175	7,91043E-06	0,01175	-8,3621E-06
0,01375	3,78945E-05	0,01375	-2,2169E-05
0,01375	3,52639E-05	0,01375	-4,8421E-05
0,01575	0,000133478	0,01575	-8,59E-05
0,01575	0,000123922	0,01575	-0,00017907
0,01775	0,000246129	0,01775	-0,00021327
0,01775	0,000228426	0,01775	-0,00038309
0,01975	0,000278528	0,01975	-0,00028788
0,01975	0,000257468	0,01975	-0,00046344
0,02175	0,000261153	0,02175	-0,00026912
0,02175	0,000240648	0,02175	-0,00041579
0,02375	0,000264255	0,02375	-0,00024297
0,02375	0,000243412	0,02375	-0,00040689
0,02575	0,000276692	0,02575	-0,00024818
0,02575	0,00025472	0,02575	-0,00043782
0,02775	0,000253878	0,02775	-0,00024253
0,02775	0,000233284	0,02775	-0,00040613
0,02975	0,000203561	0,02975	-0,00019727
0,02975	0,00018643	0,02975	-0,00031706

0,03175	0,000154502	0,03175	-0,00013939
0,03175	0,000140908	0,03175	-0,00023776
0,03375	0,000115811	0,03375	-9,4408E-05
0,03375	0,000105124	0,03375	-0,00017824
0,03575	0,000082143	0,03575	-6,3356E-05
0,03575	7,41385E-05	0,03575	-0,00012142
0,03775	5,10265E-05	0,03775	-3,6694E-05
0,03775	4,54798E-05	0,03775	-7,0147E-05
0,03975	2,72288E-05	0,03975	-1,3895E-05
0,03975	2,35753E-05	0,03975	-3,5164E-05
0,04175	1,43035E-05	0,04175	-6,6251E-07
0,04175	1,17999E-05	0,04175	-1,6423E-05
0,04375	9,11366E-06	0,04375	3,04484E-06
0,04375	7,29658E-06	0,04375	-6,3743E-06
0,04575	6,70289E-06	0,04575	5,32808E-06
0,04575	5,31872E-06	0,04575	-3,1506E-07
0,04775	3,95698E-06	0,04775	8,52484E-06
0,04775	0,000002877	0,04775	2,91609E-06
0,04975	1,57195E-06	0,04975	6,86579E-06
0,04975	6,71088E-07	0,04975	2,77093E-06
0,05175	1,20112E-06	0,05175	-2,0955E-07
0,05175	2,91121E-07	0,05175	8,90303E-09
0,05375	9,92341E-07	0,05375	-5,907E-06
0,05375	1,27712E-09	0,05375	-3,5948E-06
0,05575	-1,62201E-06	0,05575	-4,5436E-06
0,05575	-2,5613E-06	0,05575	-3,3212E-06
0,05775	-3,75211E-06	0,05775	-9,8358E-08
0,05775	-4,60691E-06	0,05775	-2,8117E-07
0,05975	-4,34861E-06	0,05975	1,2308E-06
0,05975	-5,13484E-06	0,05975	1,69553E-06
0,06	-4,34571E-06	0,06	1,17727E-06
0,06	-5,12583E-06	0,06	1,74976E-06

Tableau-A II-3 Déflexions (U2) à la surface des chaussées réhabilitées soumises au chargement du FWD

Structure existante		Planage-resurfaçage		Retraitement type I		Retraitement type II	
t (s)	U2 (mm)	t (s)	U2 (mm)	t (s)	U2 (mm)	t (s)	U2 (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
0,00175	-0,000236	0,00175	-0,000194	0,00175	-0,000149	0,00175	-9,34E-05
0,00375	-0,000267	0,00375	-0,000203	0,00375	-0,000167	0,00375	-0,000123
0,00575	-0,001165	0,00575	-0,000921	0,00575	-0,000738	0,00575	-0,000467
0,00775	-0,001385	0,00775	-0,001096	0,00775	-0,00092	0,00775	-0,000652
0,00975	-0,00169	0,00975	-0,001312	0,00975	-0,00113	0,00975	-0,000819
0,01175	-0,008697	0,01175	-0,007127	0,01175	-0,005657	0,01175	-0,003579
0,01375	-0,051078	0,01375	-0,041284	0,01375	-0,032353	0,01375	-0,020218
0,01575	-0,206274	0,01575	-0,165604	0,01575	-0,130713	0,01575	-0,082551
0,01775	-0,531308	0,017084	-0,325815	0,0167879	-0,226529	0,01775	-0,21953
0,01975	-0,903956	0,019084	-0,619591	0,0187118	-0,457323	0,01975	-0,395965
0,02175	-1,2072	0,021084	-0,875252	0,0207118	-0,693499	0,02175	-0,56403
0,02375	-1,44696	0,023084	-1,0812	0,0227118	-0,894252	0,02375	-0,719277
0,02575	-1,6499	0,025084	-1,2653	0,0247118	-1,07575	0,02575	-0,869659
0,02775	-1,78679	0,027084	-1,41216	0,0267118	-1,2325	0,02775	-0,998882
0,02975	-1,8183	0,029084	-1,48349	0,0287118	-1,33451	0,02975	-1,08187
0,03175	-1,75275	0,031084	-1,47731	0,0307118	-1,37253	0,03175	-1,11036
0,03375	-1,62891	0,033084	-1,42	0,0327118	-1,36	0,03375	-1,09005
0,03575	-1,4842	0,035084	-1,33607	0,0347118	-1,31013	0,03575	-1,02883
0,03775	-1,33396	0,037084	-1,23158	0,0367118	-1,22482	0,03775	-0,93354
0,03975	-1,17535	0,039084	-1,10111	0,0387118	-1,10277	0,03975	-0,814963
0,04175	-0,998555	0,041084	-0,941921	0,0407118	-0,948315	0,04175	-0,688267
0,04375	-0,797384	0,043084	-0,761165	0,0427118	-0,774171	0,04375	-0,568665
0,04575	-0,576247	0,045084	-0,572803	0,0447118	-0,595817	0,04575	-0,467829
0,04775	-0,350471	0,047084	-0,39394	0,0467118	-0,429202	0,04775	-0,393287
0,04975	-0,14063	0,049084	-0,239877	0,0487118	-0,288381	0,04975	-0,34925
0,05175	0,0326486	0,051084	-0,123319	0,0507118	-0,18391	0,05175	-0,337236
0,05375	0,149448	0,053084	-0,05562	0,0527118	-0,123268	0,05375	-0,356533
0,05575	0,194791	0,055084	-0,043284	0,0547118	-0,109501	0,05575	-0,403537
0,05775	0,160994	0,057084	-0,084935	0,0567118	-0,140096	0,05775	-0,47243
0,05975	0,0538823	0,059084	-0,172281	0,0587118	-0,21014	0,05975	-0,555071
0,06	0,0362041	0,06	-0,223806	0,06	-0,272352	0,06	-0,565895

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AASHTO. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993: Aashto.
- Abaza, K. A. (2005). Performance-based models for flexible pavement structural overlay design. *Journal of transportation engineering*, 131(2), 149-159.
- AIPCR, A. m. d. l. r. (2003). Recyclage Guides pour : le retraitement en place au moyen de ciment, retraitement à froid à l'émulsion ou à la mousse de bitume, recyclage à chaud en centrale des enrobés bitumineux.
- Ameri, M., Mansourian, A., Khavas, M. H., Aliha, M., & Ayatollahi, M. (2011). Cracked asphalt pavement under traffic loading—A 3D finite element analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(8), 1817-1826.
- Anderson, T. (2005). Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications.
- Aragão, F., & Kim, Y.-R. (2012). Mode I fracture characterization of bituminous paving mixtures at intermediate service temperatures. *Experimental mechanics*, 52(9), 1423-1434.
- ASTM. (2010). *Standard test method for asphalt content of hot-mix asphalt by ignition method*.
- ASTM. (2012). Standard test method for linear-elastic plane strain fracture toughness K_{IC} of metallic materials. *E 399-12*.
- ASTM. (2016). *Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures*.
- Baaj, H. (2012). Dégradation et usure des revêtements routiers souples. Repéré à <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/materiaux-et-tribologie-42467210/degradation-et-usure-des-revetements-routiers-souples-tri4620/modes-de-degradation-et-d-usures-des-revetements-routiers-tri4620niv10003.html#3.1>
- Babuška, I., & Melenk, J. M. (1997). The partition of unity method. *International journal for numerical methods in engineering*, 40(4), 727-758.

- Baek, J. (2010). *Modeling reflective cracking development in hot-mix asphalt overlays and quantification of control techniques* (University of Illinois at Urbana-Champaign).
- Barenblatt, G. I. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. Dans *Advances in applied mechanics* (Vol. 7, pp. 55-129). Elsevier.
- Bergeron, G. (2005a). *Performance des techniques de retraitement en place et de recyclage à froid au Québec* présentée à Congrès annuel de l'Association des transports du Canada
Calgary (Alberta).
- Bergeron, G. (2005b). The Performance of Full-Depth Reclamation and Cold In-Place Recycling Techniques in Quebec. Dans *2005 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*.
- Bitume-Québec. (2010). *Profil de l'industrie de la chaussée souple*.
- Bitume-Québec. (2018). ENTRETIENDESROUTES.ca. Repéré à <http://entretiendesroutes.ca/>
- Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., & Graziani, A. (2011). A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials. *Construction and Building Materials*, 25(2), 773-778. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007>
- Burmister, D. M. (1945). The general theory of stresses and displacements in layered systems. I. *Journal of applied physics*, 16(2), 89-94.
- Carter, A. (2002). *Rhéologie en petite déformation des enrobés bitumineux et mesure de leur résistance à basse température à partir de l'essai TSRSTS* (École de technologie supérieure).
- Carter, A., Feisthauer, B., Lacroix, D., & Perraton, D. (2010). *Comparison of cold in-place recycling and full-depth reclamation materials*.
- Carter, A. D., Hugh, & MacInnis, K. S., Todd. (2018). *Hot Mix Asphalt* (Vol. 1st Edition). Canadian Technical Asphalt Association, CTAA.

- Carvalho, R. L. (2012). *Prediction of permanent deformation in asphalt concrete*.
- Chatti, K., Kutay, M. E., Lajnef, N., Zaabar, I., Varma, S., & Lee, H. S. (2017). *Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use with Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers*. Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Dave, E., Song, S., Buttlar, W., & Paulino, G. (2007). Reflective and thermal cracking modeling of asphalt concrete overlays. *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, 2, 1241-1252.
- Desai, C. S. (1979). Elementary finite element method. *Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Englewood Cliffs: Prentice-Hall*, 1979.
- Dhatt, G., Touzot, G., & Lefrançois, E. (2005). *Méthode des éléments finis*. Lavoisier.
- Di Benedetto, H., & Corté, J.-F. (2005). Matériaux Routiers Bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges. hermes: Coll.«Mécanique et Ingénierie des Matériaux». Paris: Hermes Science.
- Diffiné, T. (2012). *Analyse des déformations d'une chaussée contenant des matériaux bitumineux recyclés à froid* (École de technologie supérieure).
- Dolzycki, B., Jaczewski, M., & Szydłowski, C. (2017). The long-term properties of mineral-cement-emulsion mixtures. *Construction and Building Materials*, 156, 799-808. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.032>
- Doucet, F., & Auger, B. (2010). *Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des transports du Québec*. Service des matériaux d'infrastructures, Direction des laboratoires des
- Dugdale, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2), 100-104.
- Duncan, J. M., Monismith, C. L., & Wilson, E. L. (1968). Finite element analysis of pavements. *Highway Research Record*, 228, 18-33.
- Elseifi, M. A., & Al-Qadi, I. L. (2005). Modeling of strain energy absorbers for rehabilitated cracked flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 131(9), 653-661.

- Elseifi, M. A., Al-Qadi, I. L., & Yoo, P. J. (2006). Viscoelastic modeling and field validation of flexible pavements. *Journal of Engineering Mechanics*, 132(2), 172-178.
- Elseifi, M. A., Baek, J., & Dhakal, N. (2018). Review of modelling crack initiation and propagation in flexible pavements using the finite element method. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(3), 251-263.
- Elseifi, M. A., Mohammad, L. N., Ying, H., & Cooper III, S. (2012). Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 124-139. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657035>
- Erlingsson, S. (2004). Mechanistic pavement design methods—A road to better understanding of pavement performance. *Via Nordica*, 19th.
- Ferjani, A., Carter, A., Vaillancourt, M., Dardeau, A., & Gandi, A. (2019). Effect of cement content on cracking resistance of full-depth reclamation materials using the semicircular bending test. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(1), 411-422.
- Godenzoni, C., Graziani, A., & Corinaldesi, V. (2016). The Influence Mineral Additions on the Failure Properties of Bitumen Emulsion Mortars. Dans *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements* (pp. 327-333). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-024-0867-6_46
- Godenzoni, C., Graziani, A., & Perraton, D. (2017). Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 18(1), 130-150.
- Howard, I. L., & Warren, K. A. (2009). Finite-element modeling of instrumented flexible pavements under stationary transient loading. *Journal of Transportation Engineering*, 135(2), 53-61.
- Huang, Y. (2004). *Pavement analysis and design*.
- Huang, Y. H. (1993). *Pavement analysis and design*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd éd.). Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall.

- Im, S., Ban, H., & Kim, Y.-R. (2014). Characterization of mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using a semicircular specimen geometry. *Construction and Building Materials*, 52, 413-421.
- Irwin, G. R. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate. *Trans. ASME, Ser. E, J. Appl. Mech.*, 24, 361-364.
- Jenq, Y.-S., Liaw, C.-J., & Lieu, P. (1993). Analysis of crack resistance of asphalt concrete overlays--a fracture mechanics approach. *Transportation Research Record*, (1388).
- Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Martin, A. E., Daniel, J. S., & Salari, S. (2018). Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, 167, 286-298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.014>
- Kazimierowicz-Frankowska, K. (2016). Influence of Cracks on the Lifetime of Semi-Rigid Pavements. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 63(2-3), 83-100.
- Kim, K. W., Kweon, S. J., Doh, Y. S., & Park, T.-S. (2003). Fracture toughness of polymer-modified asphalt concrete at low temperatures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(2), 406-413.
- Kim, M., Mohammad, L. N., & Elseifi, M. A. (2012). Characterization of Fracture Properties of Asphalt Mixtures as Measured by Semicircular Bend Test and Indirect Tension Test. *Transportation Research Record*, 2296(1), 115-124. doi: 10.3141/2296-12. Repéré à <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/2296-12>
- Kim, Y.-R. (2011). Cohesive zone model to predict fracture in bituminous materials and asphaltic pavements: state-of-the-art review. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4), 343-356. doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.575138>
- Kim, Y.-R., Aragao, F. T., Allen, D. H., & Little, D. N. (2010). Damage modeling of bituminous mixtures considering mixture microstructure, viscoelasticity, and cohesive zone fracture. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(8), 1125-1136.
- 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.*

- Lancaster, I., Khalid, H., & Kougiumtzoglou, I. (2013). Extended FEM modelling of crack propagation using the semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, 48, 270-277.
- Langlois, P. (2005). *Enrobés: Formulation selon la méthode LC*. Ministère des transports Québec . Laboratoire des chaussées
Transports Québec.
- LCPC. (1998). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Catalogue des dégradations de surface des chaussées, complément à la méthode d'essai N° 38-2 Relevé des dégradations de surface des chaussées. (pp. p 91.). Paris.
- Lefeuvre, Y. (2001). *Contribution a l'étude de comportement en fatigue des enrobés bitumineux, étude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus, expérimentation-modélisation* (Thèse de doctorat en structures et matériaux, Paris, École nationale des ponts et chaussées.).
- Légaré, A. (2005). L'entretien du réseau routier du Québec, l'exigence de solutions durables. Étude réalisée pour le compte de la Coalition pour l'entretien et la réfection du réseau routier du Québec (pp. p 114.). Québec.
- Li, M., Wang, H., Xu, G., & Xie, P. (2017). Finite element modeling and parametric analysis of viscoelastic and nonlinear pavement responses under dynamic FWD loading. *Construction and Building Materials*, 141, 23-35.
- Li, X.-J., & Marasteanu, M. (2010). Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental mechanics*, 50(7), 867-876.
- Li, X., Marasteanu, M. O., Iverson, N., & Labuz, J. F. (2006). Observation of crack propagation in asphalt mixtures with acoustic emission. *Transportation Research Record*, 1970(1), 171-177.
- Ling, J., Tao, Z., Qian, J., & Fu, W. (2018). Investigation the influences of geotextile on reducing the thermal reflective cracking using XFEM. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(5), 391-398.
- LTPP. (2019) (pp. <https://infopave.fhwa.dot.gov/>).

- Mahmoud, E., Saadeh, S., Hakimelahi, H., & Harvey, J. (2014). Extended finite-element modelling of asphalt mixtures fracture properties using the semi-circular bending test. *Road Materials and Pavement Design*, 15(1), 153-166.
- Majidzadeh, K. (1976). Application of fracture mechanics for improved design of bituminous concrete.
- Marquis, B., Bergeron, G., Pellerin, F., Bérubé, P., & Decreon, A. (1998). État d'avancement de l'étude sur l'utilisation des matériaux recyclés dans les chaussées. *Matériaux recyclés: recueil des communications du 33e Congrès annuel de l'AQTR, Québec (20 et 21 avril 1998)*, 1, 533-553.
- Mikhail, M. Y., & Mamlouk, M. S. (1997). Effect of vehicle-pavement interaction on pavement response. *Transportation Research Record*, 1570(1), 78-88.
- Moës, N., & Belytschko, T. (2002). X-FEM, de nouvelles frontières pour les éléments finis. *Revue européenne des Eléments*, 11(2-4), 305-318.
- Mohammad, L. N., Kim, M., & Elseifi, M. (2012). Characterization of asphalt mixture's fracture resistance using the semi-circular bending (SCB) test. Dans *7th RILEM international conference on cracking in pavements* (pp. 1-10). Springer.
- Molenaar, A., Scarpas, A., Liu, X., & Erkens, S. (2002). Semi-circular bending test; simple but useful? *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 71.
- MTQ. (1997). Réfection de la route 117 : planches expérimentales de 1995 et de 1996 (Vol. Info DLC Vol.2 , no 5,, pp. 2): MTQ.
- MTQ. (2001). *Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion*. Gouvernement du Québec.
- MTQ. (2011). *Recueil des méthodes d'essai LC* Ministère des Transports du Québec
- MTQ. (2013). Réseau routier. Repéré à http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grand_public/velo/reseau_routier
- MTQ. (2019). Plan stratégique 2019-2023. Repéré à http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grand_public/velo/reseau_routier

- Mull, M., Stuart, K., & Yehia, A. (2002). Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement. *Journal of materials science*, 37(3), 557-566.
- Nasser, H. (2016). *Méthode de résolution du M4-5n par éléments finis mixtes pour l'analyse des chaussées avec discontinuités*.
- NCHRP. (2004). *National Cooperative Highway Research Program 2004. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Chapter 3: Design of New and Reconstructed Flexible Pavements*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- Nguyen, M. L. (2009). Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux. *INSA 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* (pp. 237-248). Springer.
- 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.
- Oudin, H. (2008). *Méthode des éléments finis*.
- Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Lambros, J., El-Khatib, A., Singhvi, P., & Doll, B. (2016). Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters. *Construction and Building Materials*, 115, 390-401. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.144>
- Park, S., & Schapery, R. (1999). Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I—A numerical method based on Prony series. *International journal of solids and structures*, 36(11), 1653-1675.
- Paulino, G. H., Song, S. H., & Buttlar, W. G. (2004). Cohesive zone modeling of fracture in asphalt concrete. Dans *Proc., 5th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: Mitigation, Risk Assessment, and Prevention* (pp. 63-70).

- Pérez, I., Medina, L., & del Val, M. Á. (2013). Mechanical properties and behaviour of in situ materials which are stabilised with bitumen emulsion. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), 221-238.
- Perret, J. (2003). *Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic*. EPFL.
- Prabel, B. (2007). *Modélisation avec la méthode X-FEM de la propagation dynamique et de l'arrêt de fissure de clivage dans un acier de cuve REP*.
- Priest, A. L., & Timm, D. H. (2006). *Methodology and calibration of fatigue transfer functions for mechanistic-empirical flexible pavement design*. National Center for Asphalt Technology NCAT, Auburn University, Alabama.
- Rahman, A., & Tarefder, R. A. (2017). Interconversion of frequency domain complex modulus to time domain modulus and compliance of asphalt concrete: numerical Modeling and laboratory validation. Dans *ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Rashadul Islam, M., Vallejo, M. J., & Tarefder, R. A. (2016). Crack propagation in hot mix asphalt overlay using extended finite-element model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 04016296.
- Saha, G., & Biligiri, K. P. (2015). Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using Semi-Circular Bending test based on fracture energy approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 142, 154-169.
- SETRA, L. (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussée. *Guide technique, Dec*.
- Song, S. H., Paulino, G. H., & Buttlar, W. G. (2006). A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(18), 2829-2848.
- St-Laurent, D. (1995). *Évaluation structurale de chaussées souples dans un contexte climatique nordique*. Université Laval.

- St-Laurent, D. (2001). Logiciel de dimensionnement des chaussées souples. *Vol. 6, no 1*.
- Systèmes, D. (2013). ABAQUS User's & Theory Manuals—Release 6.13-1. *Providence, RI, USA*.
- Wagnoner, M., Buttlar, W. G., & Paulino, G. (2005). Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture. *Experimental mechanics*, 45(3), 270-277.
- Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., & Paulino, G. H. (2005). Development of a single-edge notched beam test for asphalt concrete mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 33(6), 452-460.
- Wang, H., & Wang, J. (2014). Numerical analysis of surface crack propagation in flexible pavements using XFEM and cohesive zone model. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 7(3), 178-184.
- Wang, X., Li, K., Zhong, Y., & Xu, Q. (2018). Investigation of Thermal Reflective Cracking in Asphalt Pavement Using XFEM Coupled with DFLUX Subroutine and FILM Subroutine. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-11.
- Wu, Z., Chen, X., & Yang, X. (2011). *Finite element simulation of structural performance on flexible pavements with stabilized base/treated subbase materials under accelerated loading*. Louisiana Transportation Research Center.
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., & Amirkhanian, S. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579-604.