

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Ing.

PAR
ROXANA BALBA

ÉVALUATION EN LABORATOIRE DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES
ANTI-REMONTÉS DE FISSURES POUR LE RESURFAÇAGE DES CHAUSSEES
SOUPLES

MONTREAL, LE 5 SEPTEMBRE 2006

© droits réservés de Roxana Balba

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

**M. Daniel Perraton, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de Technologie Supérieure**

**M. Alan Carter, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de Technologie Supérieure**

**M. Yvan Paquin, membre du jury
D.J.L., Département technique**

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

LE 23 AOÛT 2006

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ÉVALUATION EN LABORATOIRE DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES ANTI-REMONTÉS DE FISSURES POUR LE RESURFAÇAGE DES CHAUSSEES SOUPLES

Roxana Balba

SOMMAIRE

Les chaussées présentent souvent de nombreuses fissures dont les causes peuvent être très variées. Selon le type de chaussées et l'origine de la fissuration, ces fissures peuvent prendre des formes diverses. Lorsqu'elles apparaissent à la surface de la chaussée, les fissures ont sur le comportement de celle-ci des conséquences très dommageables.

Le projet proposé veut s'inscrire dans la démarche entreprise, depuis quelques années, par le ministère des Transports du Québec pour minimiser la remontée des fissures dans les recouvrements en enrobé bitumineux.

Le projet fait également suite à une étude menée par le ministère des Transports du Québec sur « La remontée des fissures dans les recouvrements à l'enrobé bitumineux » (St-Laurent et Bergeron, 2000).

Le projet propose de caractériser la nature et l'origine de la remontée des fissures dans les chaussées, dans un contexte québécois, et d'évaluer des solutions pertinentes quant au contrôle de cette fissuration. En premier lieu, il s'agit de déterminer et de comprendre les différentes causes possibles de la fissuration des chaussées ainsi que les différents mécanismes de remontée des fissures à la surface. Dans un deuxième temps, il convient de maîtriser les concepts et les méthodes proposés dans la documentation pour contrôler la remontée des fissures dans la couche de recouvrement. Suite à cette étude, des essais de laboratoire seront menés afin de proposer des solutions adaptées et optimisées aux types de remontée de fissures identifiés.

Les objectifs spécifiques du projet sont :

- Recenser de façon exhaustive les causes de la remontée des fissures à la surface des chaussées;
- Répertorier et maîtriser les méthodes, les concepts, la mise en œuvre pour gérer la remontée des fissures et cibler ceux qui sont les plus pertinents à l'environnement québécois;
- Identifier et comprendre les paramètres clés reliés à la remontée des fissures à la surface des chaussées;
- Vérifier l'influence de ces paramètres sur diverses solutions, anti-remontée de fissures, qui ont été testées en laboratoire;
- Formuler des recommandations sur la solution à envisager selon le type de remontée de fissures observé.

THE LABORATORY EVALUATION OF DIFFERENT SYSTEMS ANTI-PROPAGATION OF CRACKS ON THIN ASPHALT OVERLAY

Roxana Balba

ABSTRACT

The roadways may often present numerous cracks and what caused them could be very diverse. Mainly function of the roadway type, the origin of the cracks can take various forms and their appearance to the surface of the roadway conduct to very harmful consequences.

The objective of this project intends to be in compliance with the requirements of the ministère des Transports du Québec in the attempt of finding applicable procedures that will minimize the impact of cracks propagation in the asphalt overlay.

The project is part of a study conducted by ministère des Transports du Québec regarding « Cracks propagation throughout asphalt overlaid roadways» (St-Laurent and Bergeron, 2000).

Laboratory testing proposes to distinguish the nature and the origin of the propagation of fissures in the roadways, in a Quebec context, and to evaluate pertinent solutions that will control such developments. First of all, the intention is to determine and to understand the different possible causes of the cracks in the roadways as well as to identify the different mechanisms of their propagation to the surface. Second of all, the intention is to establish the necessary concepts and the methods proposed in this documentation in order to be able to control the propagation of cracks in the superior layer bearing the every day traffic. In accordance with this study, lab tests will lead to suggestions and solutions adjusted and optimized function of the nature of each model that has been analyzed.

The specific objectives of the project are the following:

- Inventory in a comprehensive manner of the causes that produces the propagation of the cracks at the surface of the roadways;
- Index and mastery of the methods, concepts, and executions with the purpose of being able to manage the propagation of the cracks and target those that are the most pertinent to the Quebec environment;
- Identify and understand the key parameters that are in direct relation with the propagation of the cracks at the surface of the asphalt overlay;
- Verify the influence of these parameters in connection with various anti- propagation procedures, that have been tested in laboratory;
- Formulate recommendations to the solutions that reference only the category of the crack propagation considered.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier ici tous ceux qui par leur aide et leur soutien m'ont permis de réaliser cette étude.

Cette étude a été réalisée au LUCREB de l'École de Technologie Supérieure, et s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec le ministère de Transport du Québec et l'Université de Laval.

Je veux exprimer ici ma gratitude à l'ensemble des personnes qui m'ont permis, par leur aide matérielle et morale, de mener ce travail à terme.

Premièrement, j'aimerais remercier mon directeur de recherche, M. Daniel Perraton, pour la confiance qu'il m'a manifestée, pour avoir cru en moi, en mes connaissances et mes capacités de mener à terme ce projet de recherche. Je le remercie pour le support moral et pour les conseils reçus.

Je remercie également M. John Lescelleur, pour son précieux temps accordé, pour son soutien informatique très important sans lequel il aurait été impossible de réaliser ce projet de recherche.

Merci à M. Bruno Lavoie pour son aide et aussi à M. Francis Bilodeau, M. Mathieu Meunier et tous les membres du LUCREB pour leur soutien et le support technique.

Je tiens également à remercier mes parents, qui malgré la distance ont su m'encourager tout au long de mes études.

Finalement, je remercie mon mari pour son soutien et encouragement.

TABLE DES MATIÈRES

Page

1.2.5.2	Cheminement de la fissure	29
1.3	Maîtrise de la remontée des fissures dans les chaussées	31
1.3.1	Empêcher ou de ralentir la remontée des fissures dans la couche de surface	32
1.3.1.1	Augmentation de l'épaisseur de la couche de resurfaçage.....	32
1.3.1.2	Optimisation des propriétés de l'enrobé en couche de resurfaçage	32
1.3.1.3	Interposition d'un produit ou d'un complexe entre la couche fissurée et la couche de resurfaçage	33
1.3.2	Modification des caractéristiques de la couche de resurfaçage par «renforts » des aditifs de structure	35
CHAPITRE 2	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	36
2.1	Introduction	36
2.2	Programme expérimental	36
2.2.1	Présentation du montage expérimental utilisé pour étudier la remontée des fissures	38
2.2.1.1	Système mécanique	40
2.2.1.2	Système de mesure	42
2.2.1.3	Bilan du calcul des paramètres de performance.....	46
2.2.2	Synthèse des réflexions menées en vue d'établir les conditions d'essai pour les essais de remontée de fissures	52
2.2.2.1	Mouvement horizontal imposé en conditions d'essai	52
2.2.2.2	Mouvement vertical imposé en cours d'essai	56
2.2.2.3	Fréquence de sollicitation verticale	60
2.2.2.4	Synthèse des conditions d'essai imposées dans le cadre du programme d'essai	60
2.2.3	Programme expérimental	61
CHAPITRE 3	DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA CONFECTION DES ÉCHANTILLONS EN LABORATOIRE	65
3.1	Matériaux utilisés	65
3.1.1	Gros granulats (pierre).....	66
3.1.2	Granulats fins de calibre 0-5 mm	68
3.1.3	Bitume	70
3.1.4	Membrane élastomère	71
3.1.5	Liant d'accrochage	74
3.2	Formulation des enrobés utilisée	75
3.3	Descriptions des différents enrobés utilisés dans le cadre de ce projet	79
3.3.1	L'enrobé ESG-10 - vérification de l'homogénéité du lot prélevé en usine	79
3.3.1.1	Procédure d'essais	79

3.3.1.2	Tableau récapitulatif des variations mesurées des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse	84
3.3.2	L'enrobé EB-14	85
3.3.3	L'enrobé EB-10S utilisé comme substrat	86
3.3.4	La Chape CH-10	86
3.3.5	ECF (Enrobé coulé à froid)	87
3.4	Quelques caractéristiques rhéologiques des enrobés utilisés dans le cadre de ce projet	87
3.4.1	Fabrication et dimensionnement des éprouvettes	88
3.4.2	Essais de module complexe	89
3.4.3	Essais à basse température TSRST	92
3.4.4	Mesure du coefficient de dilatation thermique	93
3.5	Confection de corps d'épreuve	96
3.5.1	Rugosité de surface des substrats	99
CHAPITRE 4	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	101
4.1	Mode de rupture et durée de vie	101
4.2	Résultats d'essais du programme expérimental	106
4.2.1	Essais réalisés à +5°C	106
4.2.2	Essais réalisés à -5°C	109
CHAPITRE 5	SYNTHÈSE ET ANALYSE DES RÉSULTATS	138
5.1	Facteur de translation, a_T , permettant de transposer les résultats d'un domaine de température à un autre	139
5.2	Déformation horizontale maximale imposée, $\epsilon_{\max}$	141
5.3	Vitesse moyenne de la déformation horizontale maximale imposée, $\bar{\epsilon}_{\max}$	145
5.4	Analyse des résultats pour les deux températures mises à l'essai	146
5.5	Relation entre la force horizontale, F_H , et la durée de vie, N_f , et la vitesse de déformation imposée	150
5.6	Influence du type de substrat utilisé en cours d'essai	152
5.7	Relation entre Δ_H et le type de substrat	153
5.8	Influence de l'épaisseur de resurfaçage sur les résultats d'essai	157
5.9	Influence du type de système de resurfaçage quant à la durée de vie des éprouvettes	159
5.10	Performance des différents systèmes de resurfaçage testés à $T = -5^\circ\text{C}$	159
5.11	Performance des différents systèmes de resurfaçage testés à $T = +5^\circ\text{C}$	164

CHAPITRE 6	PROGRAMME DE RECHERCHE COMPLÉMENTAIRE	167
6.1	Effet de l'amplitude du battement sur la performance d'un système SAMI	169
6.2	Effet de la température sur la performance d'un système SAMI	175
CONCLUSION		184
ANNEXE 1	Matériaux routiers	186
ANNEXE 2	Ensemble des composantes liées à l'instrumentation des corps d'épreuve	196
ANNEXE 3	Calcul des amplitudes des déformations imposées en verticale	206
ANNEXE 4	Calcul des amplitudes des déformations imposées en horizontale	213
ANNEXE 5	Certificat de conformité du bitume	218
ANNEXE 6	Calculs effectués pour l'obtention des facteurs de correction induit par la four à ignition	224
ANNEXE 7	Mesure de la rugosité à l'aide d'un pendule de frottement	227
ANNEXE 8	Confection des corps d'épreuve et la mise en place	231
ANNEXE 9	Fiche technique d'ECF (enrobé coulé à froid)	252
ANNEXE 10	Caractéristiques des granulats pour les enrobés EB-14, ESG-10, EB-10S, CH-10	258
ANNEXE 11	Exigences du MTQ aux enrobé bitumineux à chaud et à froid	263
ANNEXE 12	Systeme SAMI	266
BIBLIOGRAPHIE		271

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I Protocole d'identification de la fissuration pour chaussée souple (source : MTQ)	7
Tableau II Origine des fissures dans les chaussées souples	13
Tableau III Type de sollicitation pouvant provoquer la remontée des fissures	28
Tableau IV Détail des corps d'épreuve de référence	47
Tableau V Synthèse des conditions retenues pour les essais de remontée de fissures	60
Tableau VI Synthèse des essais de laboratoire à réaliser sur le montage bi-axial ...	63
Tableau VII Synthèse des essais en laboratoire	64
Tableau VIII Caractéristiques des gros granulats utilisés	67
Tableau IX Caractéristiques des fins granulats utilisés	69
Tableau X Caractéristiques des bitumes PG 58-28 et PG 70-28 et de l'émulsion ...	71
Tableau XI Caractéristiques du liant de la membrane élastomère et du bitume PG 58-28	73
Tableau XII Caractéristiques du liant (source : Sintra Inc.)	75
Tableau XIII Formulation des enrobés	78
Tableau XIV Variations mesurées pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de chantier	85
Tableau XV Caractéristiques mécaniques d'enrobé (PG 58-34)	86
Tableau XVI Liste des principaux essais réalisés	89
Tableau XVII Valeurs des paramètres du modèle de Huet-Sayegh pour les enrobés étudiés.....	90
Tableau XVIII Données recueillies lors de l'essai TSRST	92
Tableau XIX Résultats des coefficients de dilatation thermique en fonction de la température.....	95
Tableau XX Relevé des mesures de rugosité.....	100
Tableau XXI Synthèse des essais effectués à +5°C	112

Tableau XXII	Synthèse des essais effectués à -5°C	113
Tableau XXIII	Synthèse des résultats des essais de simulation de la remontée des fissures pour le groupe d'éprouvettes dont l'épaisseur de resurfaçage (ESG-10) est égale à 55mm	144
Tableau XXIV	Déplacements mesurés à l'interface suivant le type de substrat utilisé	156
Tableau XXV	Pentes correspondantes de la relation K_s vs le nombre de cycles verticaux pour les essais effectués à -5°C	161
Tableau XXVI	Synthèse des essais – Système SAMI de resurfaçage	173
Tableau XXVII	Variation de l'amplitude du déplacement horizontal (Δx) en fonction de la température	177

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Fissures dans les chaussées (Brodeur et coll., 2002)6
Figure 2	Différentes aspects des fissures (DRCR, 1979)8
Figure 3	Différentes configurations des fissures (DRCR, 1979).....9
Figure 4	Schématisation des sollicitations induites par la fatigue (Dumont , Di Benedetto, 1998).....10
Figure 5	Structure de chaussée bicouche.....17
Figure 6	Relation entre la déflexion et l'ECAS (Asphalt Institute, 1983).....19
Figure 7	Modèle type de pose de systèmes anti-fissures (Rigo, et coll, 1993).....20
Figure 8	Les trois différents modes de propagation d'une fissure au sein d'un milieu continu.....21
Figure 9	Mouvements possibles des lèvres d'une fissure (Laveissière, 2002).....22
Figure 10	Schématisation des sollicitations induites par la température (Dumont et Di Benedetto, 1998)23
Figure 11	Effet du gel et du dégel sur une route : Gonflement au gel (MTQ)25
Figure 12	Effet du gel et du dégel sur une route : Affaissement au dégel (MTQ) ...25
Figure 13	Cheminement d'une fissure (Goacolou, 1982, Lefort, 1999)30
Figure 14	Principes du découplage partiel.....35
Figure 15	Principales phases du programme expérimental37
Figure 16	Vue d'ensemble de l'appareil proposé pour étudier la remontée des fissures dans les systèmes de resurfaçage39
Figure 17	Vue d'ensemble de l'installation de l'appareil dans l'enceinte thermique et sur la presse hydraulique40
Figure 18	Croquis illustrant le mouvement associé au plateau A dans le montage proposé41
Figure 19	Croquis illustrant le mouvement associé au plateau B dans le montage proposé42
Figure 20	Directions principales au plan de la fissure43

Figure 21	Schéma illustrant la disposition de l'instrumentation sur le corps d'épreuve	44
Figure 22	Position des capteurs de déplacement	45
Figure 23	a) Approche par la mécanique de la rupture et b) approche par un endommagement localisé du cordon résistant	48
Figure 24	Élément de joint à 6 nœuds	49
Figure 25	Relation entre les mesures effectuées et le calcul du paramètre K_s	51
Figure 26	Températures moyennes de mois novembre, décembre, janvier, février, mars et avril : au Québec	53
Figure 27	Températures annuelles au Québec	54
Figure 28	Cycle de chargement du mouvement horizontal	55
Figure 29	Représentation schématique du mouvement horizontal imposé	56
Figure 30	Distances fixées pour la position des repères de déplacements verticaux	58
Figure 31	Variation du déplacement vertical relatif	59
Figure 32	Schéma des constituants de chaque matériel bitumineux	65
Figure 33	Aspect d'une membrane en bitume caoutchouc après mise en œuvre sur une chaussée	74
Figure 34	Prise d'échantillons à l'usine d'enrobage	76
Figure 35	Variation de la teneur en bitume des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse	81
Figure 36	Variation de la teneur en pierre (fraction > 5 mm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse de l'enrobé ESG-10	82
Figure 37	Variation de la teneur en particules fines (fraction passant le tamis de 80 μm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse de l'enrobé ESG-10	83
Figure 38	Variation du pourcentage de vides à 80 girations à l'essai à la PCG en fonction du lot échantillonné en masse à l'usine pour l'enrobé ESG-10	84
Figure 39	Schématisation du plan de carottage des plaques d'enrobés pour les essais de TSRST, de coefficient de dilatation thermique et de module complexe	88

Figure 40	Représentation dans le plan Cole-Cole des résultats expérimentaux obtenus pour les 3 enrobés étudiés et des courbes obtenues de l'application du modèle de Huet-sayegh ($\varnothing$ 80 mm X 120 mm; traction/compression alternée ($\varepsilon_{\text{MOYEN}}=0$))91
Figure 41	Résultats de l'essai TSRST93
Figure 42	Schématisation des éprouvettes pour l'essai de coefficient de dilatation thermique94
Figure 43	Variations typiques des températures pour laquelle une éprouvette est soumise durant l'essai visant à mesurer le coefficient de dilatation thermique95
Figure 44	Résultats des coefficients de dilatation thermique96
Figure 45	Corps d'épreuve en cours et après préparation98
Figure 46	Synthèse des différents modes de rupture observés sur les systèmes de resurfaçage testés en remontée des fissures.....102
Figure 47	Évolution de $F_{\text{horizontal}}$ en cours d'essai.....103
Figure 48	Évolution de l'angle de phase apparent entre le déplacement et la force verticale en cours d'essai ($T^{\circ}_{\text{Essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x=1\text{mm}$; $e_{\text{ReSurf}}=100\text{ mm}$; Substrat : EB-14).....105
Figure 49	Évolution de la force horizontale en cours d'essai. ($T^{\circ}_{\text{Essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x=1\text{mm}$; $e_{\text{ReSurf}}=100\text{ mm}$; Substrat : EB-14).....105
Figures 50 -61	Résultats des essais de remonté de fissures114
Figure 62	Relation entre la norme du module complexe et la fréquence de sollicitation (le temps de sollicitation), établie en petites déformations pour l'enrobé ESG-10, permettant d'illustrer le principe d'équivalence temps-température (PETT).....140
Figure 63	Croquis illustrant les différents joncs existants entre les repères de fixation de l'extensomètre.....143
Figure 64	Évolution de déplacement imposé en cours d'essai ($e_{\text{rReSurf}}=55\text{mm}$; ReSurf =ESG-10; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; Substrat : EB-14; REF-Labo).....145
Figure 65	Relation entre la durée de vie, N_f , et la fréquence équivalente de sollicitation pour l'ensemble des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 55mm en référence à une température de -5°C ($e_{\text{rReSurf}}=55\text{mm}$; ReSurf =ESG-10)148
Figure 66	Relations contrainte-déformation établies en traction directe sur éprouvettes cylindriques ($\varnothing 80 \times 120 \text{mm}^2$) pour diverses températures et vitesses de sollicitation (Ollard 2003).....148

Figure 67	Relation entre la force horizontale et la vitesse de déformation imposée pour l'ensemble des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 55mm ($e_{rReSurf} = 55\text{mm}$; $ReSurf = \text{ESG-10}$).....	151
Figure 68	Relation entre la durée de vie et la vitesse de déformation imposée pour l'ensemble des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 55mm ($e_{rReSurf} = 55\text{mm}$; $ReSurf = \text{ESG-10}$).....	151
Figure 69	Force horizontale en fonction du type de substrat.....	152
Figure 70	Force horizontale relative au substrat référence en fonction du type de substrat.....	152
Figure 71	Déplacement horizontal à l'interface en fonction du type de substrat ...	153
Figure 72	Déplacement horizontal en surface en fonction du type de substrat	154
Figure 73	Relation entre les déplacements horizontaux mesurés à l'interface et à la surface du resurfaçage et le nombre de cycles verticaux.....	155
Figure 74	Relation entre la force horizontale et le nombre de cycles pour les trois différents systèmes de resurfaçage étudiées dans le cadre de ce projet : resurfaçage simple-agent de liaison; resurfaçage avec membrane élastomère et resurfaçage avec chape d'étanchéité (CH10); ($T_{essai} = -5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 1\text{mm}$; $e_{rReSurf} = 55\text{mm}$; Substrat = EB-14; $ReSurf = \text{ESG-10}$)	160
Figure 75	Relation entre K_s et le nombre de cycles pour les trois systèmes de resurfaçage étudiées: Agent de liaison (émulsion seule); découplage avec Chape; découplage avec SAMI ($T_{essai} = -5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 1\text{mm}$; $e_r = 55\text{mm}$; Substrat = EB-14).....	162
Figure 76	Relation entre la force horizontale et le déplacement imposé après différents cycles d'essai ($T_{essai} = -5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 1\text{mm}$; $e_{rReSurf} = 55\text{mm}$; Substrat = EB-14; Resurfaçage = ESG-10; Système SAMI).....	163
Figure 77	Relation entre la force horizontale et le nombre de cycles pour les trois différents systèmes de resurfaçage étudiées dans le cadre de ce projet : resurfaçage simple-agent de liaison; resurfaçage avec membrane élastomère et resurfaçage avec chape d'étanchéité (CH10) ($T_{essai} = +5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 2\text{mm}$; $e_{rReSurf} = 55\text{mm}$; $ReSurf = \text{ESG-10}$).....	164
Figure 78	Relation entre les déplacements horizontaux mesurés à l'interface et à la surface du resurfaçage et le nombre de cycles verticaux pour les systèmes SAMI et avec Chape pour les deux températures d'essais étudiées (-5°C et $+5^{\circ}\text{C}$)	166
Figure 79-81	Résultats des essais de remontée de fissures pour un resurfaçage avec système SAMI; $T_{essai} = -7,5^{\circ}\text{C}$	170

Figure 82	Relation entre la durée de vie et le battement imposé, évaluée sur un système SAMI.....	174
Figure 83	Variation du coefficient de dilatation thermique en fonction de la température pour l'enrobé EB-14.....	176
Figure 84	Résultats des essais de remontée de fissures pour un resurfaçage avec système SAMI; $T_{\text{essai}} = -15^{\circ}\text{C}$	178
Figure 85	Résultats des essais de remontée de fissures pour un resurfaçage avec système SAMI; $T_{\text{essai}} = -30^{\circ}\text{C}$	179
Figure 86	Relation entre le facteur de rigidité (K_s) et la température d'essais pour un système SAMI.....	181
Figure 87	Relation entre les durées de vie estimées quant à la remontée verticale d'une fissure et la propagation de la fissure dans un plan horizontal et la température d'essai évaluée sur un système SAMI.....	182
Figure 88	Relation entre la durée de vie et le battement imposé, évaluée sur un système SAMI et un enrobé de référence.....	183

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

a	rayon de contact d'un essieux simple
<i>AASHTO</i>	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AI	Asphalt Institute
c	facteur critique d'ajustement de la période
CCDG	Cahier des Charges et Devis Généraux
CH	chape
cm	centimètre
coll.	Collaborateur
CPP	coefficient de polissage par projection
CF-HD	capteur de force horizontal droite
CF-HG	capteur de force horizontal gauche
D	diamètre du gros granulat
$\bar{D}$	diamètre moyen du gros granulat
d	diamètre du granulat fin
$\bar{d}$	diamètre moyen du granulat fin
D_b	densité du bitume
D_{ga}	densité apparente
D_{gb}	densité brute d'un granulat
D_{ge}	densité effective d'un granulat
D_{max}	diamètre maximal des particules
D_{mb}	densité brute de l'enrobé compacté
D_{min}	diamètre minimal des particules
D_{mm}	densité maximale du mélange
e	épaisseur de l'enrobé (cm)
ex.	exemple
e_r	épaisseur de resurfacement (mm)
$E^*(\omega)$	module complexe

E1	module complexe partie réelle
E2	module complexe partie imaginaire
E_α	module instantané (Huet-Sayegh)
E_0	module statique (Huet-Sayegh)
$ E^* $	Norme du module complexe $ E^* = (E_1^2 + E_2^2)^{1/2}$
EB	Enrobé Bitumineux
ÉCAS	Équivalent de Charge Axiale Simple
ECF	enrobé coulé à froid
EL	élasticité linéaire
ESG	Enrobé Semi-Grenu
ETS	école de technologie supérieure
E_{sub}	module élastique de la chaussée fissuré
E_{OL}	module élastique du resurfacement (OL : <i>overlay</i>)
F	facteur de correction lié à la température (F=1 à 21°C)
FH	force horizontale
Fr	fréquence
FV	force verticale
FWD	Falling Weight Deflectometer
G^*	module de cisaillement complexe
h	constant modele Huet-Sayegh ($h=2\beta/\pi$)
h_{OL}	épaisseur du resurfacement (OL : <i>overlay</i>)
Hz	hertz
i	partie imaginaire d'un nombre complexe ($i^2=-1$);
k	constant modele Huet-Sayegh ($k=2\alpha/\pi$)
kg	kilogramme
kN	kilonewton
kPa	kilopascal
K_s	facteur de rigidité (MPa/mm)

K_{s0}	valeur initiale de K_s (MPa/mm)
l	largeur
L	longueur
LA	Los Angeles
LABO	laboratoire
LC	Laboratoire des Chaussées
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
l_j	largeur du joint
Log	logarithme
l_r	largeur du resurfacement (mm)
LUCREB	Laboratoire Universitaire sur les Chaussées Routes et Enrobés Bitumineux
mm	millimètre
MPa	méga Pascal
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MTS	Material Test System
N	nombre de giration
n	nombre d'échantillon
NQ	Normes du Québec
n/a	non applicable
NF	Norme Française
N_f	durée de vie
n/d	non déterminé
n/m	non mesurable
Pa	Pascal
P_b	pourcentage de bitume dans l'enrobé
P_{ba}	pourcentage de bitume absorbé par les granulats
P_{bi}	pourcentage de bitume initial dans l'enrobé
P_s	pourcentage de granulat dans l'enrobé
PCA	Association du Ciment Portland

PCG	Presse à Cisaillement Giratoire
PETT	Principe d'équivalence temps- température
PG	grade de performance d'un bitume (" <i>Performance Grade</i> ")
q	pression de contact du pneu
R	resurfaçage
Ref labo	référence laboratoire
Resurf.	Resurfaçage
S	substrat
s	écart type
<i>SAMI</i>	<i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i>
SBS	Styrene-butadiène-styrene
T	Température
T_c	Période
T_{REF}	température de référence
<i>TSRST</i>	<i>Thermal Stress Restrained Speciment Test</i> (test de retrait thermique empêché)
TOP	en surface
VAM	vides intergranulaires (" <i>Voids in the mineral aggregate</i> ")
V_a	vides comblés par l'air
V_b	volum total de bitume
V_{be}	volum de bitume effectif
V_{ba}	volum de bitume absorbé
VCB	vides comblés par le bitume
VEL	viscoélasticité linéaire
V_{gb}	volum brut du granulat
V_{ge}	volum effective des granulats
V_{GG}	volum de gros granulat
$V_{GG \text{ MÉLANGE}}$	volum du gros granulat dans la combinaison granulaire
$V_{GG \text{ SEC}}$	volum du gros granulat selon la masse pilonnée à sec
V_i	volum des vides interstitiels

V_{mb}	volume brut de l'enrobé
V_{mm}	volume d'enrobé sans vides interstitiels
$\bar{x}$	moyenne
ΔX	déplacement en vertical
ΔY	déplacement en horizontal
$\Delta(CD-V)$	différentielle du déplacement vertical mesuré en surface du resurfaçage (μm)
ΔF_v	différentielle de force verticale imposée (N)
μm	micromètre
φ	angle de phase
σ_T	contrainte de tension
ε_0	déformation imposée
$\frac{\varepsilon_{max}}{\bullet}$	déformation horizontale maximale imposée
ε_{max}	vitesse moyenne de la déformation horizontale imposée
$^\circ$	degré
$^\circ C$	degré Celcius
ω	vitesse angulaire ($^\circ s^{-1}$)
γ^*	coefficient de Poisson
σ_0	l'amplitude de la contrainte et l'amplitude de la déformation (MPa)
σ_T	facteur de translation
$\bar{\delta}$	moyenne de la déflexion d'une section homogène
δ_{pd}	déflexion représentative d'une section donnée
δ_d	déflexion mesurée en surface
τ_0	temps de relaxation à la température de référence.

INTRODUCTION

Les chaussées présentent souvent de nombreuses fissures dont les causes peuvent être très variées. Le resurfaçage est une technique de réhabilitation très souvent utilisée. Cependant, sous l'effet des sollicitations mécaniques (trafic) et des sollicitations thermiques (écarts thermiques), on observe une remontée des fissures du substrat déjà fissuré à la surface de la nouvelle couche mise en place : ce phénomène s'appelle la remontée des fissures. Dans ce projet, on vise à mettre en place, une méthodologie d'analyse des techniques de resurfaçage afin de garantir leur sécurité et leur durabilité vis-à-vis des conditions climatiques rigoureuses du Québec.

Le Québec compte dans son réseau routier 90% de chaussées souples (Langlois, Tourangeau & Tremblay, 2004). Ces chaussées souples présentent de nombreux défauts dont la fissuration transversale et la fissuration de fatigue (Charvet, 2003). La principale cause de la fissuration transversale est le retrait thermique "empêché" imposé par les importantes chutes de température durant la période hivernale (Langlois et coll., 2004; Neji, 1992). Par ailleurs, la fissuration de fatigue est attribuable au trafic des poids lourds dont les caractéristiques évoluent continuellement (pression pneumatique, chargements aux essieux, trains routiers, etc...). Devant cette situation de fissuration des chaussées, et le manque de moyens financiers des gestionnaires d'ouvrages, l'unique solution reste le resurfaçage qui consiste en une pose d'une nouvelle couche de roulement (Gagné, Bissonnette, Lauture, Morin, & Morency, 2003). Trop souvent au Québec, le resurfaçage dans de nombreux cas demeure inefficace, car le substrat est très fissuré et la chaussée devrait être reconstruite.

La problématique majeure du resurfaçage demeure la remontée des fissures de manière très précoce (deux à trois hivers). La remontée des fissures est causée principalement par les sollicitations thermiques dues aux chutes de température et aux sollicitations mécaniques dues aux trafics lourds.

De nombreux essais de laboratoire ont été développés afin de simuler la remontée de fissures. Ces simulations en laboratoire sont très importantes, car elles permettent de quantifier rapidement l'efficacité d'un système anti-remontée de fissures par rapport à un autre et pourraient aider dans le développement d'un meilleur système.

Le développement des fissures dans les chaussées est un problème qui suscite de nombreuses interrogations. Il est souvent difficile de connaître l'origine exacte de la fissure, de savoir si elle est due à des retraits de séchage ou bien à des retraits thermiques. Il est encore plus délicat d'expliquer et aussi de prédire, leur propagation et leur espacement.

Les problèmes de la fissuration des assises de chaussées et celui de la remontée des fissures à travers les couches de surface sont complexes. Des nombreux concepts ont été développés au cours des dernières années et ont fait l'objectif de nombreuses études et expérimentations dans la nature des matériaux, dans la conception des structures et aussi dans le développement des techniques anti-fissures qui essaient de répondre à nos questions.

Les recherches sur le sujet ont toujours compris une simulation en laboratoire du processus de propagation de la fissure.

CHAPITRE 1

REMONTÉE DES FISSURES DANS LES RESURFACAGES

1.1 Introduction

Depuis de nombreuses années, d'importants travaux de recherche ont été menés dans le domaine du dimensionnement des chaussées. Diverses méthodes ont été établies, la plupart étant basées sur des essais accélérés et des observations effectuées sur routes expérimentales. Ces approches empiriques ont apporté de nombreux enseignements sur l'action des charges de trafic et des sollicitations thermiques, sur les propriétés des matériaux constitutifs de la chaussée ainsi que sur le comportement à long terme des structures routières (MTQ, 2004).

Le Québec est soumis à un climat rigoureux caractérisé par d'importants écarts de température (de 60 à 70°C). Même dans le sud de la province, il est fréquent que la température ambiante passe sous les -30°C au plus fort de l'hiver alors qu'elle atteint 30°C durant l'été (+ de 60°C dans l'enrobé) (Doré et coll., 1997).

Les chaussées, et de manière plus générale les structures de voirie, sont constituées de matériaux de nature et de propriétés très différentes. Toutes ces structures sous l'effet de causes très nombreuses deviennent faibles et sont susceptibles de se fissurer. Sous l'effet du trafic et de contraintes liées à l'environnement de la chaussée, ces diverses fissures se traduiront par des types de sollicitations très variables sur une nouvelle couche que l'on aura mise en place sur la structure fissurée : la couche de resurfacement (couche de roulement).

Des procédés ont été développés pour contrôler la remontée de fissure dans la couche de resurfaçage. Certains procédés, efficaces pour maîtriser la remontée de certaines fissures, ne le seront pas pour d'autres.

Un facteur déterminant dans le phénomène de remontée des fissures est la dégradation de la liaison entre la couche de base et la couche de resurfaçage. Cette liaison est réalisée par une couche très mince: l'interface. Selon les caractéristiques de l'interface, la fissure se propage plus ou moins vite dans la couche de resurfaçage.

1.2 Les causes de la fissuration des chaussées

La fissuration des chaussées souples est la forme de dégradation la plus importante au Québec (MTQ, 2002). Il existe plusieurs types de fissures qui ont des origines plus ou moins diverses. Dans cette section nous allons présenter très sommairement les caractéristiques des fissures des chaussées souples en les associant les différentes causes probables et le niveau de sévérité.

L'apparition de fissures à la surface d'une chaussée est toujours considérée par les responsables de la gestion et de l'entretien des routes comme un phénomène contre lequel il faut se prémunir, car elle aura des conséquences néfastes sur la bonne tenue de cette chaussée. Les conséquences défavorables des fissures de surface sont :

- perte d'étanchéité et risque de pénétration d'eau dans le corps de la chaussée et le sol support
- accroissement des contraintes, au droit de la fissure, sur le sol support et dans le corps de la chaussée, ce qui réduit la durée de vie de la structure
- dégradations de la couche de roulement au voisinage de la fissure sous l'effet du trafic, de l'eau, du gel, etc.

1.2.1 Type et forme des fissures

L'endommagement des chaussées s'accélère avec le temps, car l'apparition de petits défauts est à l'origine des zones encore plus faibles qui laisseront pénétrer l'eau, aggravant aussi le processus de dégradation. Les fissures sont le reflet de cette dégradation de la chaussée.

1.2.1.1 Type de fissures

Les fissures se manifestent lorsque les contraintes de traction engendrées dans un matériau sont supérieures à sa résistance. Globalement, on distingue quatre principaux types de fissures dans les chaussées souples : 1) fissures transversales, 2) fissures dans les traces de roues, 3) fissures hors traces de roues et 4) fissures de gel (Brodeur et coll., 2002).

Les fissures transversales se définissent comme une rupture qui se présente pratiquement perpendiculaires à l'axe longitudinal de la route et se localisent généralement sur toute la largeur de la chaussée (Figure 1a). Causes probables : retrait thermique; vieillissement et fragilisation du bitume; remontée de fissures après des travaux de resurfçage; joint de construction mal exécuté; arrêt et reprise des travaux de pose d'enrobé; diminution de la section du revêtement (ex. : vis-à-vis des regards ou des puisards).

Les fissures dans les traces de roues peuvent être définies comme une rupture du revêtement parallèlement à l'axe longitudinal de la route (Figure 1b) dans les traces de roues. Causes probables : fatigue du revêtement due au trafic lourd; capacité structurale insuffisante de la chaussée; mauvais drainage des couches granulaires de la chaussée (ex. : pendant le dégel).

Les fissures hors traces de roues (longitudinales) sont définies comme une rupture du revêtement suivant l'axe longitudinal de la route (Figure 1c). Causes probables : joint de construction mal exécuté le long de la travée adjacente; ségrégation de l'enrobé à la pose (ex. : centre de l'épandeur); vieillissement du revêtement.

Les fissures de gel (longitudinales) sont définies comme étant une rupture du revêtement créant une fissure active sous l'action du gel (Figure 1d). Causes probables : infrastructure gélive et soulèvements différentiels; comportement gélif différentiel (ex. : transition aux coupes de roc); remblai instable; drainage inadéquat.

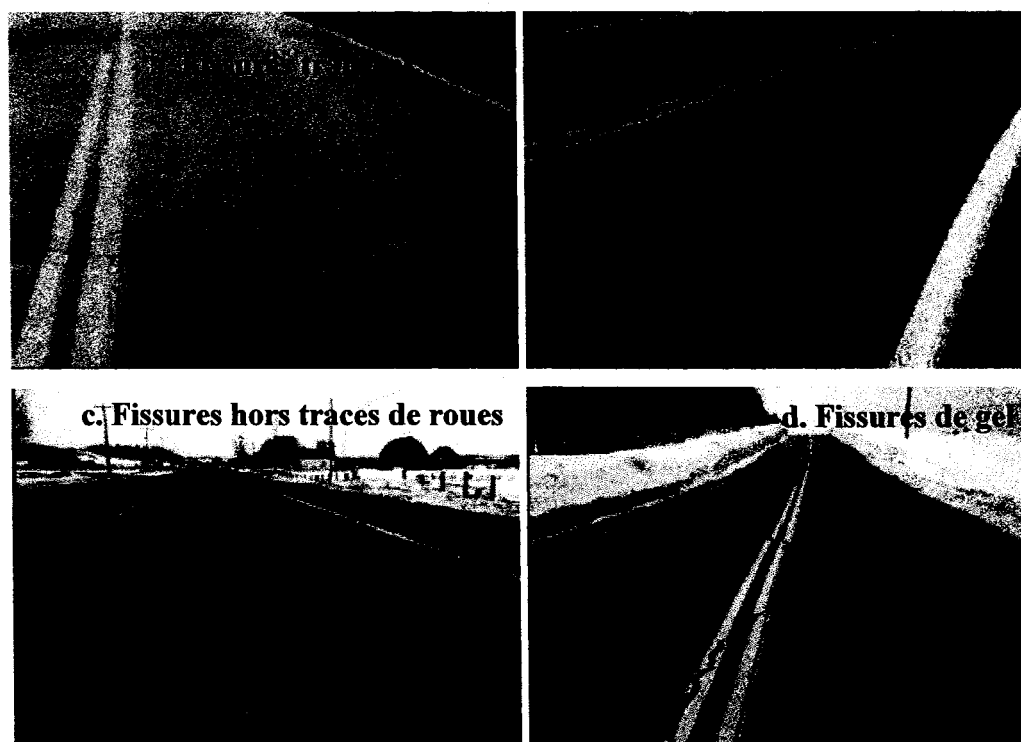


Figure 1 Fissures dans les chaussées (Brodeur et coll., 2002)

Le Tableau I présente un protocole d'identification de la fissuration pour chaussée souple tel que proposé par le MTQ :

Tableau I

Protocole d'identification de la fissuration pour chaussée souple (MTQ, 2002)

Type (cause)	Description	Sévérité (ouverture)	Étendue (longueur)
Fissure transversale (retrait thermique)	Fissure transversale présente sur toute la largeur de la voie	<i>Faible</i> : Fissure simple avec ouverture <5mm <i>Moyenne</i> : Fissure simple avec ouverture ≥ 5 et ≤ 20 mm Fissure multiple avec ouverture ≤ 20 mm <i>Majeure</i> : Fissure simple ou multiple avec ouverture >20mm et fissure en carrelage	Nombre de fissures tous les 10m, par niveau de sévérité
Fissure longitudinale (fatigue)	Fissure située dans les pistes de roues (bandes 2 et 4)	<i>Faible</i> : Fissure simple avec ouverture <5mm <i>Moyenne</i> : Fissure simple avec ouverture ≥ 5 et ≤ 20 mm Fissure multiple avec ouverture ≤ 20 mm <i>Majeure</i> : Fissure simple ou multiple avec ouverture >20mm et fissure en carrelage	Longueur de chaussée affectée tous les 10m, par niveau de sévérité
Lézarde (gel)	Fissure erratique qui suit un tracé irrégulier, sans patron défini	<i>Faible</i> : Fissure lézarde avec ouverture <5mm <i>Moyenne</i> : Fissure lézarde avec ouverture ≥ 10 et ≤ 25 mm <i>Majeure</i> : Fissure lézarde avec ouverture >25mm	Longueur de chaussée affectée tous les 10m, par niveau de sévérité
Autres	Autres types de fissures n'appartenant pas aux catégories indiquées ci-dessus (bandes 1,3et 5)	<i>Faible</i> : Fissure simple avec ouverture <5mm <i>Moyenne</i> : Fissure simple avec ouverture ≥ 5 et ≤ 20 mm Fissure multiple avec ouverture ≤ 20 mm <i>Majeure</i> : Fissure simple ou multiple avec ouverture >20mm et fissure en carrelage	Longueur de chaussée affectée tous les 10m, par niveau de sévérité

1.2.1.2 Formes et configurations des fissures

Selon leur origine, le type de structure qu'elles concernent et l'avancement du processus qui les a créées, les fissures prennent différentes formes et différentes configurations (Yoder et Witczak, 1975).

Orientation - les fissures sont le plus souvent longitudinales (parallèles au sens de circulation des véhicules) ou transversales (perpendiculaires au sens de la circulation). Les fissures sont plus rarement obliques ou paraboliques.

Forme - souvent relativement rectilignes, les fissures peuvent cependant être tortueuses, voire courbes.

Aspect - Les fissures peuvent être franches si leur tracé est net et unique; elles peuvent être aussi dédoublées, ramifiées, voire faïencées (Figure 2).

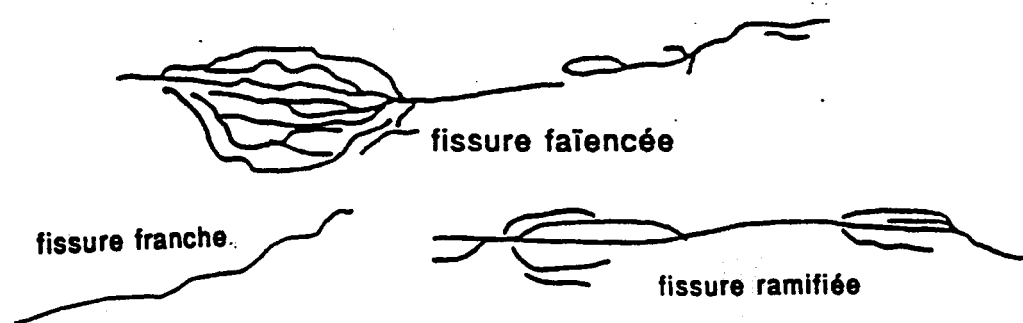


Figure 2 Différents aspects des fissures (DRCR, 1979)

Ouverture - selon les cas, l'ouverture des fissures (espacement entre les 2 bords de la fissure) peut être très différente.

Au Québec, le niveau d'ouverture peut-être (MTQ, 2002):

- Faible : fissures simples et irrégulières dont les ouvertures sont inférieures à 5mm
- Moyen : fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de 5 à 20 mm
- Majeur : fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de plus de 20 mm

Configuration - les fissures peuvent être séparées et indépendantes, ou au contraire, être intégrées dans un réseau plus ou moins dense, maillage ou faïençage. (Figure 3)

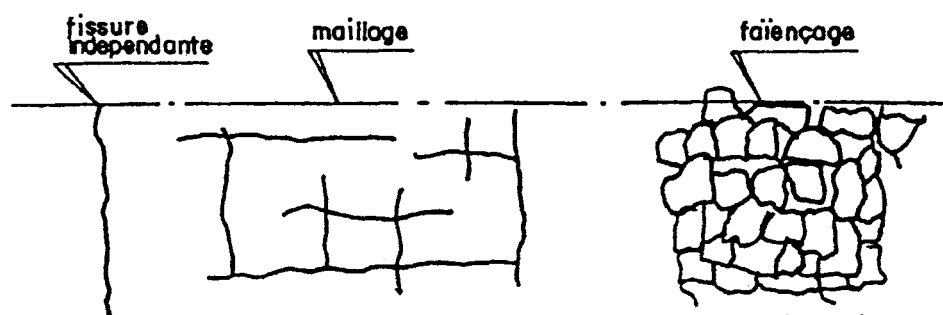


Figure 3 Différentes configurations des fissures (DRCR, 1979)

1.2.2 L'origine des fissures dans les chaussées

Les couches de roulements sont plus ou moins sensibles à la fissuration. D'une manière générale, l'origine des fissures peut être un défaut de construction, la fatigue liée au trafic, le retrait thermique empêché et ainsi un mouvement du sol.

1.2.2.1 Défauts de construction

Certaines erreurs de conception de la chaussée ou une mauvaise exécution d'une ou plusieurs couches sont à l'origine de fissures apparaissant dans la structure:

Variation de portance transversale: le phénomène est fréquent lorsqu'une route ancienne est élargie. Au droit de l'élargissement se crée très souvent une fissure longitudinale, notamment lorsque la limite de l'élargissement se situe entre le passage des roues des véhicules.

Joints de mise en œuvre: les raccords longitudinaux entre bandes, ou transversaux aux reprises de répandage créent des zones faibles lorsqu'ils sont mal réalisés et que la continuité n'est pas assurée dans la couche mise en œuvre. Ces défauts sont très souvent la cause de fissures et ils concernent aussi bien les matériaux hydrauliques que les matériaux bitumineux.

Décollement entre couches: lorsque la liaison entre la couche de roulement et l'assise de la chaussée n'est pas assurée, la couche de roulement peut se fissurer rapidement sous l'effet du trafic.

1.2.2.2 Fatigue sous l'effet du trafic

Chaque couche de chaussée est assimilée à une poutre en flexion sous l'effet du trafic (Figure 4). Le calcul des efforts et déformations qui apparaissent nécessite la connaissance du module de Young et aussi du coefficient de Poisson (Dumont et Di Benedetto, 1998).

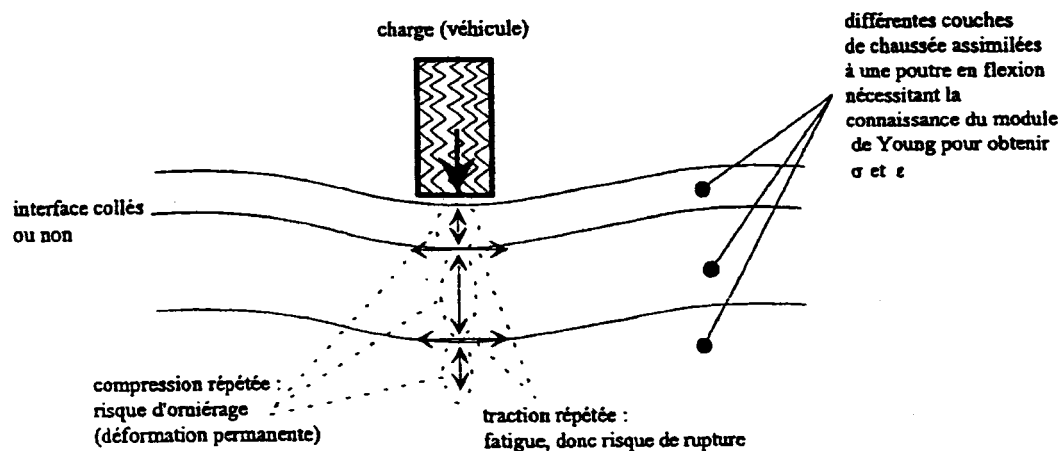


Figure 4 Schématisation des sollicitations induites par la fatigue (Dumont et Di Benedetto, 1998)

Les tractions répétées à la base des couches sous l'effet du passage des véhicules créent des "micro" dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Ce phénomène est la fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée.

La fatigue, due à un trafic cumulé trop importante supporté par la chaussée (pour son dimensionnement ou ses caractéristiques) se traduit ultimement par l'apparition de fissures en surface. Cette fatigue excessive peut concerner l'ensemble de la structure (couche de base et de fondation et couche de roulement) ou la seule couche de roulement.

Les fissures de fatigue apparaissent généralement dans le sens longitudinal, au niveau des voies de circulation dans les traces de roues.

Les fissures de fatigue sont la conséquence d'une insuffisance structurelle de la chaussée. Elles précèdent la période de destruction totale de la chaussée. Elles sont provoquées, pour des structures à assises traitées, par des contraintes de traction par flexion excessive dans les assises. Pour les chaussées souples, elles sont la conséquence d'un excès de déflexion structurale qui engendre des contraintes de traction excessives à la base de la couche de roulement (STBA, 1999).

1.2.2.3 Retrait thermique empêché

Le retrait thermique empêché dû à la baisse de température journalière ou saisonnière est à l'origine de fissures transversales dites de retrait.

Le retrait thermique empêché d'une couche de chaussée de longueur quasi infinie se traduit par des fissures chaque fois que le frottement de la couche sur son support est

suffisant pour que se créent, dans cette couche, des contraintes qui deviennent supérieures à sa résistance en traction (Colombier, 1989).

En général, les fissures de retrait thermique empêché concernent essentiellement les climats très froids comme au Québec. Cependant, d'autres causes probables telles que le vieillissement et la fragilisation du bitume, la remontée de fissures après des travaux de resurfaçage, des joints de construction mal exécutés (arrêt et reprises des travaux de pose d'enrobé) et la diminution de la section de revêtement peuvent être à l'origine des fissures transversales importantes (Brodeur et coll., 2002)

1.2.2.4 Mouvements du sol

Des mouvements ou une perte de portance locale du sol sur lequel repose la structure peuvent aussi être la cause de fissures qui se propagent dans les diverses couches de la chaussée. À l'origine de ces types de fissuration, on peut rencontrer des phénomènes très variés (Colombier, 1989):

- perte de portance par augmentation de la teneur en eau d'un sol sensible mal drainé
- tassement lent sous l'effet du trafic et du poids de la chaussée d'un sol compressible ou d'un remblai mal compacté
- glissement de terrain, notamment pour les routes en profil mixte déblai-remblai
- retrait hydrique d'un sol argileux par perte d'eau excessive à la suite d'une période très sèche. Ce phénomène fréquent est souvent accentué par la présence d'arbres en bord de routes qui mobilisent une partie de l'eau du sol
- gonflement du sol au gel lorsque la protection thermique apportée par les couches de chaussées est insuffisante pour éviter que le gel atteigne un sol sensible.

1.2.2.5 Synthèse de l'origine des fissures dans les chaussées souples

Le Tableau II présente une synthèse des éléments mis en relief par la revue de la littérature quant à l'origine des fissures dans les chaussées souples.

Tableau II

Origine des fissures dans les chaussées souples

ORIGINE	CARACTERISTIQUES
Défauts de constructions	▪ Mise en place
Fatigue	▪ Effet cumulé du trafic
Retraits	▪ Retrait liant hydraulique - retrait d'hydratation - retrait d'auto dessiccation et de dessiccation ▪ Retrait thermique ($\Delta\epsilon_T$) - effet de bloc (mouvement gêné par le substrat)
Mouvement de sol	▪ Mauvais drainage - sol sensible: $w \uparrow$ ▪ Tassement lent sous charge - compressibilité et mauvaise compaction ▪ Glissement de terrain ▪ Retrait hydrique - sol argileux... perte d'eau ▪ Gonflement du sol - Gel – dégel dans des matériaux sensibles... perte d'eau

1.2.3 Les actions de resurfaçage

L'entretien et la gestion d'un réseau routier nécessitent différents types de traitements afin d'améliorer les caractéristiques de sécurité et de confort des usagers. Dépendamment de l'état de la chaussée, ces traitements peuvent aller des simples

actions de maintenance à la reconstruction complète de la structure de chaussée (Huang, 2004).

Pour les chaussées en cycle d'entretien normal, le resurfaçage permet de rehausser les caractéristiques de confort et de sécurité. Selon le matériau de resurfaçage et le genre de chaussée, il existe quatre cas possibles de resurfaçage : une chaussée souple à resurfacer avec du béton bitumineux, une chaussée souple à resurfacer avec du béton de ciment (White topping), une chaussée rigide à resurfacer avec du béton bitumineux et une chaussée rigide à resurfacer avec du béton de ciment. C'est essentiellement le cas du resurfaçage d'une chaussée souple avec du béton bitumineux qui nous intéresse dans le cadre de ce mémoire.

Le resurfaçage des chaussées souples avec du béton bitumineux demeure le type de resurfaçage le plus répandu. Deux éléments sont considérés pour cibler un système et une épaisseur appropriée de resurfaçage : 1) les considérations d'ordre structural (fatigue) et 2) les considérations de durabilité (remontée de fissures). La revue de la littérature a donc été faite dans la perspective de mettre en relief l'ensemble des éléments pertinents relatifs à ces considérations.

1.2.3.1 Calcul de l'épaisseur d'un resurfaçage d'une chaussée souple suivant les considérations structurales

Les techniques de dimensionnement des resurfaçages sont très diverses. En général, elles sont identiques à celles des nouvelles chaussées, à quelques considérations près quant à certains paramètres de dimensionnement dont, notamment, la durée de vie ciblée.

Il existe trois méthodes de dimensionnement des resurfaçages : la méthode de l'Asphalt Institute (AI), la méthode de l'association du ciment Portland (PCA) et la méthode de l'AASHTO. Ces trois méthodes de dimensionnement des resurfaçages sont basées sur

les trois concepts de base du design des resurfaçages : une méthode de l'épaisseur effective, une méthode de la déflexion et une méthode dite empirique – mécanistique.

L'approche de l'épaisseur effective - L'approche de l'épaisseur effective est basée sur le fait que l'épaisseur de resurfaçage (Overlay : h_{OL}) est la différence de l'épaisseur résiduelle ($h_{résid.}$) de la chaussée à celle correspondant d'une nouvelle chaussée (h_{nc}). Soit :

$$h_{OL} = h_{nc} - h_{résid.} \quad (1.1)$$

L'approche de la déflexion - L'approche par déflexion est basée sur le fait qu'une déflexion résiduelle d'une chaussée doit être faible, en deçà d'une déflexion admissible, laquelle limite le risque d'une fatigue excessive des couches bitumineuses. Si la chaussée présente une grande déflexion résiduelle, le resurfaçage devra être le plus épais pour réduire cette déflexion. L'épaisseur de resurfaçage est donc définie par une relation empirique entre la déflexion des chaussées et l'épaisseur de resurfaçage.

L'approche empirique-mécanistique - L'approche empirique-mécanistique est basée sur la détermination de certains paramètres critiques notamment les contraintes, les efforts et les déflexions par des méthodes mécanistiques et coupler à des modèles d'endommagements établis sur des bases empiriques.

1.2.3.2 La technique de l'Asphalt Institute (AI)

La méthode de l'Asphalt Institute (Shook et coll., 1982), basée sur l'approche de déflexion, est simple à utiliser dans la mesure où elle permet de faire un lien entre les épaisseurs de resurfaçage, la durée de vie et les déflexions résiduelles sur route.

La technique de conception des resurfaçages de l'Asphalt Institute permet de calculer l'épaisseur de resurfaçage pour tout type de chaussées avec du béton bitumineux. La

conception du resurfaçage peut se faire selon deux méthodes de base : la méthode de l'épaisseur effective et la méthode de déflexion.

La déflexion de la chaussée est mesurée par l'essai de la masse tombante (FWD). Les essais ont lieu sur la route dans différentes conditions et les données recueillies sont traitées et regroupées en sections homogènes d'un tronçon de la chaussée analysée.

1.2.3.1.1 Calcul de la déflexion représentative

Le calcul de la déflexion représentative d'une section donnée, δ_{rd} , est définie comme suit :

$$\delta_{rd} = (\bar{\delta} + 2s)F \times c \quad (1.2)$$

1.2.3.1.2 Calcul de l'épaisseur du resurfaçage à mettre en œuvre

L'approche proposée par l'AI pour calculer l'épaisseur de resurfaçage à mettre en œuvre est simple. Elle se fonde sur deux hypothèses : 1) la chaussée est considérée comme un milieu continu, semi-infini, élastique et homogène et 2) il existe une relation unique entre la déflexion mesurée en surface (δ_d) et la durée de vie du resurfaçage.

Milieu continu, semi-infini, élastique et homogène : Cette hypothèse simplificatrice nous permet de considérer que le système de resurfaçage est réduit à un système bicouche. La chaussée fissurée à resurfacer (le substrat) d'épaisseur infinie, présente un module élastique E_{Sub} , alors que le resurfaçage est défini par une épaisseur h_{OL} et constituée d'un matériau élastique de module E_{OL} . La Figure 5 présente schématiquement l'action d'un pneumatique suivant cette configuration sur la structure de la chaussée bicouche.

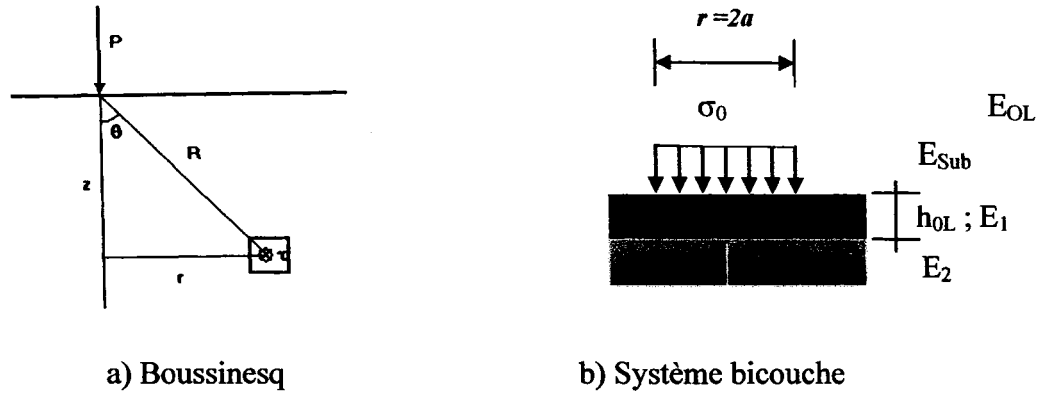


Figure 5 Structure de chaussée bicouche

En appliquant l'approche développée par Boussinesq (Figure 5a) et en considérant la déflexion représentative d'un tronçon donné avant resurfacement δ_{rrd} , on détermine dans un premier temps le module élastique du substrat (E_{Sub}) présumé un milieu continu, semi-infini, homogène et élastique, à resurfacer :

$$d_{z=0} = \frac{(1+\nu)\sigma_0 r}{E_{sub}} [1 + (1-2\nu)] \quad (1.3)$$

En posant $\nu = 0,5$ et $r = 2a$ on a :

$$E_{sub} = \frac{1,5\sigma_0 a}{d_{z=0}} \quad (1.4)$$

En surface on a $d_{z=0} = \delta_{rrd}$ et $\sigma_0 = q$, soit :

$$E_{sub} = \frac{1,5qa}{\delta_{rrd}} \quad (1.5)$$

Avec : q = pression de contact du pneu
 a = rayon de contact d'un essieu simple

Lorsqu'on considère le système bicouche, la relation entre la déflexion et les caractéristiques des couches est donnée par la relation suivante :

$$\delta_d = \frac{1,5 q \cdot a}{E_{sub}} \left(\left\{ 1 - \left[1 + 0,8 \left(\frac{h_{OL}}{a} \right)^2 \right]^{-0,5} \right\} \frac{E_{sub}}{E_{OL}} + \left\{ 1 + \left[0,8 \frac{h_{OL}}{a} \left(\frac{E_{OL}}{E_{sub}} \right)^{1/3} \right]^2 \right\}^{-0,5} \right) \quad (1.6)$$

L'Équation 1.6 permet de mettre en relation la déflexion mesurée en surface, δ_d , aux caractéristiques du resurfaçage (E_{OL} et h_{OL}).

1.2.3.1.3 Relation entre la déflexion admissible et la durée de vie escomptée

Comme nous l'avons évoqué précédemment, un des modes importants de la dégradation des chaussées souples est lié à la fatigue de l'enrobé à la base de la couverture bitumineuse. Il est admis que la relation log-log entre la durée de vie en fatigue et l'amplitude de la sollicitation est bien représentée par la loi de Wöhler pour laquelle cette relation est admise comme étant linéaire. Or, lorsqu'on fixe la profondeur z , on constate que la déflexion en surface et la déformation radiale sont toutes deux directement proportionnelles à l'intensité de la contrainte appliquée et inversement proportionnelles à la rigidité du milieu. Bien que la relation présentée à la Figure 6 ne saurait être universelle, elle reflète une situation réaliste quant à la durée de vie fondée sur l'amplitude de la déflexion. Selon l'Asphalt Institute, cette relation permet d'estimer une déflexion admissible en fonction de l'ECAS.

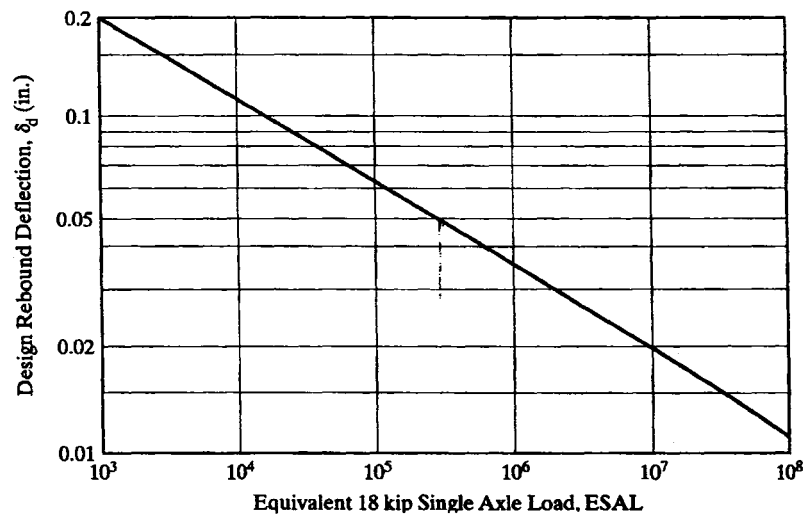


Figure 6 Relation entre la déflexion et l'ECAS (Asphalt Institute, 1983)

1.2.4 La remontée des fissures dans un resurfaçage

Pour bien comprendre les aspects à considérer afin de cibler un système de resurfaçage et des épaisseurs appropriées, il convient dans un premier temps de définir la notion de système de resurfaçage et, dans un deuxième temps, de présenter un bilan de la littérature quant aux réflexions qui ont été menées vis-à-vis des causes, des modes et des processus qui sont à l'origine de la remontée des fissures dans un resurfaçage.

Notion de système de resurfaçage

Ces systèmes désignés «systèmes anti-remontés des fissures» sont intercalés généralement entre le resurfaçage et le substrat fissuré. La Figure 7 illustre un modèle type qui définit le mode de fonctionnement des systèmes de resurfaçage.

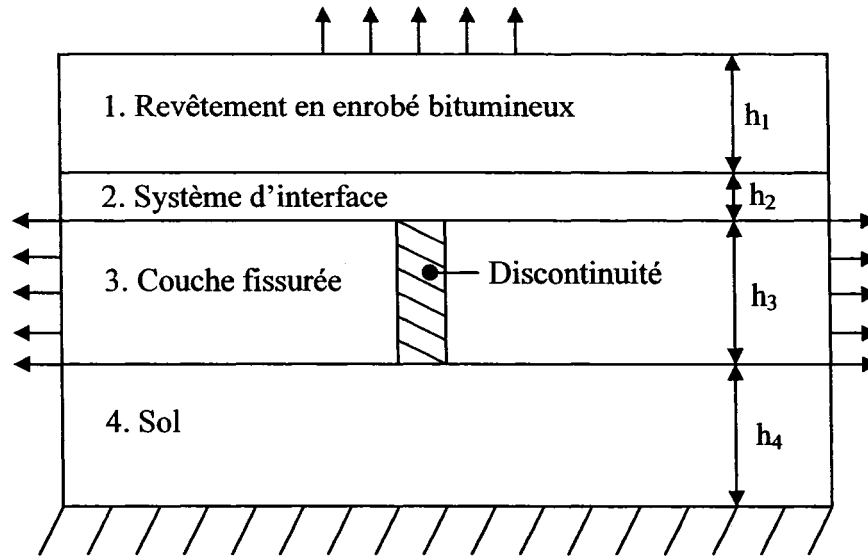


Figure 7 Modèle type de pose de systèmes anti-fissures (Rigo et coll., 1993)

La remontée d'une fissure dans une couche de resurfaçage est liée au fait que, sous l'effet de sollicitations diverses, les lèvres de la fissure du substrat ont des mouvements qui se transmettent à la base de la couche de resurfaçage où il se crée une concentration de contraintes. Étudier le problème de la remontée des fissures nécessite donc de définir d'une part les modes de propagation d'une fissure et, d'autre part, les sollicitations susceptibles d'engendrer les mouvements des bords des fissures existantes et d'analyser la nature des mouvements ainsi créés (Colombier, 1989).

1.2.4.1 Les modes de propagation d'une fissure

Pour la propagation d'une fissure au sein d'un milieu continu homogène, élastique et isotrope, on définit trois différents modes tels qu'illustrés à la Figure 8.

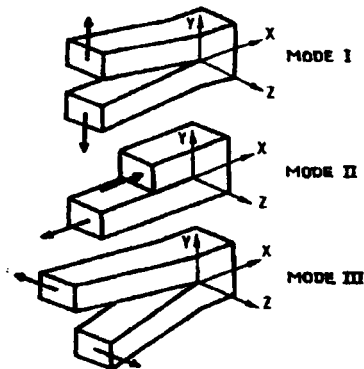


Figure 8 Les trois différents modes de propagation d'une fissure au sein d'un milieu continu (Al-Qadi, et coll, 2003; Scarpas & de Bondt, 1996; Rigo et coll., 1993; Parcells et coll., 1982)

Les mouvements à l'origine de la remontée des fissures dans une couche de resurfacement sont différents selon le type de chaussée en cause, la nature et la forme de la fissure existante et le type de sollicitations auxquelles sont soumis les bords de la fissure. Suivant ces considérations, on admet par analogie aux différents modes de propagation d'une fissure au sein d'un milieu continu, que trois types de mouvements possibles des bords d'une fissure d'une chaussée souple pourront être à l'origine de sa remontée en surface de la couche de resurfacement, soit (Al-Qadi, et coll, 2003; Scarpas & de Bondt, 1996; Rigo et coll., 1993; Parcells et coll., 1982):

- Le mode I qui correspond à un mouvement d'ouverture/fermeture de la fissure : écartement des lèvres de la fissure
- Le mode II qui correspond à un cisaillement
- Le mode III qui correspond à un déchirement.

Des exemples de ces types de mouvements entraînant la remontée de la fissure dans la couche supérieure sont représentés à la Figure 9 :

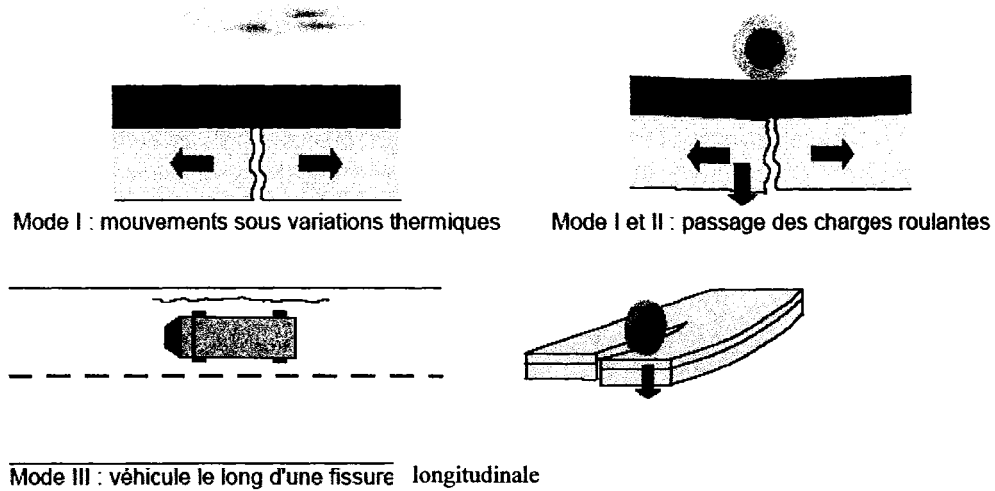


Figure 9 Mouvements possibles des lèvres d'une fissure (Laveissière, 2002)

1.2.4.2 Sollicitation susceptible d'engendrer la remontée d'une fissure

La remontée d'une fissure dans un resurfaçage est liée à l'effet des sollicitations diverses : le trafic, les effets thermiques et hydriques (Haddar et coll., 2005; Harvey et Bejarano, 2001; Liang et Zhou, 1997; Brown et Brunton, 1989). Ces sollicitations génèrent des contraintes dans le resurfaçage au droit des fissures existantes.

1.2.4.2.1 Trafic

D'une manière générale, le trafic crée des mouvements verticaux et horizontaux aux bords de la fissure. En effet, lorsqu'un véhicule s'approche d'une fissure transversale, il se crée à la fois un enfoncement d'un bord par rapport à un autre (mode II), et un éloignement des deux lèvres de la fissure (mode I). Quand le véhicule est à l'aplomb de la fissure, il y a uniquement ouverture des lèvres, c'est-à-dire éloignement des deux lèvres (mode I) (Colombier, 1989).

Les mouvements des lèvres d'une fissure transversale, dus au trafic sont rapides (de l'ordre du $1/10^{\text{e}}$ de seconde), fréquents (de quelques centaines à quelques milliers de cycles par jour) et d'amplitude variable (fonction de la charge de l'essieu, de la déformabilité de la structure et de l'engrènement de la fissure) (Colombier, 1989).

1.2.4.2.2 Les variations de température

Outre le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques principaux (Di Benedetto et coll., 2005) :

- 1) Changement de la rigidité (module) du matériau. Un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus mou, et
- 2) Création de contraintes au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques lors des changements de température (Figure 10).

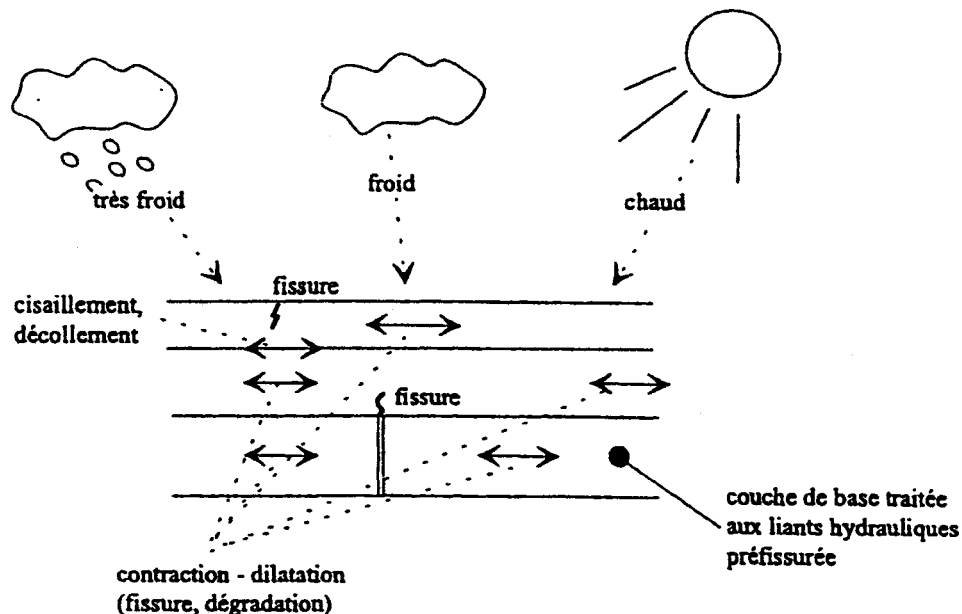


Figure 10 Schématisation des sollicitations induites par la température (Dumont et Di Benedetto, 1998)

Les variations de température Jour-Nuit ou Été-Hiver créent des allongements et des retraits des parties de chaussées comprises entre 2 fissures. Le plus souvent ces

phénomènes se traduiront par l'ouverture ou par la fermeture de la fissure. Dans certains cas, l'existence d'un gradient thermique important dans la couche fissurée pourra conduire à une cambrure de cette dernière. Les variations inverses (nuit - jour, hiver - été) créent des allongements de l'assise entre deux fissures entraînant la fermeture des lèvres (Colombier, 1991).

Les mouvements des lèvres liés à la température, sont lents (jour - nuit), ou très lents (été - hiver), peu fréquents (de deux fois par jour à quelques fois par an) et d'amplitude variable (fonction de la variation de température, de la nature des granulats, de l'espacement entre fissures et de la qualité de l'interface) (Colombier, 1988; Parcells et coll., 1982).

1.2.4.2.3 Les mouvements de la fondation et/ou du sol d'infrastructure

Comme nous avons vu, il y a deux types de variations qui créent les mouvements de la fondation et/ou du sol d'infrastructure : la variation hydrique du sol et l'effet de cycles de gel-dégel.

Variation hydrique - Qu'elles aient été ou non à l'origine de la fissure, les variations hydriques du sol sont susceptibles de créer des mouvements d'ouverture ou de fermeture de cette dernière (mode I) (Colombier, 1988).

Sous l'effet du froid, la pénétration du gel s'effectue graduellement dans les sols en partant du haut de la fissure vers le bas (Figure 11). Ce gel endommage la structure. Dans certaines conditions défavorables, l'eau contenue dans les sols non gelés peut être aspirée vers la zone de gel. Ce pompage de l'eau de la nappe phréatique engendre alors la formation de lentilles de glace qui se traduit par un soulèvement de la chaussée et force aussi l'ouverture ou fermeture de la fissure.

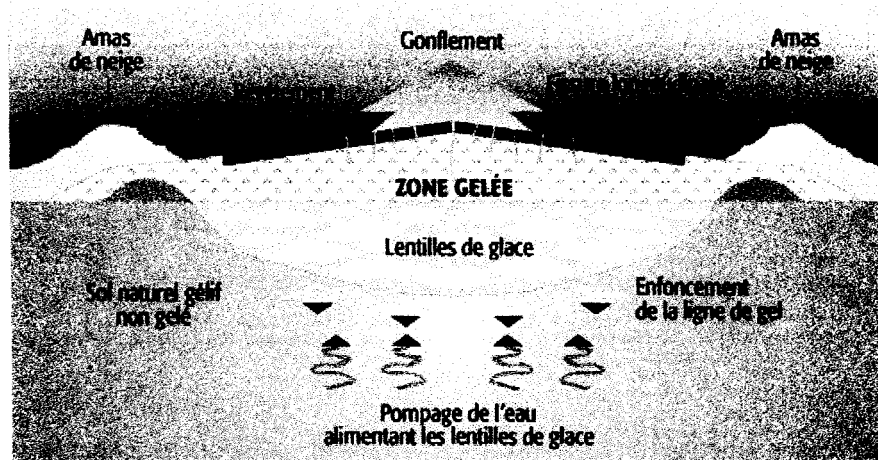


Figure 11 Effet du gel et du dégel sur une route : Gonflement au gel (MTQ, 2002)

Effet des cycles de gel-dégel - La chaussée n'est pas au bout de ses affaissements, car arrive ensuite le dégel printanier qui se fait aussi du haut vers le bas. L'eau provenant de la fonte de la neige en surface et de la fonte des lentilles de glace à l'intérieur, se retrouve en quantité importante dans la couche de sol dégelé. Cette eau est alors emprisonnée dans le sol à cause de la couche gelée du dessous qui est étanche (Figure 12) et la chaussée présente une perte de capacité portante de par une saturation en eau, (perte de perméabilité)

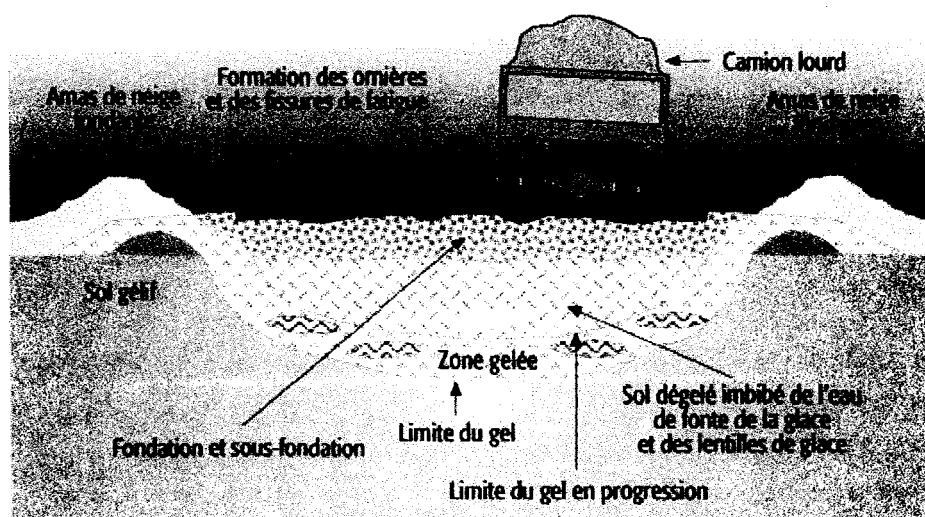


Figure 12 Effet du gel et du dégel sur une route : Affaissement au dégel (MTQ, 2002)

1.2.4.3 Vitesse du mouvement

Compte tenu des différents types de sollicitations possibles, les mouvements des bords de fissures peuvent être, sous l'angle de la vitesse, classés en 3 grandes catégories:

- les mouvements rapides sont liés au trafic et plus particulièrement au trafic poids lourds. En moyenne, on peut estimer que la durée du mouvement est de l'ordre du dixième de seconde
- les mouvements lents sont liés aux variations de température journalières (entre le jour et la nuit) et au retrait qu'elles entraînent
- les mouvements très lents se produisent entre deux saisons (été et hiver) pour le retrait thermique, (saison sèche – saison pluvieuse) pour les retraits hydriques.

1.2.4.4 Amplitude des mouvements

L'amplitude des mouvements des bords des fissures dépendra de l'intensité du phénomène et de la capacité de la structure intercepter les sollicitations (trafic : fonction de la charge par essieu des véhicules qui circulent sur la chaussée, et thermique : une fonction directe de l'écart de température créant ce retrait, mais aussi du coefficient de dilatation des matériaux en cause).

1.2.4.5 Fréquence des mouvements

On retrouve pour le paramètre associé à la fréquence des mouvements, la même classification que pour la vitesse:

- les mouvements dus au trafic sont rapides et se produisent à une fréquence élevée qui correspond approximativement aux nombres de véhicules lourds circulant sur la chaussée (quelques centaines à quelques milliers par jour)
- les mouvements liés aux variations de température jour-nuit se produisent en général 2 fois par jour

- les mouvements liés aux variations de température ou aux retraits hydriques, saisonniers se produisent que, quelquefois par année.

1.2.4.6 Synthèse des causes à l'origine de la remontée des fissures dans les resurfaçages

Les phénomènes de retrait thermique et/ou hydrique engendrent systématiquement des mouvements des bords de fissure de mode I (ouverture-fermeture). Le trafic suivant la position du véhicule par rapport à la fissure et selon la géométrie de celle-ci va créer des mouvements de mode I, II ou III. En effet, un véhicule approchant une fissure transversale va créer le plus souvent des mouvements de mode II. Lorsque l'essieu sera à l'aplomb de la fissure, le mouvement des bords de la fissure sera essentiellement de mode I (ouverture-fermeture). Par ailleurs, un véhicule circulant à cheval sur une fissure longitudinale va engendrer des mouvements des bords de la fissure de mode III.

Le Tableau III présente une synthèse des éléments mis en relief par la revue de la littérature, quant aux types de sollicitations qui peuvent provoquer la remontée des fissures dans les chaussées souples.

Tableau III

Type de sollicitation pouvant provoquer la remontée des fissures

Type de sollicitation	Détails
Trafic	▪ Passage des véhicules - mouvement concentré à la fissure $\Rightarrow \Delta x$ et Δy - sollicitation de TRACTION par flexion $\Rightarrow$ fatigue de l'enrobé
Gradient de température (ΔT)	▪ <u>Saisonnnière</u> - peu de cycles (+/-80 cycles) comparativement à la fatigue en flexion - déformation de grandes amplitudes selon x: Δx important ▪ <u>Journalière</u> - toujours une déformation en x, mais amplitudes moyennes - beaucoup de cycles
Mouvement de sol	▪ Gradients hydriques dans le sol ▪ Mouvement de sol lié aux cycles de gel – dégel (infrastructure sensible; drainage critique)

1.2.5 Le processus de propagation d'une fissure

1.2.5.1 La propagation

Le développement d'une fissure existante dans une couche de resurfçage sous l'effet de sollicitations diverses se déroule, en général, en 3 étapes mettant en jeu des mécanismes différents (Bonnot, 1989).

La phase d'initialisation correspond à la création de l'amorce de la fissure à partir de défauts préexistants dans la couche non fissurée.

La phase de propagation lente de la fissure correspond à sa remontée dans l'épaisseur de la couche à partir de l'amorce d'entaille où se sont concentrées les contraintes dues aux sollicitations du trafic ou thermiques.

La phase de rupture ou finale correspond à l'apparition de la fissure à la surface de la couche de resurfaçage.

1.2.5.2 Cheminement de la fissure

La propagation d'une fissure dans la couche de resurfaçage d'une structure dont la couche de base est fissurée découle soit (Lefort, Sicard, & Merrien, 1999) :

- du décollement de l'interface (propagation horizontale)
- de la propagation verticale en prolongement de la fissure existante
- des deux phénomènes couplés, cités ci-dessus.

La propagation d'une fissure est régie par le rapport entre l'effort tendant à propager la fissure dans une direction donnée et la résistance qu'opposent les matériaux à cette propagation dans cette direction. La Figure 13 résume les différentes possibilités de cheminement d'une fissure dans un resurfaçage :

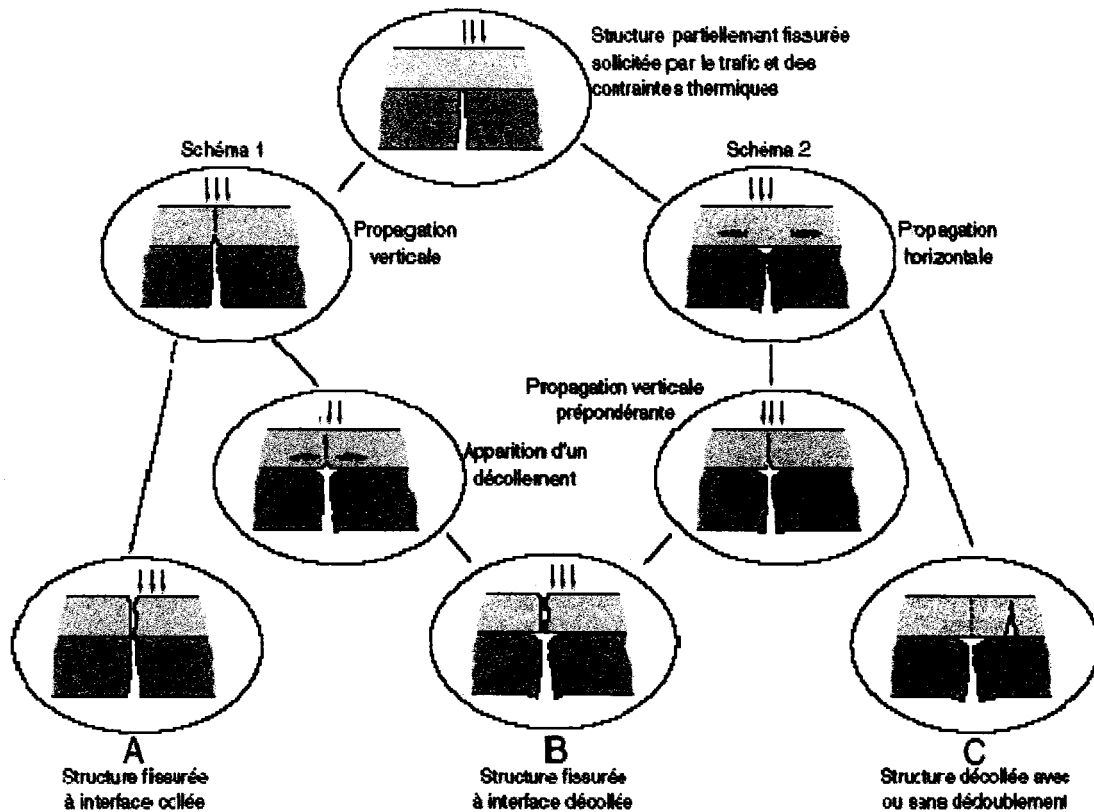


Figure 13 Cheminement d'une fissure (Goacolou, 1982, et Lefort, 1999)

Le schéma 1 est le résultat d'une très bonne liaison entre la couche de roulement et la couche de base. La fissure progresse verticalement dans la couche supérieure. Lors de cette propagation, s'il n'y a pas fatigue de l'interface, la fissure débouche en surface en conservant l'interface collée (schéma A). Si au contraire l'interface fatigue, il y a décollement de part et d'autre de la fissure simultanément à la remontée de la fissure en surface (schéma B) (Lefort et al., 1999)

Le deuxième schéma de propagation de la fissure présente une interface à liaisons faibles, ce qui entraîne dans un premier temps une propagation essentiellement horizontale. Cette propagation se stabilise et le processus se poursuit par une amorce dans la couche de roulement soit au droit de la fissure d'assise (schéma B), soit à

l'extrémité du décollement ou aux deux endroits à la fois (schéma C) (Lefort et al., 1999).

Sous l'action conjuguée du trafic et des sollicitations de retrait (thermique et/ou hydrique), la fissure peut se développer soit directement vers la surface, les couches restant collées, soit au niveau de l'interface. Il y a alors décollement des couches et un processus de fatigue de la couche de resurfacement sous l'effet du trafic au cours duquel prend naissance une nouvelle phase de propagation verticale. Un tel scénario conduit à une structure fissurée avec destruction des liaisons à l'interface (Colombier, 1989; Lefort et coll., 1999).

1.3 Maîtrise de la remontée des fissures dans les chaussées

Contrôler ou maîtriser la remontée des fissures des chaussées, c'est vouloir limiter ou supprimer les conséquences défavorables auxquelles conduit l'apparition en surface de ces fissures (Colombier, 1989). Pour ce faire, beaucoup de techniques ont été proposées. L'ensemble de ces techniques peut se résumer en 3 types de solutions (Colombier, 1989) soient :

- 1) supprimer la cause des fissures,
- 2) empêcher ou retarder la remontée des fissures dans le resurfacement,
- 3) modifier les caractéristiques de la couche de resurfacement par "renforts" des additifs de structures.

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes uniquement intéressés à la deuxième solution, qui consiste à empêcher ou retarder la remontée des fissures dans la couche de resurfacement par utilisation d'un complexe anti-remontée des fissures.

1.3.1 Empêcher ou ralentir la remontée des fissures dans la couche de surface

Pour empêcher ou retarder la remontée des fissures dans un resurfaçage, quatre types de solutions sont possibles : 1) augmentation de l'épaisseur de la couche de resurfaçage, 2) optimisation des propriétés de l'enrobé en couche de resurfaçage, 3) interposition d'un produit ou d'un complexe entre la couche fissurée (substrat) et le resurfaçage et 4) utiliser un renfort au sein du resurfaçage (Colombier, 1988).

1.3.1.1 Augmentation de l'épaisseur de la couche de resurfaçage

Augmenter l'épaisseur de la couche de resurfaçage que l'on met en place sur une structure fissurée constitue une solution efficace pour retarder l'apparition en surface des fissures. En effet, l'augmentation de l'épaisseur de la couche de resurfaçage : 1) modifie l'état de contrainte au droit des fissures existantes créées par le trafic (phase d'initialisation) ; 2) réduit les écarts de température entre la couche fissurée et le resurfaçage diminuant ainsi l'amplitude des mouvements des bords des fissures (phase d'initialisation) et, 3) augmente directement la longueur du trajet que devra suivre la fissure initialisée pour atteindre la surface (phase de propagation) (Colombier, 1988).

Selon Colombier (1988), augmenter l'épaisseur du resurfaçage de 3 à 8 cm conduit à doubler le temps d'apparition en surface de l'ensemble des fissures existantes. La solution est efficace, mais elle ne permet pas de garantir l'absence totale à terme de fissures en surface, sauf si l'épaisseur du resurfaçage est d'au moins à 20 cm, mais cette solution est très coûteuse.

1.3.1.2 Optimisation des propriétés de l'enrobé en couche de resurfaçage

Les enrobés utilisés en couche de resurfaçage sont plus ou moins sensibles à la fissuration. Les fissures se propageront d'autant plus difficilement dans l'enrobé de

resurfaçage, qu'il sera capable d'accepter de grandes déformations avant rupture, et ce, particulièrement par de basses températures. Il est possible d'aller dans ce sens en utilisant des bitumes pas trop visqueux et peu sensibles aux variations de température, en augmentant les teneurs en bitume et en réduisant la dimension des granulats. Les possibilités d'agir dans ce domaine, en utilisant des bitumes classiques, sont cependant limitées, car augmenter les possibilités de déformation avant rupture d'un matériau bitumineux se fait souvent au détriment d'autres caractéristiques telles que la résistance aux déformations permanentes sous trafic ou aux qualités antidérapantes. L'ajout de polymères peut constituer une solution envisageable permettant de résoudre le problème de la remontée de certains types de fissures (Colombier, 1988).

1.3.1.3 Interposition d'un produit ou d'un complexe entre la couche fissurée et la couche de resurfaçage

L'interposition d'un produit ou d'un complexe entre la couche fissurée et la couche de resurfaçage consiste à faire un découplage et à introduire un produit ou un complexe qui les désolidarise.

Les techniques d'interposition plus connues sous le nom de système anti-remonté de fissures consistent à mettre en oeuvre entre le substrat et la couche de resurfaçage, une membrane anti-fissure ou une couche de diffusion des contraintes qui a un triple but (Lefort et coll., 1999) :

- Sur le plan de la transmission des contraintes, en tête de la fissure, provenant des cycles thermiques lents, elle dissocie les deux couches
- Elle permet à la structure de supporter les sollicitations des charges en assurant un bon collage de l'enrobé à son support
- Elle doit conserver l'imperméabilité de la structure même si la fissure se développe dans la couche de resurfaçage.

Le découplage total : - le découplage total de la couche fissurée et de la couche de resurfaçage consiste à introduire entre les 2 couches un produit qui les désolidarise totalement. Par exemple, du sable en couche très mince, un papier kraft, un géotextile non collé à une des couches peuvent être employés à cet usage (Goacolou, 1982). Dans ce cas, les contraintes issues de la couche fissurée, liées au retrait thermique ou hydrique notamment, ne peuvent pas se transmettre à la couche de resurfaçage. Par contre, les contraintes induites par le trafic se transmettront au moins partiellement à la couche fissurée, à travers la couche de resurfaçage même si les deux couches ne sont pas collées.

Le découplage total demeure très efficace vis-à-vis des phénomènes de retraits (thermique et hydrique) mais applicable que pour des structures de chaussées très faiblement circulé (Goacolou, 1982). Pour les chaussées bitumineuses cette solution ne pourra conduire qu'à une fissuration du resurfaçage par fatigue. En effet, étant donné que le resurfaçage est désolidarisé du substrat (de la couche fissurée), le resurfaçage est donc sollicité en flexion de sorte qu'en bas de couche on observe des amplitudes de déformation importantes qui conduisent à une rupture à jeune âge par fatigue du resurfaçage.

Le découplage partiel : - le découplage partiel de la couche fissurée et de la couche de resurfaçage consiste à introduire un matériau ou un complexe pour assurer un découplage partiel entre les deux couches, vis-à-vis de la sollicitation lente, (mouvement horizontal : associé aux effets thermiques) tout en maintenant une liaison suffisante pour résister aux sollicitations rapides induites par le trafic. La plupart des solutions proposées actuellement pour ralentir ou empêcher la remontée des fissures font appel à ce principe.

Colombier (1991), a décrit le principe de découplage partiel en trois étapes (Figure 14) :

- La fissure existante se transforme, dans le matériau intermédiaire, en de multiples microfissures (Figure 14 – 1). La phase d'initialisation de la fissure à la base du resurfaçage sera alors plus longue
- Le matériau intermédiaire se déforme sans se rompre sous l'effet du mouvement de la fissure (Figure 14 – 2). La période d'amorçage de la fissure dans la couche de resurfaçage sera alors très longue
- La fissure se propage dans le matériau intermédiaire ou à son interface selon un trajet plus long (Figure 14 – 3).

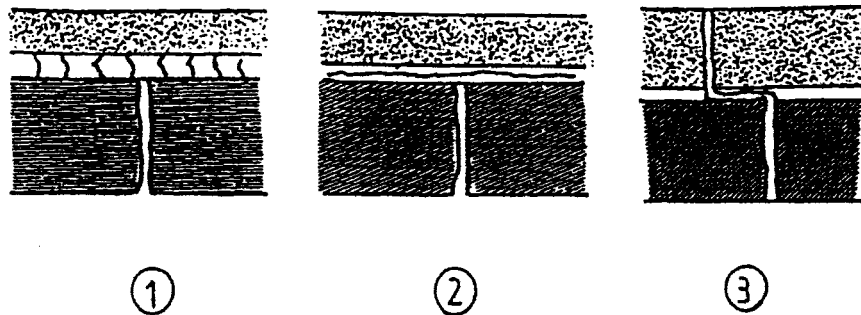


Figure 14 Principes du découplage partiel

1.3.2 Modification des caractéristiques de la couche de resurfaçage par «renforts» avec des additifs de structure

Sous l'appellation d'additifs de structure, on peut inclure tous les systèmes et procédés d'armatures, de grilles métalliques ou matériaux de synthèse. L'apport de tels produits dans la maîtrise de la remontée des fissures de chaussées peut se justifier si la résistance du matériau bitumineux est améliorée par l'armature ou si sa déformabilité avant rupture est augmentée par la présence de l'armature.

CHAPITRE 2

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Introduction

Ce projet de recherche vise à évaluer en laboratoire différents systèmes anti-remontée de fissures.

Pour une évaluation correcte de la performance d'un système de resurfaçage dans sa globalité, nous avons fait des essais qui se veulent le plus représentatif possible des conditions réelles sur la route (charges et écarts thermiques) : les différentes composantes d'un système anti-fissure ne sont pas testées de manière isolée, mais tout le système dans sa globalité.

Cette approche nous permettra de choisir plus efficacement un type d'enrobé et/ou un système anti-remontée de fissures utiliser dans un système de resurfaçage suivant une épaisseur optimale.

2.2 Programme expérimental

La revue de la littérature nous a permis d'identifier les principaux paramètres qui jouent un rôle prédominant quant à la remontée des fissures dans le cas de resurfaçage de chaussées souples, et ce, suivant le climat québécois :

- La température (mode I);
- Le passage des véhicules lourds (mode I et II);
- Les mouvements de la fondation et/ou du sol d'infrastructure.

Quelles sont les conditions d'essais à mettre en œuvre en laboratoire pour simuler de façon le plus réaliste possible la remontée des fissures pour un système de resurfaçage soumis aux conditions spécifiques du Québec? Le présent chapitre synthétise les réflexions menées à ce sujet avant de présenter le programme expérimental mis en œuvre dans le cadre de cette étude.

La Figure 15 montre un organigramme illustrant la synthèse d'ensemble retenue pour l'étude de la performance vis-à-vis la remontée des fissures de différents systèmes anti-remontée des fissures.

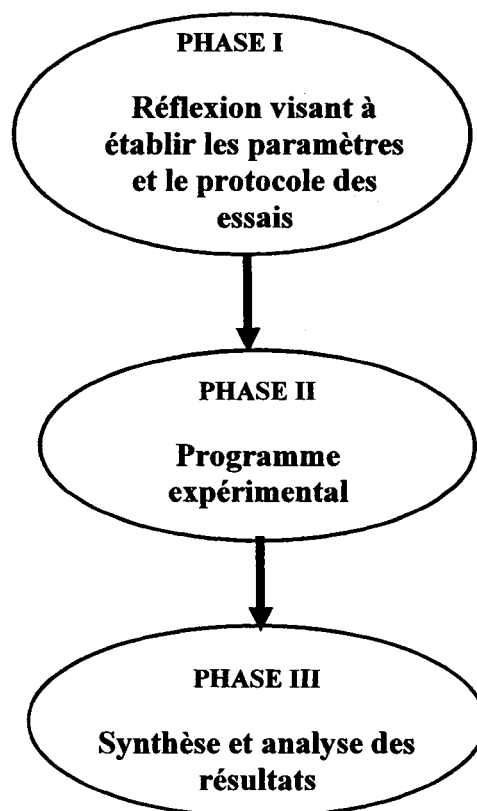


Figure 15 Principales phases du programme expérimental

2.2.1 Présentation du montage expérimental utilisé pour étudier la remontée des fissures

La Figure 16 présente une vue d'ensemble de l'appareil proposé pour étudier la remontée des fissures dans les systèmes de resurfaçage. Le montage complet est installé dans une chambre thermique (Système MTS) permettant de varier la température.

Un système de régulation thermique permet de garder une température constante pendant le déroulement des essais. La Figures 17 présente une vue d'ensemble de l'installation de l'appareil dans l'enceinte thermique.

Un système de mesure assure le suivi en continu des différents paramètres en cours d'essai et vise à quantifier le niveau et le processus d'endommagement. Un système informatique assure l'acquisition des données et le pilotage du dispositif expérimental.

L'ensemble des composantes liées à l'instrumentation des corps d'épreuve et permettant le suivi de son endommagement en cours d'essai, est présenté en détail à l'Annexe 2. Le détail quant au mode de fonctionnement de l'appareillage est donné à la section suivante.

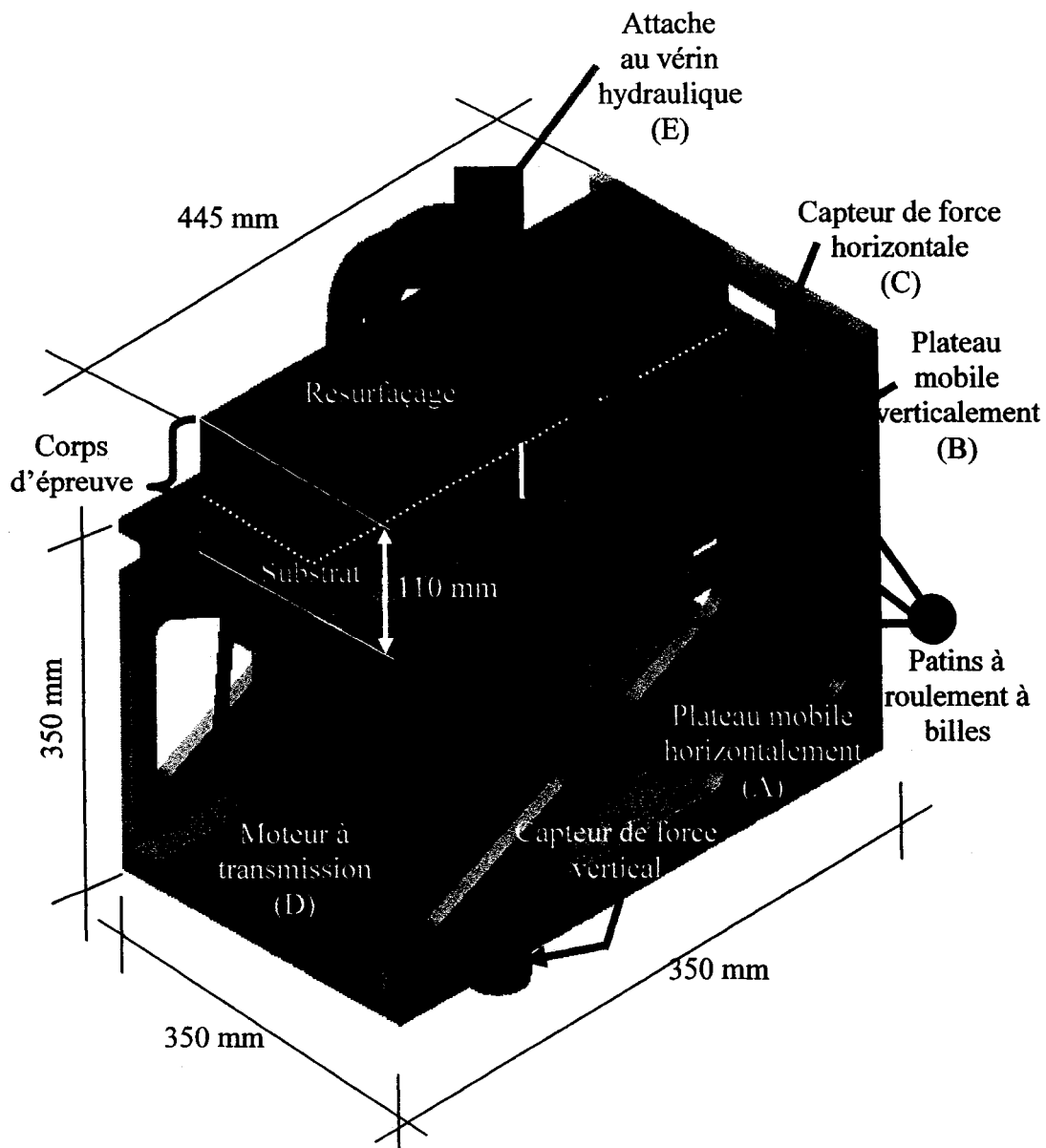
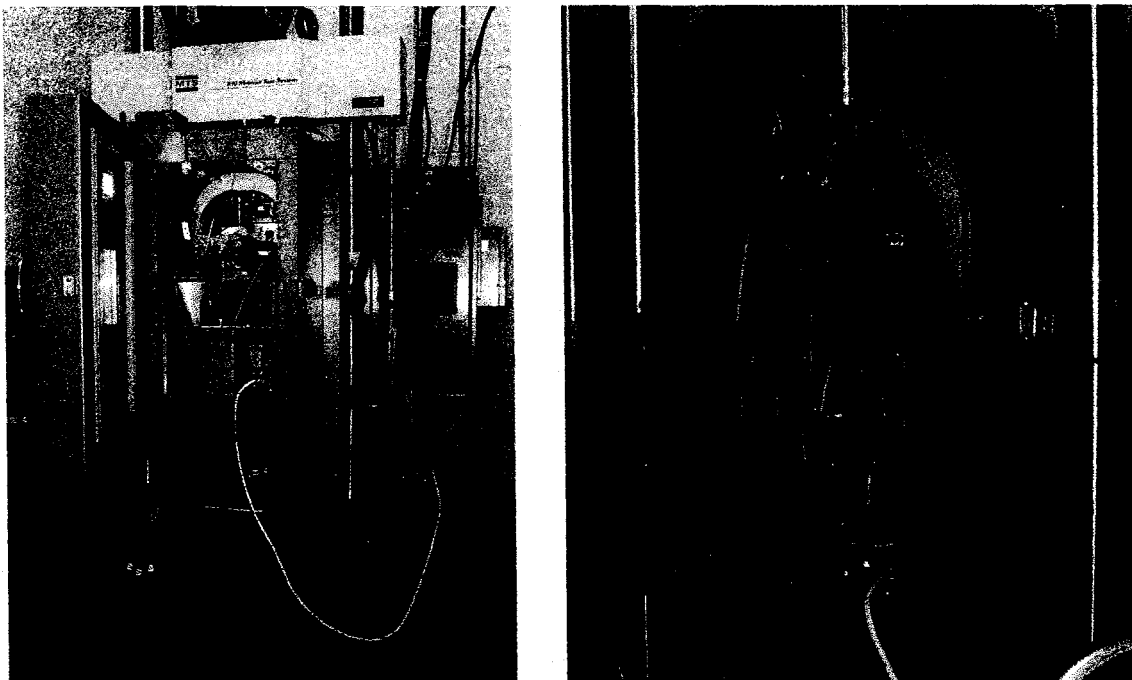


Figure 16 Vue d'ensemble de l'appareil proposé pour étudier la remontée des fissures dans les systèmes de resurfaçage



Figures 17 Vue d'ensemble de l'installation de l'appareil dans l'enceinte thermique et sur la presse hydraulique

2.2.1.1 Système mécanique

Deux plateaux horizontaux supportent le corps d'épreuve, l'un mobile dans le plan horizontal (Figure 18, plateau A) et l'autre, mobile dans le plan vertical (Figure 18 plateau B).

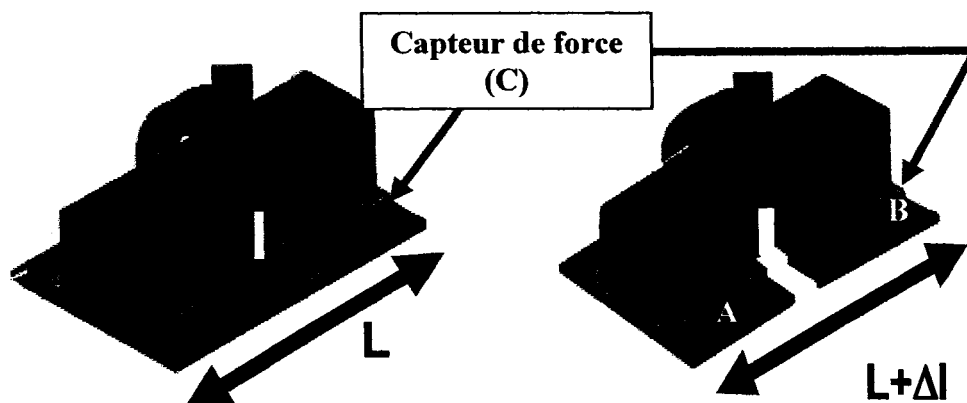


Figure 18 Croquis illustrant le mouvement associé au plateau A dans le montage proposé

Le plateau mobile verticalement, le plateau B, est monté sur deux rails munis de patins à billes et dont le mouvement à l'horizontale est empêché par l'entremise de deux capteurs de force (C) placés à l'arrière du corps d'épreuve (Figure 16). Ces capteurs de force horizontal disposés de chaque côté du corps d'épreuve, l'un sur la gauche et l'autre sur la droite, permettent de connaître directement l'effort transmis horizontalement dans l'enrobé de resurfacement, tout juste au droit du plan de l'entaille. Cet effort est certes associé au mouvement horizontal imposé par la mobilité contrôlée du plateau A, mais le mouvement vertical imposé par la mobilité contrôlée du plateau B va également engendrer un effort à l'horizontal.

Le mouvement horizontal est commandé par une bielle activée mécaniquement par l'entremise d'une transmission motorisée (D), (Figure 16) alors que le mouvement vertical est généré par l'entremise d'un vérin hydraulique (E) (Figure 16).

Les capteurs de la force horizontale (C), (Figure 18) sont fixés symétriquement de part et d'autre du plateau B. Ils mesurent la force appliquée sur la section moyenne (au droit de la fissure) du béton bitumineux et sur l'interface selon les éprouvettes testées. La force mesurée nous renseigne sur l'état de dégradation (fissuration) du système de resurfacement. Ultiment, lorsque la fissure du substrat a remonté la totalité de la section

du matériau de resurfaçage, la force des capteurs horizontaux chute radicalement au niveau zéro.

Le mouvement vertical du plateau B est assuré par un vérin hydraulique servo-contrôlé par le contrôleur TESTAR de MTS. Ce mouvement vise à simuler l'action du passage des véhicules au droit de la fissure (Figure 19).

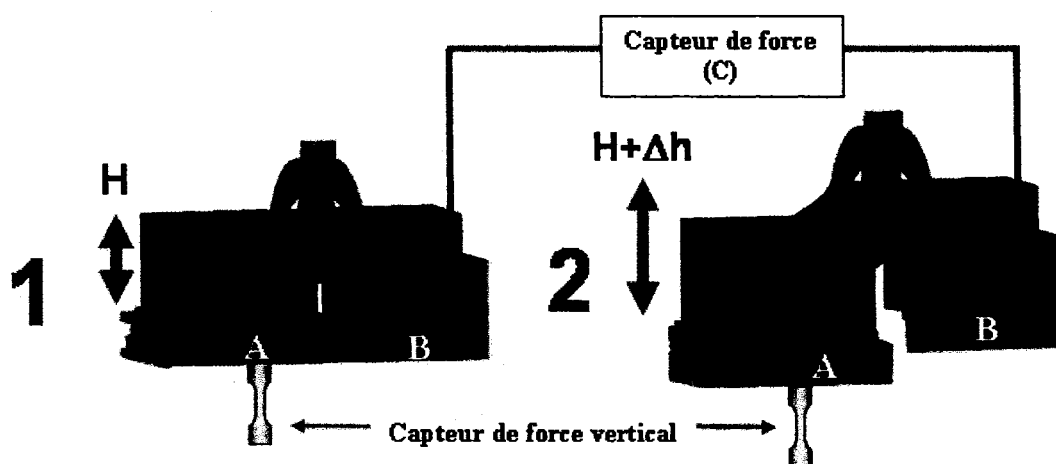


Figure 19 Croquis illustrant le mouvement associé au plateau B dans le montage proposé

2.2.1.2 Système de mesure

Le montage a été développé pour mesurer la performance des systèmes de resurfaçage anti-remontée de fissures suivant les deux principaux modes de sollicitation : mode I (ouverture/fermeture : simulant les variations thermiques saisonnières) et mode II (cisaillement : simulant le battement relatif au droit d'une fissure dû au passage des véhicules lourds).

Le système de mesure se présente suivant deux directions principales quant au plan de la fissure : la direction normale; la direction parallèle.

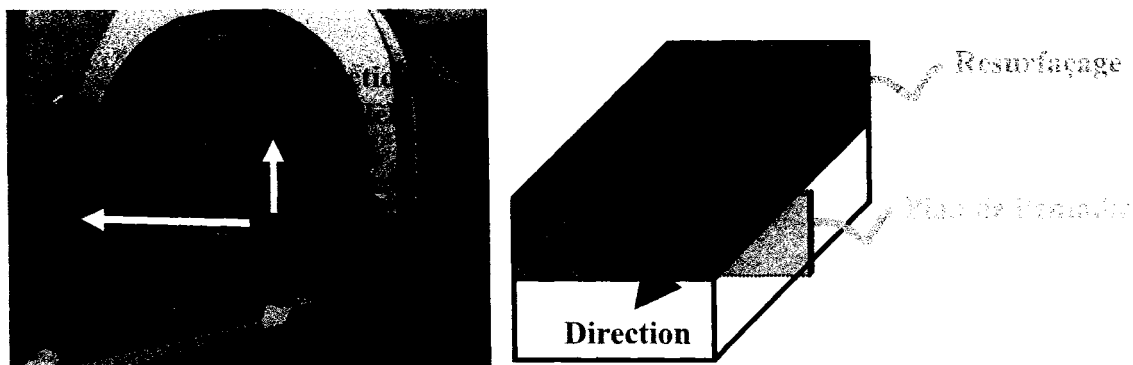


Figure 20 Directions principales au plan de la fissure

Pour chacune des directions (Figure 20), on mesure la force et le mouvement relatif de part et d'autre de l'entaille. L'appareil est instrumenté de manière à suivre l'évolution de la performance du corps d'épreuve en cours d'essai. Le système de mesure comprend : capteurs de forces et capteurs de déplacement disposés suivant les 2 directions.

Le croquis présenté à la Figure 21 permet de visualiser globalement l'ensemble du système de mesure utilisé pour juger de la performance de chacun des systèmes testés.

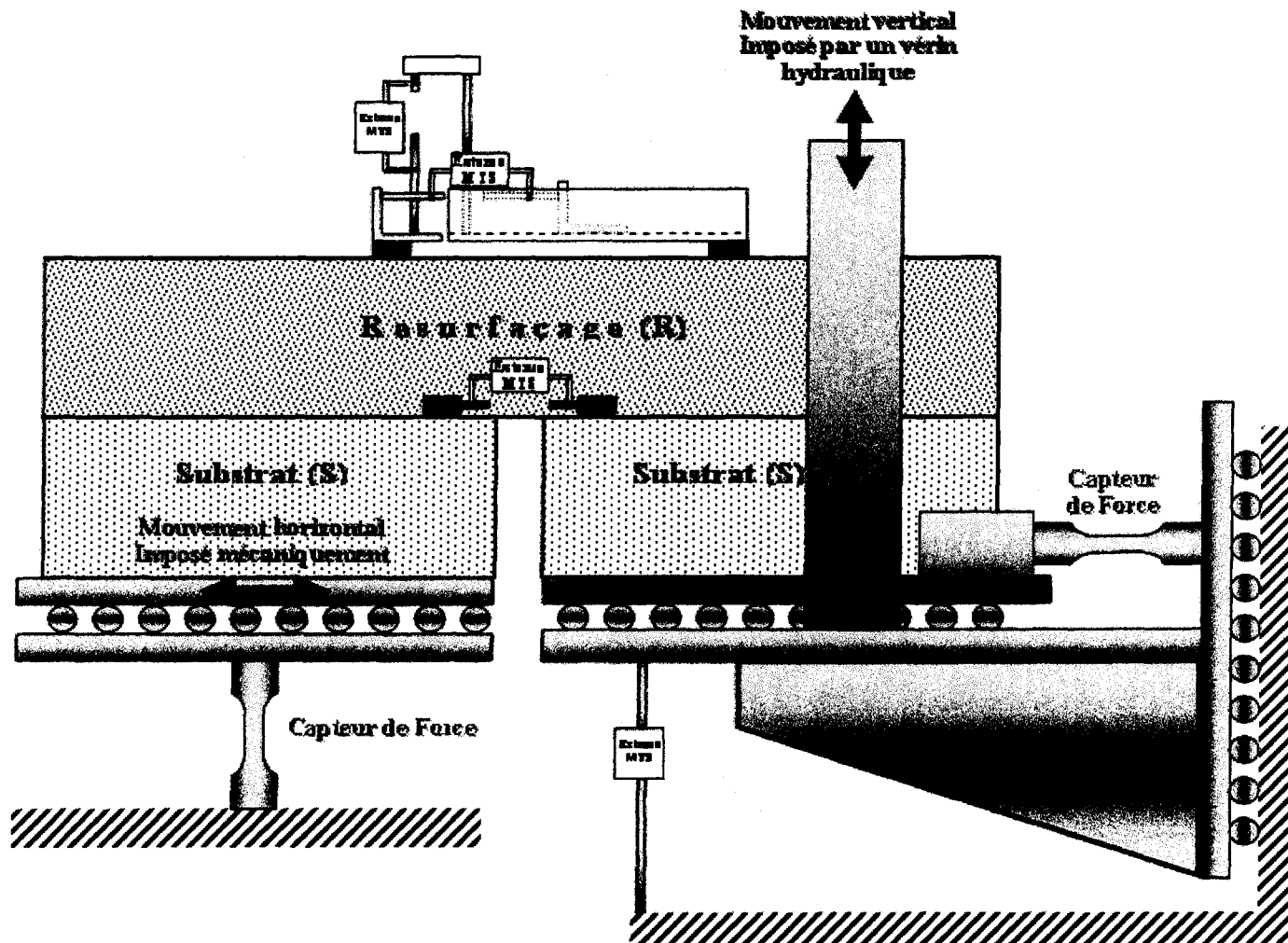


Figure 21 Schéma illustrant la disposition de l'instrumentation sur le corps d'épreuve

Les capteurs de déplacement sont situés près de la fissure et permettent de mesurer les mouvements directement sur l'éprouvette. Un quatrième capteur de déplacement, placé sous le plateau mobile B (Figures 18 et 19), assure un contrôle précis du déplacement vertical (B) à partir d'un référentiel stable (Figure 21). Cet extensomètre est en fait placé entre la base du plateau mobile verticalement, qui supporte le système de rail et de patins à roulement à billes, et le boulon d'attache de l'appareil à la cellule de charge à la base de la presse MTS, lequel peut être considéré comme un repère invariable.

La Figure 22 montre les deux capteurs de déplacement placés directement sur la surface de la couche de resurfaçage et celui placé latéralement au niveau de l'interface substrat (S) –resurfaçage (R).

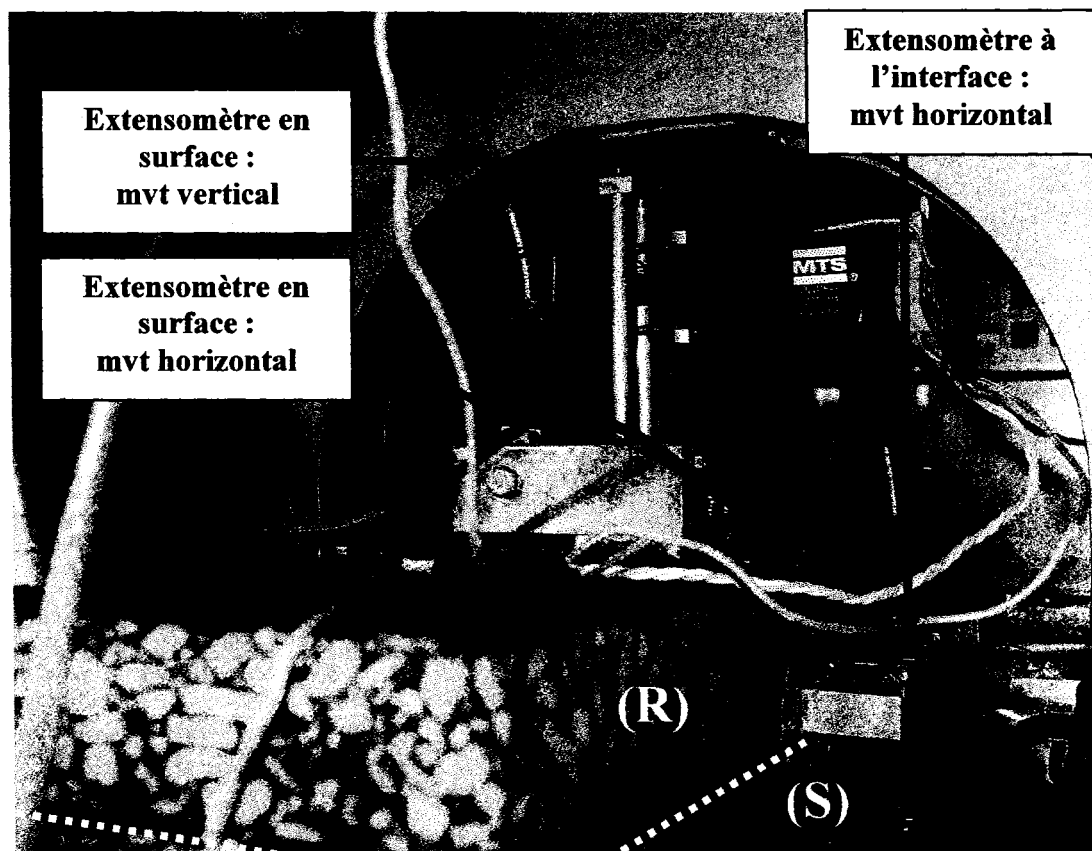


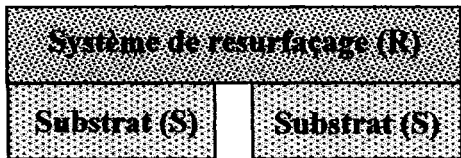
Figure 22 Position des capteurs de déplacement

2.2.1.3 Bilan du calcul des paramètres de performance

Le calcul de K_s (facteur de rigidité) n'est rigoureux que dans la mesure où, d'une part, le champ de contrainte est homogène et, d'autre part, si l'on est en mesure de bien connaître les déformations et les contraintes réelles dans le matériau. Or, le montage élaboré sollicite en mode bi-axial le corps d'épreuve de sorte que le champ de contraintes et de déformations est loin d'être homogène. De surcroît, l'interprétation des résultats est très complexe. D'une part, les conditions de retenue réalisées sur l'éprouvette par le collage du substrat de sa mi-hauteur à sa base pour imposer le mouvement horizontal donnent lieu à des efforts complexes dans le resurfaçage dus au mouvement imposé. D'autre part, le corps d'épreuve est constitué d'un système de resurfaçage c'est-à-dire de la superposition de différentes couches de matériau dont les propriétés rhéologiques sont très différentes les unes des autres.

En définitive, l'interprétation des résultats des essais réalisés à l'aide du montage mis en œuvre doit impérativement se faire sur une base relative, en référence à un corps d'épreuve représentatif d'un système de resurfaçage témoin. Dans le cadre du présent programme expérimental, deux corps d'épreuve constitués d'un système de resurfaçage simple vont servir de référentiel à l'analyse et à l'interprétation des résultats (Tableau IV).

Tableau IV
Détail des corps d'épreuve de référence

Nom	Détail	
REF-Labo		a) Substrat : EB-14 • Enrobage en centrale • Compaction en labo b) Resurfacement : ESG-10 • Enrobage en centrale • Compaction en labo c) Interface S/R : agent de liaison • Émulsion (Supercol 60) • Dosage : 250g résiduel/m²
REF-InSitu		a) Substrat : EB-10S • Enrobage en centrale • Compaction en chantier b) Resurfacement : ESG-10 • Enrobage en centrale • Compaction en labo c) Interface S/R : agent de liaison • Émulsion (Supercol 60) • Dosage : 250g résiduel/m²

En dépit du fait que l'analyse des résultats ne puisse se fonder sur une approche analytique rigoureuse, l'instrumentation attachée au corps d'épreuve permet de suivre l'évolution de la performance du système dans sa globalité. Les sections suivantes présentant les paramètres de calcul qui ont été retenus pour faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats.

Paramètres de calcul dans la direction parallèle au plan de fissure : direction verticale, y

À partir des mesures de déplacement et de force, dans la direction parallèle au plan de l'entaille, on propose de suivre l'évolution de la performance du système de resurfaçage par le calcul d'un facteur de rigidité (K_s) du système dans sa globalité.

Le module de rigidité, K_s

Pour certaines conditions telles que l'étude de la remontée des fissures, les conditions d'essai font en sorte qu'il est difficile, voire impensable, de bien cerner le niveau de déformation associé à la contrainte appliquée. En effet, d'une part certains essais sont conduits en conditions non-homogènes et, d'autre part, la progression de l'endommagement s'étend sur une zone difficilement quantifiable.

On peut facilement imaginer que, sous l'action d'une force de cisaillement de par et d'autre à deux entailles (voir Figure 23), les contraintes ne sont pas seulement localisées uniquement en pointe d'entaille, mais qu'elles affectent une section de faible épaisseur reliant les deux entailles (Laveissiere, 2003).

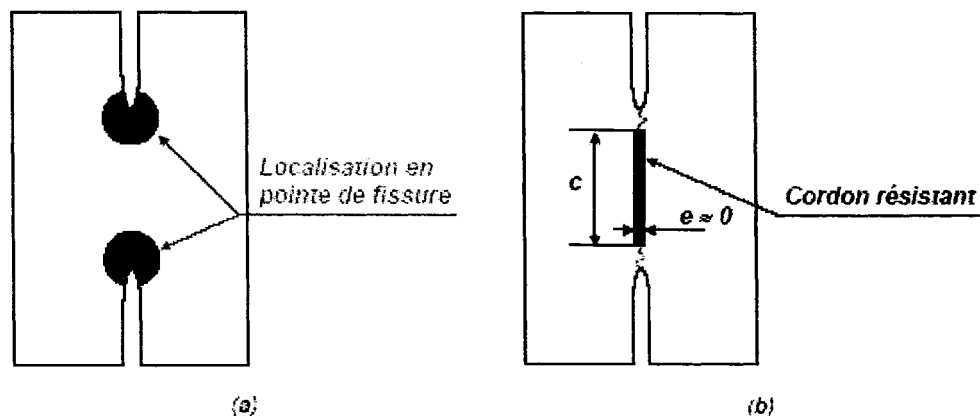


Figure 23 a) Approche par la mécanique de la rupture et b) approche par un endommagement localisé du cordon résistant.

En considérant la localisation de l'endommagement sur une bande de faible épaisseur, on peut alors associer le comportement du cordon à celui d'un joint sollicité en cisaillement. Étant donné qu'il est à toute fin pratique impensable de connaître la largeur de la bande sollicitée, nous pouvons nous référer au comportement d'un joint d'épaisseur nulle pour quantifier le comportement de la bande cisailée par le calcul de module de rigidité, K_s . On a :

$$K_s = \frac{\Delta \tau}{\Delta u} \quad (2.1)$$

Avec $\Delta \tau$ et Δu correspondant aux amplitudes de la contrainte de cisaillement et de déplacement.

En définitive, la réponse locale de la zone sollicitée entre deux entailles peut être décrite en considérant un comportement de joint d'épaisseur nulle. En éléments finis, on a développé des éléments représentatifs du comportement d'un tel joint : les éléments de joint. Suivant des coordonnées locales, dont l'origine des axes se trouve au centre de l'élément, la représentation d'un élément joint peut se décrire telle que présentée à la Figure 24. Il est caractérisé par une longueur, l_j , et une épaisseur nulle.

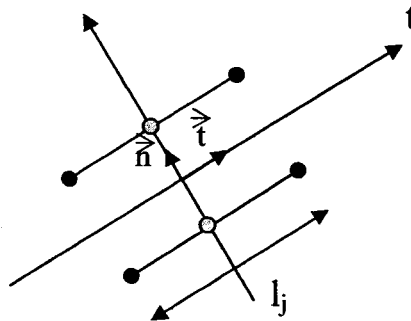


Figure 24 Éléments de joint à 6 nœuds

Le champ de déplacement w est alors défini par les deux composantes u et v telles que :

$$w = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

ou u et v sont les déplacements relatifs respectivement suivant le vecteur $\vec{t}$ et le vecteur $\vec{n}$.

En considérant un comportement élastique linéaire isotrope, la relation entre les tenseurs contraintes / déplacements ne représente pas de couplage entre le cisaillement et les efforts normaux, ainsi :

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

où k_s et k_n sont les raideurs tangente et normale.

Le mode de chargement cyclique sous l'action d'une sollicitation sinusoïdale permet une telle exploitation des résultats sur la base des caractéristiques viscoélastiques du système. Les calculs visent à mettre en relief les deux composantes : visqueuses et élastiques du système, en traitant directement le signal sinusoïdal du déplacement vertical en surface et celui de la force requise pour imposer ce mouvement. Pour ce faire, on prend en considération les déplacements suivant la direction verticale uniquement, en négligeant dans le calcul les déformations du système de resurfaçage dans la direction normale au plan de fissure.

Les résultats expérimentaux nous permettent de calculer le facteur de rigidité :

$$\text{Avec :} \quad K_s = \frac{\Delta \tau}{\Delta u} \quad (2.4)$$

$\Delta \tau$ et Δu sont les amplitudes de la contrainte de cisaillement et de déplacement.

Où :

$$K_s = \frac{\Delta F_v * 1000}{e_r * l_r * \Delta(CD - V)} \quad [\text{MPa/mm}] \quad (2.5)$$

F_v = force verticale

La Figure 25 montre la relation entre les mesures effectuées et le calcul du paramètre, K_s :

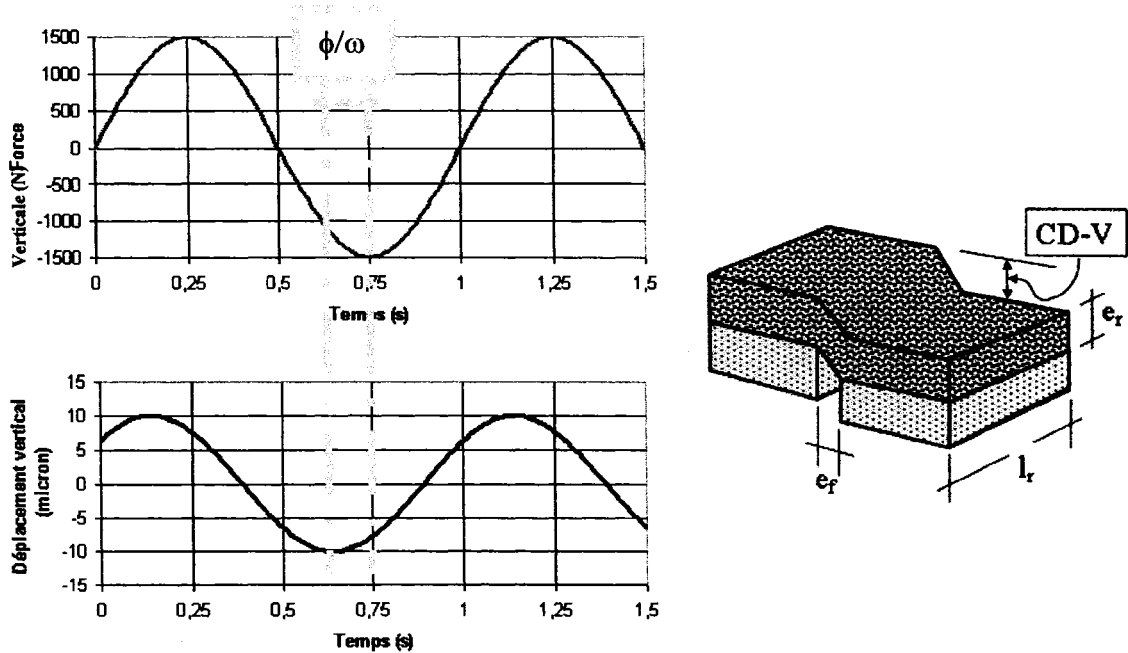


Figure 25 Relation entre les mesures effectuées et le calcul du paramètre K_s

Paramètres de calcul dans la direction normale au plan de l'entaille : direction horizontale, x

En ce qui à trait aux paramètres associés à la direction normale au plan de l'entaille, seul un suivi de la force horizontale mesurée à l'aide de deux capteurs de force placés en position arrière du corps d'épreuve (Figures 18, 19 et 21) sera pris en compte.

2.2.2 Synthèse des réflexions menées en vue d'établir les conditions d'essais pour les essais de remontée de fissures

Le mouvement au droit d'une fissure peut se résumer à un déplacement relatif suivant l'axe longitudinal de la chaussée, désigné mouvement en " Δx ", et un déplacement relatif vertical, désigné mouvement en " Δy ". Ce dernier est particulièrement associé au phénomène de battement (solicitation en mode II) qui apparaît lors du passage d'un véhicule alors que le mouvement en " x " est plutôt relié aux effets dus aux variations thermiques environnementales. Deux états distincts associés au mouvement relatif au droit d'une fissure sont alors définis :

- 1) les mouvements avant resurfaçage (*before*) et
- 2) les mouvements après resurfaçage (*after*).

C'est essentiellement les mouvements après resurfaçage que nous cherchons à préciser puisqu'ils représentent les valeurs à imposer en cours d'essai sur le corps d'épreuve.

2.2.2.1 Mouvement horizontal imposé en conditions d'essai

Pour évaluer la performance d'un système de resurfaçage vis-à-vis la remontée des fissures suivant les conditions qui prévalent au Québec, il faut dans un premier temps prendre en compte aussi bien les effets thermiques (mode I) que ceux liés au passage des véhicules lourds (mode II).

Comme nous l'avons évoqué au chapitre précédant, la sollicitation la plus significative en mode I (ouverture-fermeture des fissures) est associée aux différentiels de variations thermiques imputables aux périodes hivernales et estivales. Pour simplifier les essais en laboratoire, nous avons choisi de travailler en conditions **isothermes** et de simuler mécaniquement les effets liés à cette variation thermique par un mouvement imposé à l'horizontale sur le système de resurfaçage testé.

Pour fixer les paramètres d'essai, il est nécessaire, dans un premier temps, de cibler la température moyenne de l'essai et, dans un deuxième temps, de cerner l'amplitude des mouvements horizontaux, potentiel qui se manifeste aux lèvres d'une fissure sous l'effet des variations de température saisonnière (hiver versus été).

La température moyenne d'essai a été établie en tenant compte des conditions climatiques spécifiques à l'environnement québécois. À partir des dernières données statistiques météorologiques pour les mois où les températures ambiantes sont négatives au Québec (novembre, décembre, janvier, février, mars et avril) nous avons établi un écart moyen entre les saisons hivernales et estivales et la moyenne annuelle pour l'ensemble du territoire. Les Figures 26 et 27 illustrent les températures moyennes hivernales et annuelles au Québec. Prenant en considération une de principales causes de fissuration, les températures de conditionnement et d'essai seront fixées à $+5^{\circ}\text{C}$ et -5°C .

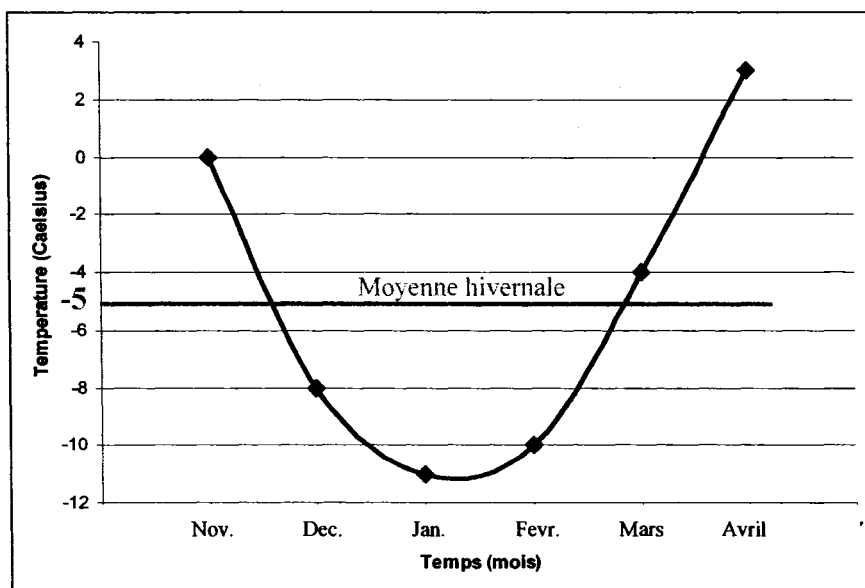


Figure 26 Températures moyennes de mois novembre, décembre, janvier, février, mars et avril : au Québec

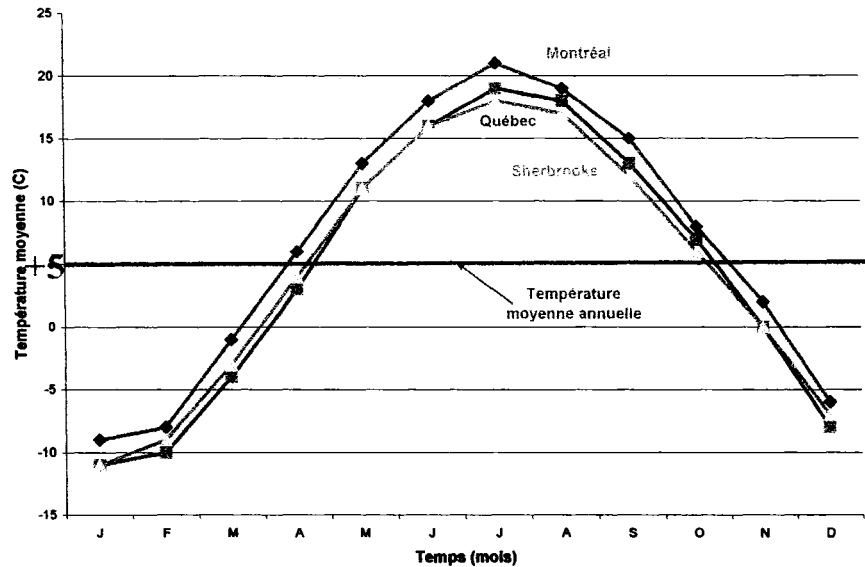


Figure 27 Températures annuelles au Québec

À partir des écarts de températures entre les saisons hivernales et estivales et en connaissant les coefficients de dilatation thermiques des enrobés, on peut estimer l'amplitude de l'ouverture-fermeture d'une fissure. En supposant que l'espacement des fissures transversales est de l'ordre de 3-4 m, on estime que l'ouverture de la fissure serait de l'ordre de 2 mm pour une variation de température de -5 à -30°C (Annexe 4).

En définitive, on peut admettre que la variation de l'ouverture de la fissure est donc de l'ordre du millimètre. Les observations sur route, effectuées par le ministère des Transports du Québec, révèlent que 80% des fissures transversales (387 fissures instrumentées) montrent des différences d'ouverture comprises entre 0 et 3 mm entre les mois de mars et juillet (hiver-été) (Bergeron, 2002).

Bien que nous ayons ciblé jusqu'à maintenant la température moyenne d'essai et l'amplitude de déplacement horizontal à imposer au substrat, il devient important de fixer une fréquence de sollicitation réaliste. En effet, les matériaux bitumineux ont un comportement visco-élastique et la fréquence de sollicitation modifie substantiellement

sa réponse sous sollicitation : une fréquence rapide engendre des contraintes importantes tout en réduisant sa capacité de relaxation.

Dans l'essai développé au LUCREB, le mouvement horizontal imposé pour simuler la remontée des fissures est sinusoïdal. Le mouvement horizontal qui force l'ouverture de l'entaille et qui induit une tension dans l'enrobé de resurfaçage, est imposé mécaniquement par une extension appliquée à la base du substrat, et ce, jusqu'à l'amplitude visée (de l'ordre du mm). Le mouvement de retour à la position de départ qui induit alors un effet de compression cherchant à refermer l'entaille s'effectue suivant le même temps. La Figure 28 montre schématiquement la sollicitation imposée.

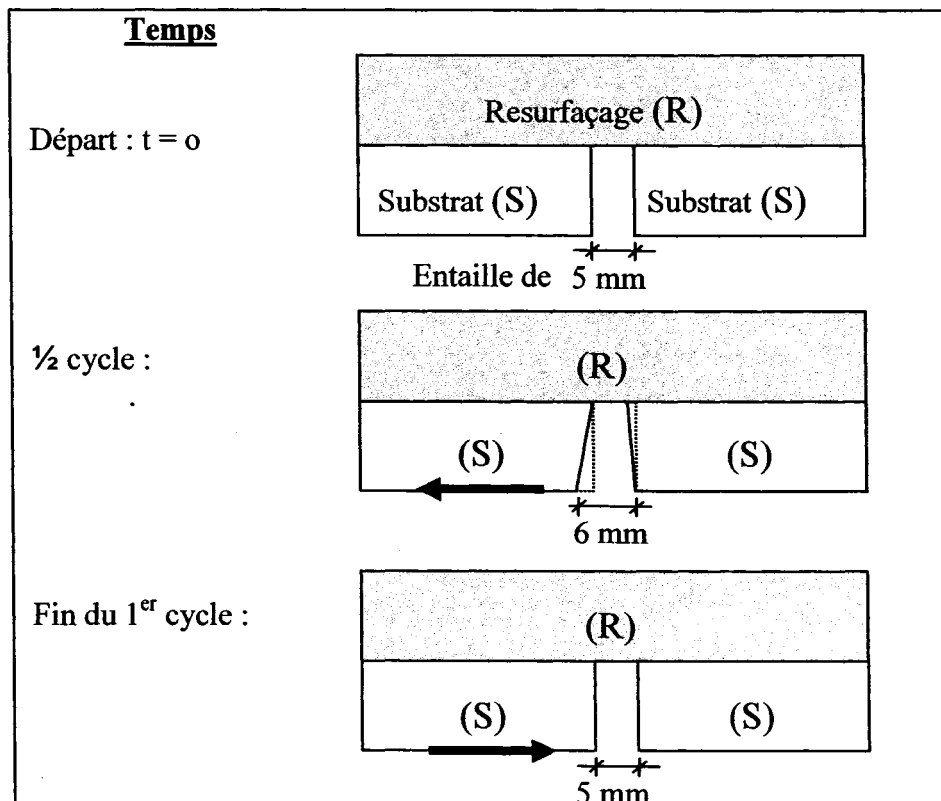


Figure 28 Cycle de chargement du mouvement horizontal imposé de 1 mm

En tenant compte des limites associées à l'appareillage dont nous disposons au niveau de l'engrenage de notre système mécanique, le cycle total imposé doit être compris dans un temps de 52 minutes, soit une période (T) de 3120s.

La Figure 29 montre schématiquement le mouvement horizontal imposé mécaniquement et retenu pour ce programme d'essai.

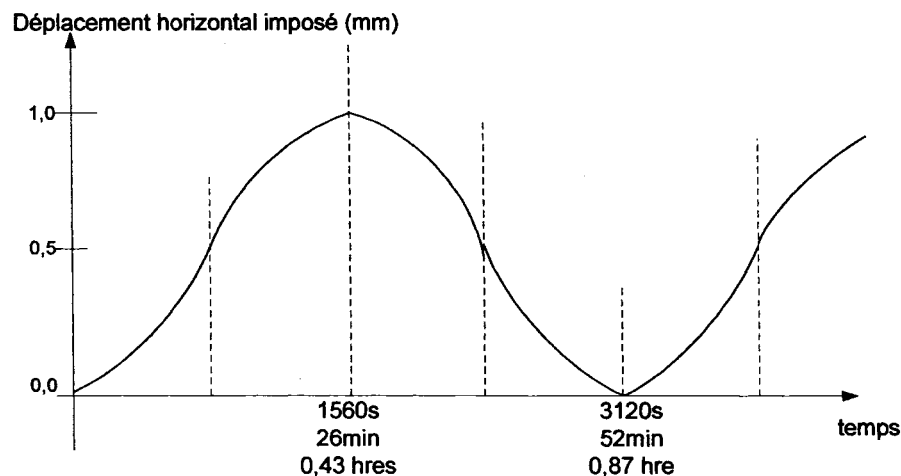


Figure 29 Représentation schématique du mouvement horizontal imposé

2.2.2.2 Mouvement vertical imposé en cours d'essai

Le passage des véhicules lourds qui forcent également la remontée des fissures se manifeste de façon plus critique par un effort de cisaillement (mode II).

Le montage permet d'appliquer un différentiel de déplacement vertical de part et d'autre de l'entaille, permettant aussi d'induire un effort de cisaillement dans le resurfaçage, autour de l'entaille.

Sur route, l'amplitude du mouvement vertical au droit d'une fissure est fonction principalement de 4 paramètres :

- 1) la capacité résiduelle de la structure de la chaussée resurfaçée
- 2) l'épaisseur du resurfaçage
- 3) les caractéristiques de l'enrobé de resurfaçage et
- 4) la charge appliquée.

Pour établir l'ordre de grandeur de l'amplitude de mouvement à la verticale, c'est-à-dire le mouvement dans la direction «y» à imposer dans le cadre de ce programme d'essai, nous avons, dans un premier temps, pris les résultats d'une simulation du comportement en éléments finis d'une chaussée resurfaçée, en élasticité linéaire prenant en considération des caractéristiques représentatives des matériaux de chaussée au Québec (Annexe 1).

Les résultats de cette simulation ont été comparés aux modèles empiriques de Pais et Pereira (2000), lesquelles permettent d'estimer l'amplitude des mouvements en «x» et en «y» d'une structure de chaussée après resurfaçage (Annexe 3).

Les résultats de la simulation numérique présentés à l'Annexe 3 et ceux obtenus en appliquant le modèle de Pais et Pareira (2000) montrent que le mouvement vertical mesuré en surface de part et d'autre d'une fissure après resurfaçage est nettement inférieur au centième de millimètre ($\sim 10 \mu\text{m}$).

Les mesures, effectuées sur les routes au Québec par le MTQ (Saint Laurent, 2004), soulignaient que des battements au droit d'une fissure avant resurfaçage, sont d'amplitude moyenne de $63 \mu\text{m}$. Nous avons imposé un déplacement vertical de l'ordre de grandeur de la valeur moyenne observée sur les routes au Québec. Des corps d'épreuve ont donc été mis à l'essai en imposant un mouvement vertical, « Δy », de $60 \mu\text{m}$.

En tenant compte des résultats obtenus pour cet essai, nous avons choisi d'imposer un déplacement sinusoïdale d'amplitude de $10 \mu\text{m}$ a été fait, correspondant aussi à un

déplacement total de $20\mu\text{m}$. Ce déplacement est imposé en surface de l'éprouvette, de part et d'autre de l'entaille, suivant une distance minimale d'écartement des repères collés à la surface du système de resurfaçage (Figure 30).

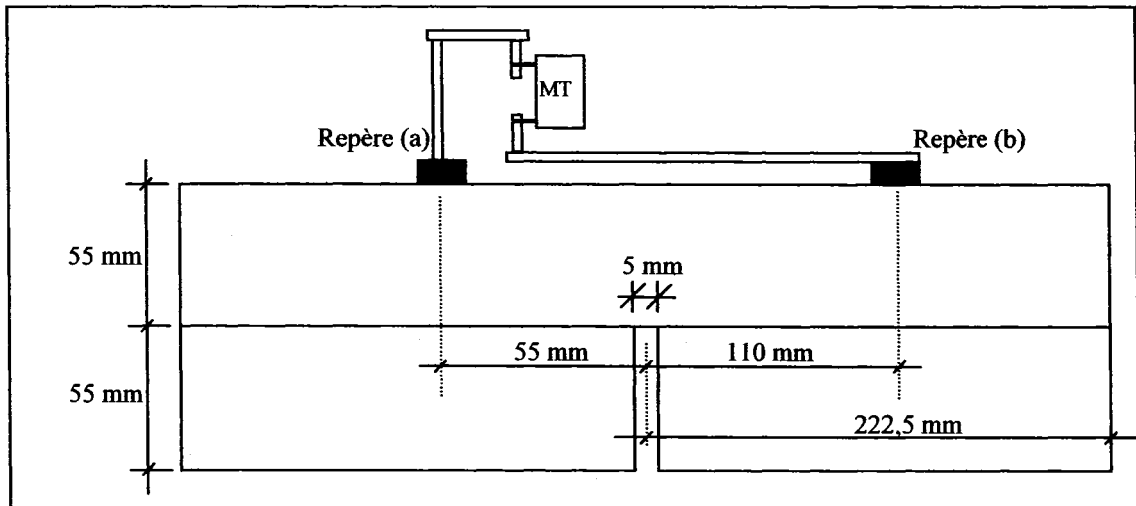
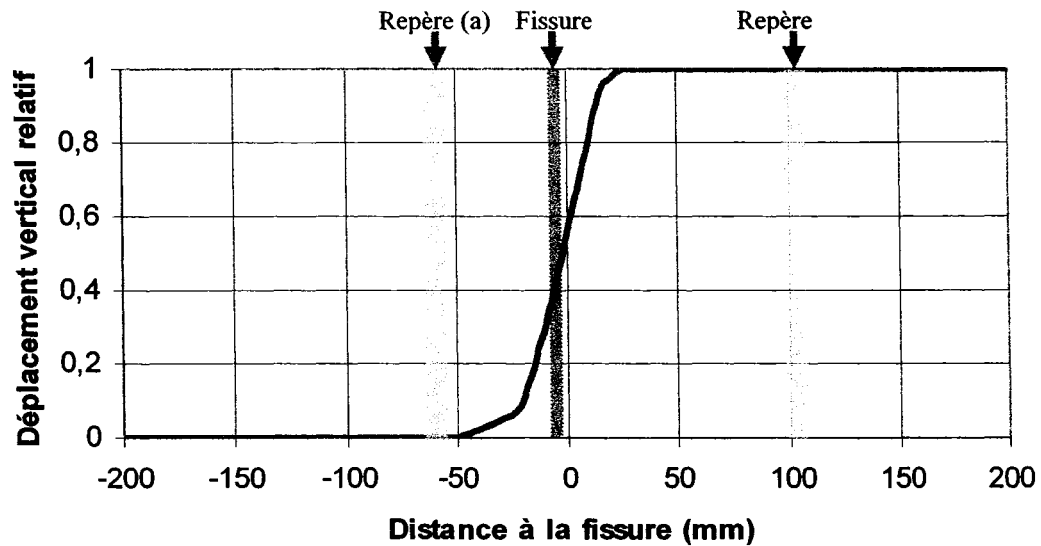
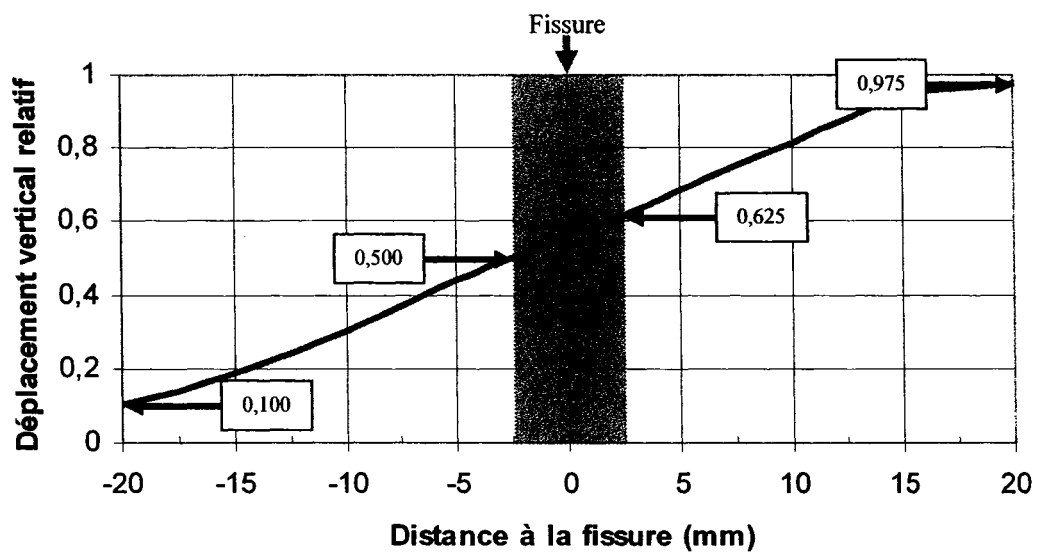


Figure 30 Distances fixées pour la position des repères de déplacements verticaux

Nous avons également établi par calcul, le mouvement relatif juste au droit de l'entaille. Suivant la position des repères présentés à la Figure 30, la variation du déplacement vertical, exprimé en référence à la différentielle imposée entre les repères (a) et (b) par rapport à la fissure est présentée à la Figure 31 sous l'effet d'un déplacement imposé de $20\mu\text{m}$ entre ces repères. Le fait d'imposer une différentielle de déplacement vertical de $20\mu\text{m}$ entre les repères (a) et (b) conduit à un mouvement différentiel vertical de $2,5\mu\text{m}$ au droit de l'entaille $((0,625-0,500)*20\mu\text{m})$.



a) Variation du déplacement en surface du corps d'épreuve en fonction de la position de la fissure



b) Variation du déplacement en surface du corps d'épreuve en fonction de la position de la fissure dans la zone -20 à +20 mm

Figure 31 Variation du déplacement vertical relatif sous l'action du mouvement différentiel vertical de $20\mu\text{m}$ entre les repères A et B

2.2.2.3 Fréquence de sollicitation verticale

Bien que le mouvement en «y» se veut représentatif de l'action de la charge pneumatique d'un véhicule lourd au droit de la fissure et qu'il soit usuel que la fréquence de sollicitation correspondante dans une chaussée neuve soit de l'ordre de 10 Hz (pour une vitesse de véhicule de 80 km/h et une chaussée d'épaisseur intermédiaire de 80 mm), des contraintes d'ordre expérimental nous ont conduits à fixer la fréquence de sollicitation à 1Hz.

2.2.2.4 Synthèse des conditions d'essai imposées dans le cadre du programme d'essai

Le Tableau V illustre les conditions d'essais retenues pour le programme expérimental :

Tableau V

Synthèse des conditions retenues pour les essais de remontée de fissures

		Amplitude totale		Fréquence/ Période	
		Déplacement (μm)	Déformation (ϵ/hre)	Hz	T (sec)
+5°C	Horizontal	2000	0,1026 ⁽¹⁾	0,00032	3120s
	Vertical	20	28,8	1,0	1
-5°C	Horizontal	1000	0,0513 ⁽¹⁾	0,00032	3120s
	Vertical	20	28,8	1,0	1

⁽¹⁾ en prenant une zone d'influence de 20 μm

2.2.3 Programme expérimental

Comme nous l'avons souligné dans la revue de la littérature, plusieurs alternatives sont proposées pour empêcher la remontée des fissures dans les couches de resurfaçages. Compte tenu des conditions extrêmement sévères au Québec, 2 principaux systèmes de resurfaçages retiennent notre attention :

- 1) l'utilisation d'une couche d'interface constituée d'un enrobé CH-10;
- 2) système SAMI.

Le SAMI est un produit testé en Europe et États-Unis, mais dont les références au Québec ne sont que peu nombreuses.

Certaines planches d'essais ont été réalisées par le MTQ avec le système SAMI, mais celui-ci ne s'est pas montré très efficace. Les chaussées de ces planches d'essais étaient cependant très dégradées et certaines fissures atteignaient 5 mm d'ouverture. Ces quelques observations laissent supposer l'existence de certaines limites au procédé par rapport aux conditions de mise en service au Québec.

Le recul nécessaire n'est donc pas suffisant pour établir si le système SAMI est adapté aux conditions de sollicitations au Québec. En effet, d'une part les températures sont plus froides (moyenne hivernale de -5°C), mais surtout les contrastes thermiques (jour/nuit et hiver/été) sont beaucoup plus marqués qu'en France par exemple. De ceci résultent des problèmes de retrait thermique beaucoup plus importants et donc des ouvertures de fissures ainsi qu'une fissuration de plus grande envergure. En d'autres termes, outre des températures de service nettement plus sévères, le produit doit supporter des conditions de sollicitations beaucoup plus dures. De plus, le système SAMI développé à l'origine en France pour des chaussées semi-rigides, il doit être adaptable aux chaussées souples présentes en majorité au Québec.

Au regard de l'état du réseau routier du Québec, un système SAMI peut apparaître comme une solution intéressante. Néanmoins, il est important de bien définir les limites du produit vis-à-vis des conditions de sollicitations pour permettre une utilisation optimale.

Tenant compte à la fois des conditions d'essais retenues (voir Tableau V) et des systèmes anti-remontée de fissures que nous souhaitons évaluer, la performance vis-à-vis la remontée des fissures de différents systèmes a été évaluée suivant un programme expérimental précis présenté dans le Tableau VI. Le programme d'essais a été effectué en trois phases : 1) resurfaçage simple mis en œuvre sur une base pré-fissurée, constituée d'un enrobé EB-14 neuf, 2) resurfaçage simple mis en œuvre sur une base pré-fissurée, constituée d'un enrobé EB-10S prélevé par sciage en chantier et 3) resurfaçage multicouche mis en œuvre sur une base pré-fissurée, constituée d'un enrobé EB-14 neuf. Globalement, le Tableau VII (1 à 3) présente pour chacune des phases les dates de fabrication et de mise en essai des corps d'épreuve et les conditions d'essai imposées.

Tableau VI

Synthèse des essais de laboratoire à réaliser sur le montage bi-axial

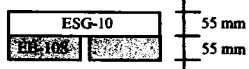
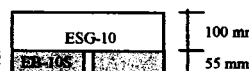
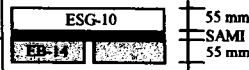
	Enrobé de base	Interface base-surface	Enrobé de resurfaçage	Épaisseur du système	Conditions d'essai	Corps d'épreuve
Système 1A Resurfaçage	EB-14 (55mm)	Émulsion	ESG-10 (55 mm)	110 mm	T=+5°C $\Delta x=2\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
	EB-14 (55mm)	Émulsion	ESG-10 (55 mm)	110 mm	T=-5°C $\Delta x=1\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
	EB-14 (55mm)	Émulsion	ESG-10 (100 mm)	155 mm	T=+5°C $\Delta x=2\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
	EB-14 (55mm)	Émulsion	ESG-10 (100 mm)	155 mm	T=-5°C $\Delta x=1\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
Système 1B Resurfaçage (sur enrobé prélever sur la route)	EB-10S (55 mm)	Émulsion	ESG-10 (55 mm)	110 mm	T=+5°C $\Delta x=2\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
	EB-10S (55 mm)	Émulsion	ESG-10 (55 mm)	110 mm	T=-5°C $\Delta x=1\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
	EB-10S (55 mm)	Émulsion	ESG-10 (100 mm)	155 mm	T=+5°C $\Delta x=2\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
	EB-10S (55 mm)	Émulsion	ESG-10 (100 mm)	155 mm	T=-5°C $\Delta x=1\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
Système 2 Renforcement	EB-14 (55mm)	Chape d'étanchéité (15 mm)	ESG-10 (55 mm)	125 mm	T=+5°C $\Delta x=2\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
	EB-14 (55mm)	Chape d'étanchéité (15 mm)	ESG-10 (55 mm)	125 mm	T=-5°C $\Delta x=1\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
Système 3 Décohesionnement	EB-14 (55mm)	Système SAMI (6+8 mm)	ESG-10 (55 mm)	124 mm	T=+5°C $\Delta x=2\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	
	EB-14 (55mm)	Système SAMI (6+8 mm)	ESG-10 (55 mm)	124 mm	T=-5°C $\Delta x=1\text{mm}$ $\Delta y=20\mu\text{m}$	

Tableau VII

Synthèse des essais en laboratoire

	Essai #	Confection corps d'épreuve	Essai à T °C	ΔX (mm)	Type de Resurf.	e _{Resurf} (mm)	T (°C)	
1) Resurfaçage simple mis en œuvre sur une base pré-fissurée								
2) constituée d'un enrobé EB-14 neuf								
BASE (EB-14) LABO	1	20.10.2004 294-01	19.11.2004	2	émulsion	55	+5	
	2	15-12-2004 350-01	6-01-2005	1	émulsion	55	-5	
	3	29-09-2004 273-1	26-11-2004	2	émulsion	100	+5	
	4	23-09-2004 267-1	26-09-2004 sans renfort	1	émulsion	100	-5	
		28-09-2004 272-2	03-11-2004 renfort total					
		4-12-2004 339-01	15-12-2004 renfort partiel					
2) Resurfaçage simple mis en œuvre sur une base pré-fissurée constituée d'un enrobé EB-10S prélevé par sciage en chantier								
BASE (EB-10-S) IN SITU	5	3-12-2004 L-338	4-12-2004	2	émulsion	55	+	
	6	6-12-2004 L-341-01	10-12-2004	1	émulsion	55	-	
	7	4-12-2004 L-339	7-12-2004	2	émulsion	100	+	
	8	6-12-2004 L-341-02	12-12-2004	1	émulsion	100	-	
3) Resurfaçage multicouche mis en œuvre sur une base pré-fissurée constituée d'un enrobé EB-14 neuf								
BASE (EB-14) LABO	Décohés.	9	14-12-2004 349-02	17.03.2005	2	Membr.	68	+5
		10	14-12-2004 349-01	17-12-2004	1	Membr.	67	-5
	Renforc	11	17-12-2004 352-02	15.03.2005	2	chape	72	+5
		12	17-12-2004 352-01	22-12-2004	1	chape	74	-5

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA CONFECTION DES ÉCHANTILLONS EN LABORATOIRE

3.1 Matériaux utilisés

Plusieurs matériaux bitumineux ont été utilisés dans le cadre de ce projet de recherche : deux enrobés de base utilisés comme substrat, les enrobés EB-14 et EB-10S; un enrobé utilisé comme mortier bitumineux d'interface, l'enrobé CH-10, un système multicouche, incluant une membrane élastomère jumelée à un enrobé coulé à froid (enrobé ECF) et finalement un enrobé de roulement, l'enrobé ESG-10. Les sections suivantes présentent les principales caractéristiques de chacun des constituants de ces matériaux bitumineux utilisés pour la confection des corps d'épreuve. Également dans le cadre de ce chapitre, nous présenterons la synthèse des essais de contrôle en laboratoire effectués pour évaluer les principales caractéristiques de ces enrobés.

La Figure 32 présente un schéma des constituants de chaque matériau bitumineux utilisé dans le cadre du programme expérimental:

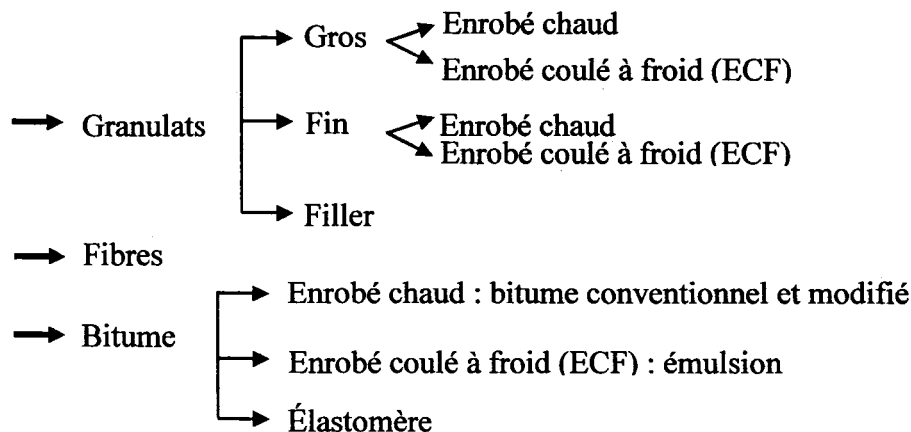


Figure 32 Schéma des constituants de chaque matériau

3.1.1 Gros granulats (pierre)

Comme nous l'avons évoqué précédemment, plusieurs types d'enrobés ont été utilisés pour la confection des corps d'épreuve. Notamment, le gros granulat, concassé, utilisé pour la confection de l'enrobé EB-14 provient de la région *Wickham*. Sa nature minéralogique est de type calcaire. Deux calibres ont été utilisés : 5-10 mm et 10-14 mm.

Pour la confection de l'enrobé ESG-10, une pierre concassée de calibre 5-10 mm, en provenance de la région *Saint Bruno*, a été utilisée. La nature minéralogique de cette pierre est de type pierre cornéenne.

En ce qui a trait à l'enrobé coulé à froid dont l'épaisseur ciblée de mise en œuvre est comprise entre 8 et 10 mm, une pierre de calibre 4-6 mm a été utilisée. Cette pierre, également concassée, présente une minéralogie de type pierre cornéenne.

Le Tableau VIII présente la granularité et les principales caractéristiques physiques de différents gros granulats utilisés dans la confection des matériaux bitumineux utilisés dans le cadre de ce projet.

Les données révèlent que ces granulats répondent aux critères de catégorie 1 de la norme NQ 2560-14/2002 « Travaux de génie civil – Granulats ».

Tableau VIII

Caractéristiques des gros granulats utilisés

Référence type enrobé		EB-14		ESG-10	ECF	CH-10	EB-10S
Nature minéralogique		calcaire	calcaire	Pierre cornéenne	Pierre cornéenne	Pierre cornéenne	Pierre cornéenne
Provenance		Carrière Blueau	Carrière Blueau	DJL St. Bruno	DJL St. Bruno	DJL St. Bruno	DJL St. Bruno
Propriétés	Norme	10-14 mm	5-10 mm	5-10 mm	5-10 mm	5-10 mm	5-10 mm
Densité brute (D_{gb})	LC-21-065/066/067	2,649	2,645	2,813	2,793	2,768	2,768
Densité apparente (D_{ga})	LC-21-065/066/067	2,686	2,687	2,847	2,826	2,829	2,829
Absorption à l'eau (%)	LC-21-065/066/067	0,52	0,59	0,42	0,45	0,45	0,45
Fragmentation (%)	LC-21-100	100	100	100	100	-	-
Particules plates	LC-21-265	13,1	Cat. I	Cat. I	Cat. I	Cat. I	Cat. I
Particules allongées	LC-21-265	25,6	Cat. I	Cat. I	Cat. I	Cat. I	Cat. I
Résistance à la fragmentation : LA (%)	BNQ 2560-400 LC-21-400	14,3*	17,6*	20,4	12,8	10,0	10,0
Résistance à l'usure : M.D. (%)	BNQ 2560-070 LC-21-101	10,0*	10,9*	9,5	8,5	4,0	4,0
Propreté au 80 µm (%)	CSA A23.2.5	1,3*	1,3	1,3	0,9	0,9	0,9
Coefficient polissage par projection	LC-21-102	0,54*	0,54*	0,54	-	-	-
Epilonnée à sec (kg/m³)	BNQ 2560-060	n/d	1 484	n/d	n/d	n/d	n/d
Friabilité (%)	BNQ 2560-080	n/d	n/d	n/d	n/d	-	-
Granulométrie (tamisas) (%)	14,0 mm	BNQ 2560-040 LC-21-040	89	100	100	100	100
	10,0 mm		12	88	88	96	95
	5,0 mm		2	7	11	10	9
	2,50 mm		2	2	1	2	1
	1,25 mm		2	2	1	1	1
	630 µm		2	2	1	1	1
	315 µm		2	2	1	1	1
	160 µm		2	2	1	1	1
	80 µm		1,3	1,3	1,3	0,9	0,9

* données fournies par le producteur

3.1.2 Granulats fins de calibre 0-5 mm

Exception faite d'un sable roulé utilisé de façon sporadique, les granulats fins utilisés dans la confection de chaque enrobé sont concassés et de même minéralogie que les gros granulats auxquels ils sont combinés. Les granulométries correspondantes sont présentées dans le Tableau IX.

Pour la confection de l'enrobé EB-14, le sable roulé naturel de calibre 0-5 mm est un silice qui provient de la région de *Durham Sud* et la criblure de calibre 0-5 mm provient de la région *Wickham*.

La provenance de la criblure de calibre 0-5 mm utilisé pour la confection de l'enrobé ESG-10, est de la région de *Saint-Philippe* et la nature minéralogique de ce granulat est de type calcaire.

Tableau IX
Caractéristiques des fins granulats utilisés

Référence type enrobé		EB-14		ESG-10		ECF	CH-10			EB-10S	
Nature minéralogique		calcaire	silice	calcaire	Var.	calcaire	silice	calcaire	calcaire	calcaire	silice
Provenance		Carrière Bluteau	Banc Coddington	St. Philippe	Recmix	St Bruno	Sable naturel	St-Philippe	St Bruno	St Bruno	Banc Savarez
Propriétés	Norme	0-5 mm	Sable naturel	0-5 mm	sable	0-5 mm	0-5 mm	0-5 mm	0-5 mm	0-5 mm	sable
Densité brute (D _{gb})	LC-21-065/066/067	2,635*	2,656	2,691	2,693	2,763	2,656	2,707	2,640	2,640	2,640
Densité apparente (D _{ga})	LC-21-065/066/067	2,70*	2,73	2,752	2,954	-	-	2,752	-	-	-
Absorption à l'eau (%)	LC-21-065/066/067	0,92*	1,02	0,83	1,37	0,57	1,02	1,03	1,05	1,05	1,05
Friabilité (%)	LC-21-080	20,7	21,1	29*	21,1	14,4	n/d	37,0	n/d	n/d	n/d
Fragmentation (%)	LC-21-100	100	n/d	n/d	n/d	n/d	n/a	-	n/d	n/d	n/a
Particules plates	LC-21-265	Cat. I	n/d	n/d	n/d	n/d	n/a	-	n/d	n/d	n/a
Particules allongées	LC-21-265	Cat. I	n/d	n/d	n/d	n/d	n/a	-	n/d	-	n/d
Coefficient d'écoulement (C _e)	LC-21-075	80	80	103,8*	80	n/d	n/d	-	n/d	-	n/d
Résistance à la fragmentation : LA (%)	BNQ 2560-400 LC-21-400	20,4*	n/d	n/d	n/d	n/d	n/a	-	n/d	-	n/a
Résistance à l'usure : M.D. (%)	BNQ 2560-070 LC-21-101	20,7	19,6	24*	19,6	10,7	n/a	16,0	n/d	8,0	n/a
Propreté au 80 µm (%)	CSA A23.2.5	1,3	n/d	11,1	n/d	n/d	n/d	-	n/d	-	n/d
Coefficient polissage par projection	LC-21-102	0,54*	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	-	n/d	-	n/d
Mottes d'argiles & particules friables (%)	CSA-A23.2.3	n/d	0,38	0,66*	n/d	n/d	n/d	-	n/d	-	n/d
Particules inférieures à 5 µm (%)	NQ 2501-025	n/d	97,0	94	n/d	95	100	96	95	95	100
ρ _{pilonnée à sec} (kg/m³)	BNQ 2560-060	1 484*	n/d	n/d	n/d	-	-	-	-	-	-
Friabilité (%)	BNQ 2560-080	20,7	21,1	26,2*	n/d	-	-	37,0	-	11,0	-
Granulométrie (tamisats) (%)	10,0 mm	BNQ 2560-040 LC-21-040	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	5,0 mm		90	97	94	98	98	95	96	98	95
	2,50 mm		59	90	68	57	57	89	68	57	89
	1,25 mm		39	80	47	31	31	78	46	31	78
	630 µm		8	65	33	19	19	59	35	19	59
	315 µm		1	39	26	12	12	32	26	12	32
	160 µm		15	14	19	8	8	12	20	8	12
	80 µm		10,4	3,8	14,6	5,9	5,9	4,2	15,7	5,9	5,9

* données fournies par le producteur

3.1.3 Bitume

Pour la confection des corps d'épreuve, deux enrobés bitumineux à chaud, les enrobés EB-14 et ESG-10, et un enrobé bitumineux coulé à froid (ECF) ont été utilisés. Pour les enrobés à chaud deux grades de bitumes ont été utilisés alors qu'une émulsion de bitume a été utilisée pour l'ECF.

Le bitume employé pour la confection de l'enrobé EB-14 a été produit par la compagnie Pétro Canada, un bitume standard de grade PG 58-28 alors que celui utilisé pour la confection de l'enrobé ESG-10, produit par la Compagnie Bitumar, est un bitume modifié de grade PG 70-28. Les deux types de bitume répondent aux exigences de la norme MTQ (Norme 4101 : Liants bitumineux «Bitumes») pour les enrobés bitumineux.

Les principales caractéristiques physiques des deux bitumes utilisés sont présentées dans le Tableau X et les attestations de conformité pour chaque bitume sont disponibles à l'Annexe 5.

Tableau X

Caractéristiques des bitumes PG 58-28 et PG 70-28 et de l'émulsion

Essais Conventionnels	Bitume		Émulsion
	PG 58-28	PG 70-28	cationique
Fournisseurs	Petro Canada	Bitumar	Non identifié
Masse volumique (g/cm ³) à 25 °C	1,025	1,015	Voir fiche technique Annexe 6
Stabilité au stockage (°C)	0,5	0,5	
Viscosité Brookfield à 135 °C (Pa*s)	0,273	0,893	
Viscosité Brookfield à 165 °C (Pa*s)	0,079	0,259	
Température élevée de caractérisation T _e (°C)	58,0-63,9	71,0	
Température basse de caractérisation T _b (°C)	(-33,9) à (-28,0)	-29,7	
Module de rigidité 60 (MPa)	78,0	48,3	
Température de malaxage (°C)	150+/-2	168+/-2	
Température de compactage (°C)	135+/-2	160+/-2	
Concentration solide (%)	n/a	n/a	

3.1.4 Membrane élastomère

Dans le complexe anti-remontée de fissure testé, le système SAMI, une membrane à base de bitume fortement modifié avec un élastomère de type SBS (Styrène Butadiène Styrène), est utilisé à l'interface substrat-resurfaçage. Cette membrane permet notamment de "tamponner" les déformations différentielles entre le substrat fissuré et la couche de resurfaçage : on admet que la membrane « absorbe les contraintes » engendrées par ces mouvements différentiels.

Les caractéristiques du bitume modifié de la membrane sont remarquables par rapport à un simple bitume (Tableau XI): viscosité élevée, intervalle thermique SHRP

(température H-L) remarquable (plus de 120°C), performance en traction – accrue et grande déformabilité avant rupture.

À partir des données présentées au Tableau XI, on peut constater que la viscosité de la membrane est beaucoup plus élevée que celle d'un bitume conventionnel (PG 58-28). Également, il est important de noter que la cohésion élevée de la membrane est telle que si l'on souhaitait enrober des granulats avec un tel produit, la température de chauffage requise pour l'enrobage (viscosité de 170 mPa*s) devrait être supérieure à 200°C!

La température de compaction usuelle d'un resurfaçage est comprise en 130 – 150°C, ce qui a pour effet de réduire la cohésion de la membrane (à 150°C sa viscosité est de 1100mPa*s). Le ramollissement de la membrane mise en contact avec l'enrobé de resurfaçage nuit à l'efficacité de compaction de ce dernier (support déformable), et accroît le risque d'altérer l'épaisseur de la membrane elle-même (migration potentielle du bitume de la membrane dans l'enrobé de resurfaçage). Pour cette raison, un enrobé coulé à froid (ECF) est mis en place entre la membrane et le resurfaçage. Suivant un dosage moyen d'environ 10 kg/m², soit une épaisseur comprise entre 5 et 10 mm.

Tableau XI

Caractéristiques du liant de la membrane élastomère

		Membrane
Pénétrabilité (25°C, 1/10 mm)		89
Température Bille-Anneau (°C)		91
Ip LCPC		+3,1
Ip Pfeiffer		+7,4
Frass (°C)		<-31
Viscosité (mPa.s)	130 °C	3000
	140 °C	1800
	150 °C	1100
	160 °C	740
	170 °C	530
	180 °C	400
	190 °C	310
Traction directe (-10 °C, 100 mm/min)	Contrainte au seuil (MPa)	2,5
	Allongement au seuil (%)	58
	Contrainte à la rupture (MPa)	>3,5
	Allongement à la rupture (%)	>400

La membrane bitumineuse liquide est répandue à chaud directement sur le support fissuré et présente d'excellentes caractéristiques d'élasticité même à très basse température. Selon le manufacturier, l'épaisseur optimale de la membrane est de 3 mm.

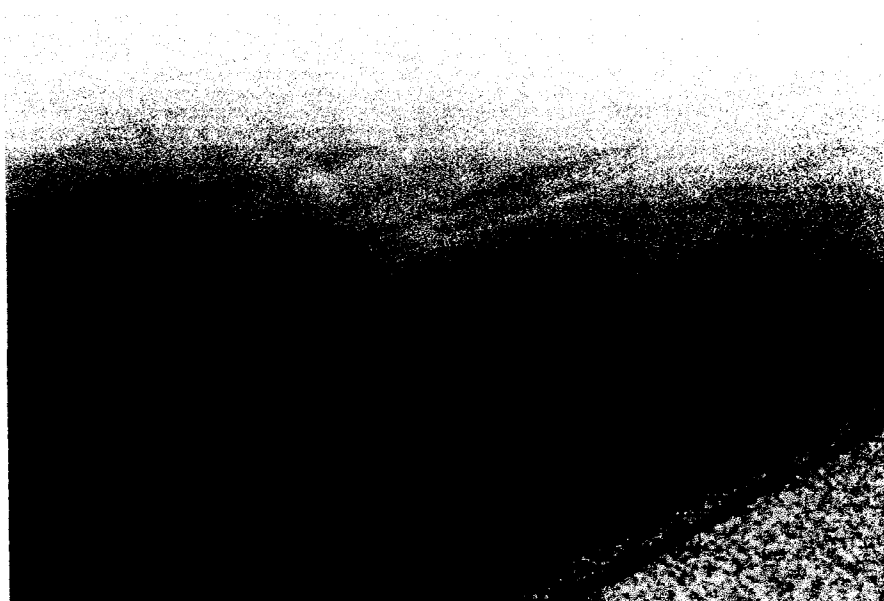


Figure 33 Aspect d'une membrane en bitume caoutchouc après mise en œuvre sur une chaussée

3.1.5 Liant d'accrochage

La mise en œuvre d'un système de resurfaçage suit un procédé bien établi et standard : un liant d'accrochage est appliqué en surface du substrat avant la mise en place de l'enrobé de resurfaçage. Dans cet esprit, cette technique de resurfaçage standard a été défini comme étant le système de resurfaçage de référence et il a été reproduit dans le cadre de nos essais. Les corps d'épreuve représentatifs des systèmes de resurfaçage standards sont donc essentiellement constitués de trois couches : 1) le substrat (EB-14); 2) le liant d'accrochage, et 3) le resurfaçage (ESG-10). Nous trouverons le détail de la fabrication des corps d'épreuve dans le chapitre 4.

Le liant d'accrochage utilisé en laboratoire est une émulsion de bitume stabilisée par la présence de produits émulsifiants cationiques. L'émulsion d'accrochage utilisée est le Supercol de la compagnie SINTRA.

Les émulsions de bitume polymère utilisées comme liant d'accrochage, doivent être conformes aux exigences de la norme 4105, Liants Bitumineux « Émulsion de bitume » (Tableau XII). Dans le collage de deux couches, le dosage recommandé pour assurer un bon collage est défini à la section 13.2.4 de la Norme CCDG 2003 « Revêtement de chaussée en enrobé ». Le détail concernant le dosage utilisé pour le liant d'accrochage, est décrit dans les Annexes 8.

Tableau XII

Caractéristiques du liant (source : Sintra Inc.)

Essais	Norme LC 4105	Supercol 60
Teneur en eau (%)	< 45	34
Résidu (%)	> 55	63,8
Pénétration 25°C, 100 g, 5 sec (dmm)	25 – 250	66
Viscosité SFs 50°C	30 – 150	94,2

3.2 Formulation des enrobés utilisés

Les corps d'épreuve ont été confectionnés à partir d'enrobés produits en usine d'enrobage de manière à s'assurer d'avoir une masse importante d'enrobé homogène, dont les caractéristiques sont représentatives des enrobés mis en œuvre sur route. Le protocole établi pour la confection des corps d'épreuve nécessite des masses importantes d'enrobés (chapitre 4). De manière à faciliter la manipulation en laboratoire, nous avons donc opté pour un échantillonnage de masse en usine des enrobés ciblés pour cette étude (EB-14 et ESG-10) par prélèvement en petites boîtes (~10 kg).

Dans ce contexte une question fondamentale se pose : pourrions-nous être certains quel'enrobé de chacune des boîtes est homogène et représentatif par rapport à la formulation visée? Des points d'analyse présentés à la section 3.3.1 apportent des éléments de réflexion sur ce point.

L'échantillonnage a été réalisé manuellement en usine d'enrobage. Une pelle mécanique apportait l'enrobé de la fournée vers le site d'échantillonnage, lequel était situé à moins de 50 mètres de la centrale d'enrobage. La procédure consistait à prélever à la pelle l'enrobé disposé au sol sur une surface non absorbante constituée de contreplaqués avec résine.

Cet échantillonnage de masse a été effectué sur le plan d'enrobage à *Wickham* pour l'enrobé EB-14, alors que celui de l'enrobé ESG-10 a été réalisé à l'usine de *St-Patrick* à Montréal.

La Figure 34 illustre la prise d'échantillons à partir de l'échantillonneur développé au LUCREB. Les deux enrobés ont été échantillonnés suivant la même procédure ($\pm 1\,500$ kg) et ce, à partir d'une seule et même gâchée complète réalisée en usine d'enrobage ($\pm 3\,700$ kg).

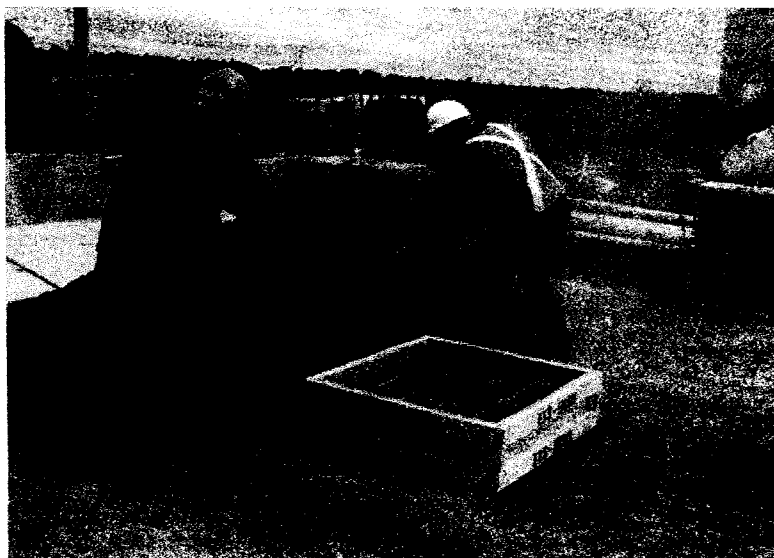


Figure 34 Prise d'échantillons à l'usine d'enrobage

Les dosages des différents enrobés prélevés en usine d'enrobage (EB-14 et ESG-10) utilisés dans le cadre de cette étude, sont donnés au Tableau XIII.

Par ailleurs, deux autres enrobés, confectionnés cette fois en laboratoire, ont été utilisés dans la fabrication des corps d'épreuve, soit les enrobés CH-10 et ECF. Les dosages respectifs de ces enrobés sont également présentés au Tableau XIII.

Rappelons que la provenance et les caractéristiques spécifiques des granulats utilisés pour la confection de chacun de ces enrobés ont été présentées à la section § 3.1.1 et la synthèse en est donnée aux Tableaux VIII et IX.

Tableau XIII
Formulation des enrobés

Type d'enrobé		Prélèvement en usine d'enrobage		Fabrication en laboratoire		Prélèvement In Situ sur chantier par sciage
		EB-14	ESG-10	CH-10	ECF	EB-10S
Type de fibre		n/a	n/a	n/a	organique	n/a
Type de bitume (PG)		58-28	70-28	70-34		58-34
Dosage massique (%)	Sable naturel	29,0	-	35,0	n/a	n/d
	0-5 (St.Philippe)	-	20,0	15,0	n/a	n/d
	0-5 (St.Bruno)	29,0	37,0	35,0		n/d
	5-10	30,0	43,0	15,0		n/d
	10-14	12,0	-	-	n/a	n/d
	Passant 80 μ (%)	4,5	6,3	0	(1)	4,3
	Fibre (%)	0,0	0,0	0	n/d	0,0
	b (%)	4,8	5,1	6,0	n/d	4,85
	Vi (%)	3,4	4,3	3,5	n/d	3,2
	V _{be} (%)	10,7	12,3	12,1	n/d	8,40
	V _{ba} (%)	0.41	0,22	n/a	n/d	-
	D _{mb}	2,397	2,451	2,432	n/d	2,452
	D _{mm}	2,481	2,562	2,521	n/d	2,534
	VAM	13,8	16,1	15,6	n/d	
Tamisat (%)	14 mm	99	100	100	100	100
	10 mm	86	95	99	96	96
	5 mm	57	59	83	62	62
	2,5 mm	44	40	58	45	47
	1,25 mm	35	26	40	-	35
	630 μ m	28	18	29	34	25
	315 μ m	18	12	19	-	14
	160 μ m	9	8	11	-	5
	80 μ m	4,5	6,3	7,8	7	4,3

3.3 Descriptions des différents enrobés utilisés dans le cadre de ce projet

De manière à bien cerner le rôle attendu de chacun des différents types d'enrobés utilisés ici pour la confection des corps d'épreuves, il est proposé dans un premier temps, de donner des indications relatives à ces enrobés et, dans un deuxième temps, de préciser quelques caractéristiques rhéologiques qui les caractérisent.

3.3.1 L'enrobé ESG-10 - vérification de l'homogénéité du lot prélevé en usine

L'enrobé ESG-10 est utilisé dans le cadre de ce projet comme enrobé de resurfaçage dans la fabrication des corps d'épreuve. En conséquence, nous nous sommes intéressés à connaître l'homogénéité du lot échantillonné afin d'estimer le risque de variabilité dans les résultats des essais de remontée des fissures.

Pour vérifier l'homogénéité des échantillons du prélèvement de masse en usine, un certain nombre de boîtes a été analysé de façon détaillée. Dix (10) boîtes sélectionnées de manière aléatoire du lot des 125 boîtes échantillonnées à l'usine d'enrobage, ont été analysées en laboratoire comme suit:

- Mesure de la teneur en bitume à l'aide du four ignition;
- Mesure de la granulométrie de l'échantillon séché au four à ignition;
Norme LC 21-040 *Analyse Granulométrique*
- Mesure de l'aptitude au compactage à l'aide de la PCG
Norme LC 26-003 *Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire.*

3.3.1.1 Procédure d'essais :

La masse d'enrobé dans chacune des boîtes est d'environ 10 kg. Cette masse d'enrobé chauffée fut séparée dans un premier temps en deux parties à l'aide d'un séparateur mécanique pour obtenir la masse nécessaire à l'essai PCG. La deuxième portion fut, à

nouveau séparée mécaniquement de manière à obtenir deux échantillons de masse d'environ 1,00 kg pour l'essai au four à ignition.

Variation de la teneur en bitume

Afin d'assurer une présentation juste des résultats des essais au four ignition et ce, de manière à cerner avec justesse la masse de bitume dans chacun des échantillons, des essais complémentaires sur des enrobés d'un combiné granulaire bien défini furent préalablement analysés au four à ignition. Les résultats des essais ont montré l'existence d'une perte de masse engendrée par le four à ignition lors de la combustion à 540°C causée à la fois par ignition du bitume, mais également due à une perte de masse associée aux granulats. Un facteur de correction global comprenant la perte de masse associée aux granulats et la perte de masse associée au bitume, a donc été introduit. L'Annexe 6 résume les différents calculs effectués à ce niveau.

En prenant en considération le facteur de correction énoncé précédemment, établi par des essais au four à ignition, la teneur en bitume obtenue sur le lot testé, varie entre 4,76 et 5,06% pour une valeur moyenne de 4,85 et un écart type de 0,10. La valeur moyenne est inférieure de 0,25% à la valeur visée dans la formulation de départ (5,1%) (Tableau XIII). Suivant les règles de la statistique (loi de Student), nous pouvons estimer à partir du résultat de cet échantillon constitué de 10 valeurs et la moyenne de la population correspondante à l'ensemble de l'échantillonnage de masse est comprise entre 4,77% et 5,06%. La Figure 35 illustre la variation observée dans la teneur en bitume pour les dix échantillons du lot prélevé à l'usine.

En définitive, en dépit du fait que la valeur moyenne de la teneur en bitume de la gâchée produite pour l'échantillonnage de masse soit plus grande (4,85%) que la valeur cible (5,1%), il n'en demeure pas moins que la plage de variation au sein du lot de masse est tout à fait acceptable (variation relative inférieure à 1,5%).

De cette analyse nous pouvons noter que les quantités réelles insérées dans les bennes de malaxage, diffèrent des quantités prescrites initialement.

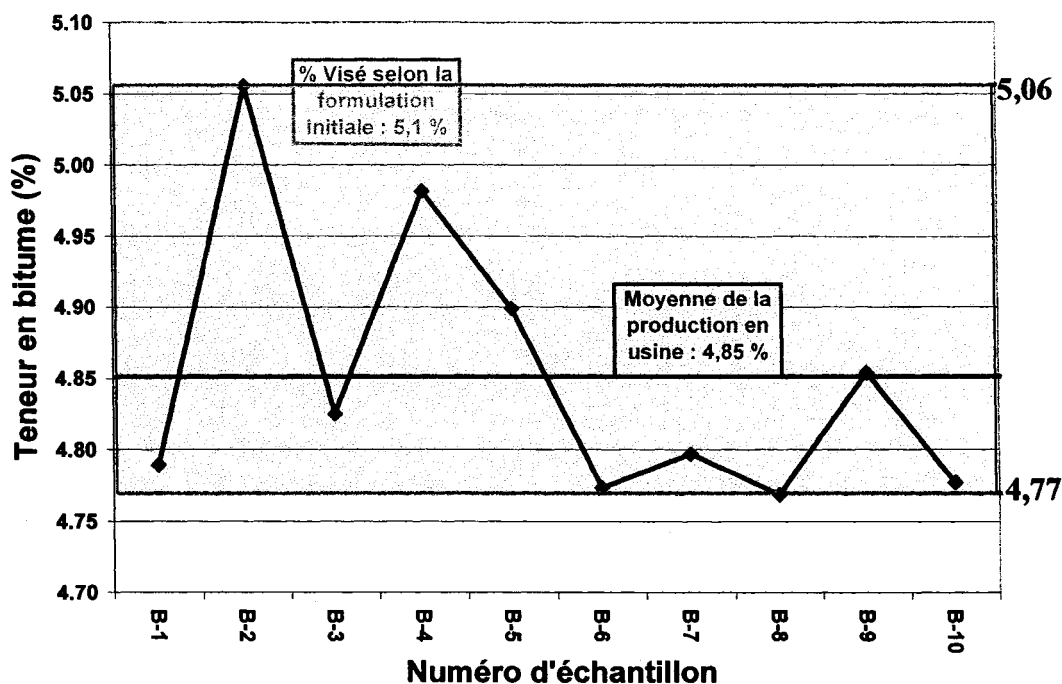


Figure 35 Variation de la teneur en bitume des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse

Variation de la teneur en pierre (fraction > 5 mm)

La teneur en pierre obtenue lors de l'analyse du lot servant à évaluer l'homogénéité de l'échantillonnage de masse en usine montre une variation comprise entre 38,2% et 44,7% dont la valeur moyenne se situe à 42,8% comparativement à 40% pour la valeur cible. Quant à l'homogénéité de l'ensemble du lot de masse (la population), la moyenne de la population de la teneur en pierre est comprise entre 38,2% et 44,7%. La Figure 36 montre la variation observée sur l'ensemble de cet échantillon.

Quant à l'homogénéité de l'ensemble du lot de masse (la population), la teneur en pierre est comprise entre 38,2% et 44,7% (variation relative inférieure à 3,4%).

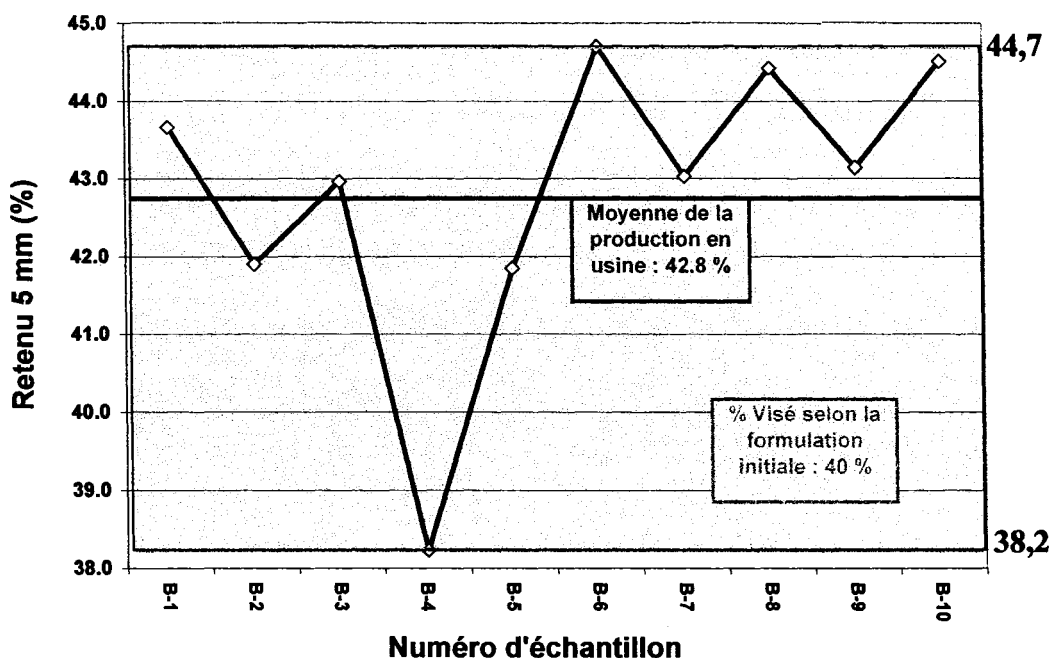


Figure 36 Variation de la teneur en pierre (fraction > 5 mm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse de l'enrobé ESG-10

Variation de la teneur en particules fines (< 80 μ m)

La Figure 37 montre très bien la variation de la teneur en particules fines mesurée sur le lot échantillonné. La valeur moyenne du lot est de 0,5% supérieure à la valeur cible (6,3% - Tableau XIII). Quant à l'homogénéité de l'ensemble du lot de masse (la population), la teneur en particules fines moyennes de la population est comprise entre 6,6 et 7,2% pour une variation relative inférieure à 1,8%.

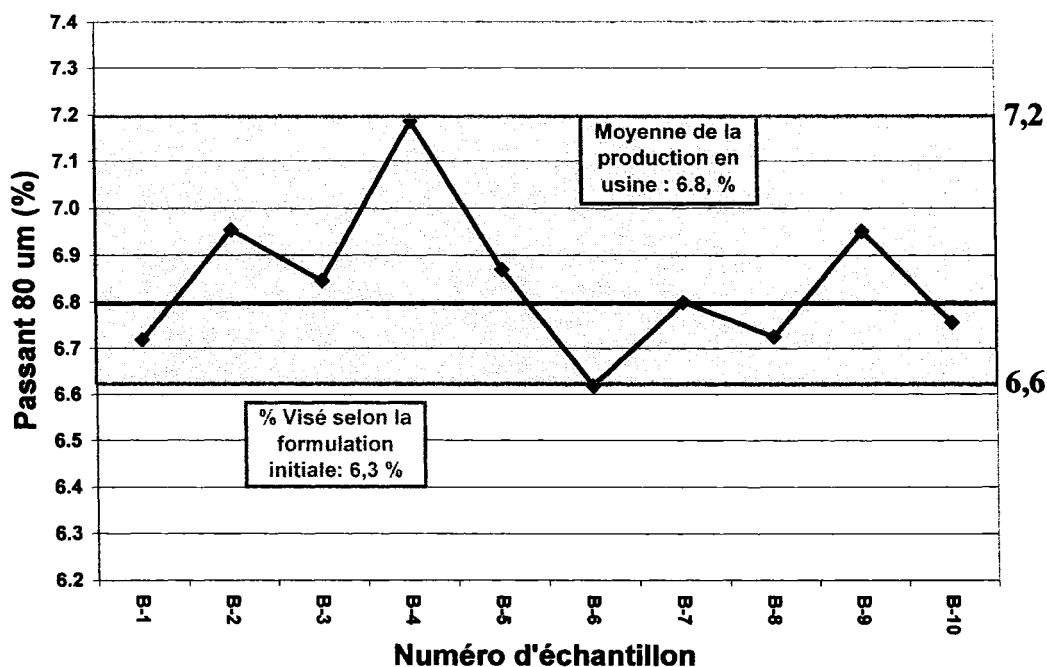


Figure 37 Variation de la teneur en particules fines (fraction passant le tamis de 80 µm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse de l'enrobé ESG-10

Variation des résultats relatifs à l'aptitude au compactage mesurée à l'aide de la PCG

La dernière analyse sur les lots échantillonnés à l'usine est l'aptitude au compactage à l'aide de la PCG. La Figure 38 illustre la variation de la teneur en vides à 80 girations établie sur les 10 boîtes analysées. La variation de la teneur en vides des boîtes testées comprise entre 4,3% et 5,9%, est faible et témoigne d'une bonne homogénéité de l'échantillonnage.

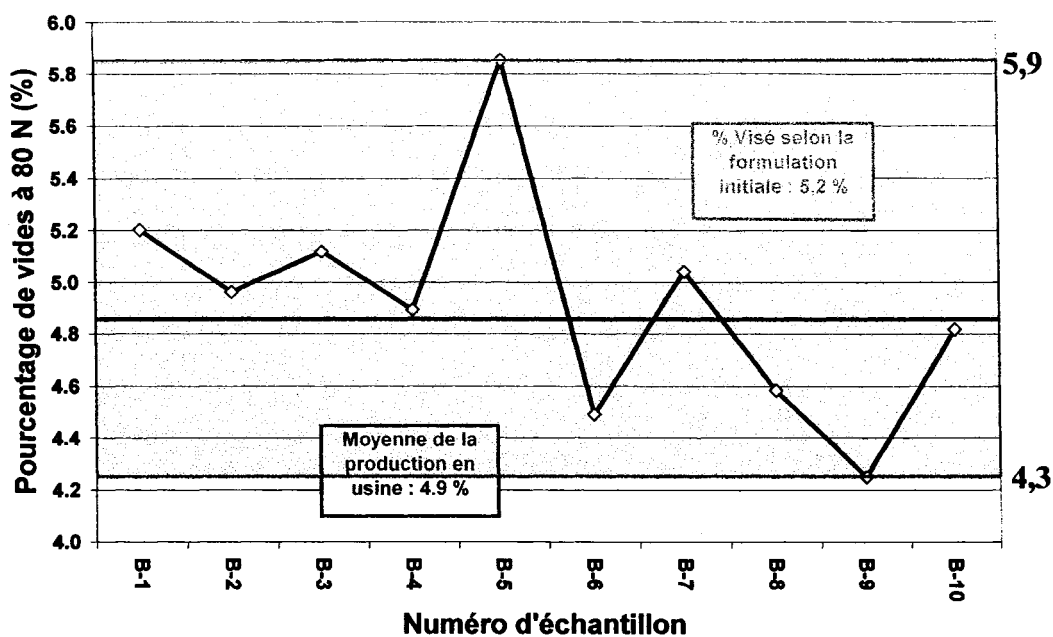


Figure 38 Variation du pourcentage de vides à 80 girations à l'essai à la PCG en fonction du lot échantillonné en masse à l'usine pour l'enrobé ESG-10

4.3.1.2 Tableau récapitulatif des variations mesurées des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse

Le Tableau XIV résume les différentes variations observées sur l'échantillon des 10 boîtes sélectionnées afin de vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse de l'enrobé ESG-10.

Tableau XIV

Variations mesurées pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de chantier

		Bitume	Pierre (> 5mm)	Filler (< 80µm)	PCG (vides à N _{design} : 80 girations)
Lots	Moyenne	4,85%	42,8%	6,8%	4,9%
	Écart-type (s)	0,10%	1,91%	0,16%	0,44%
	Nombre d'échantillons	10	10	10	10
Population Intervalle de confiance : 95%	$\bar{X}$ min ⁽¹⁾	4,78%	41,40%	6,72%	4,59%
	$\bar{X}$ max ⁽¹⁾	4,93%	44,28%	6,96%	5,26%
	Taux de variation relative ⁽²⁾	1,53%	3,36%	1,77%	6,78%

(1) $\bar{X} = \text{moyenne} \pm a * s$ avec $a = 0,754$ pour $n = 10$, conforme à la loi de Student

(2) $[(\frac{\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}}{2}) / \text{moyenne}] * 100 \%$

3.3.2 L'enrobé EB-14

L'enrobé EB-14, est l'un des enrobés le plus souvent rencontré dans les chaussées souples au Québec. Il a été utilisé comme substrat dans notre étude des différents systèmes anti-remontée de fissures. Après la préparation de deux plaquettes d'enrobé EB-14 (Annexe 8), nous avons mesuré la rugosité de surface à l'aide du pendule de frottement sur la surface (Annexe 7).

3.3.3 L'enrobé EB-10S utilisé comme substrat

Une partie du programme d'essai vise à mettre en relief l'importance du substrat. En général, les corps d'épreuve sont fabriqués à partir de l'enrobé EB-14, lequel n'ayant jamais été exposé aux intempéries, aucun vieillissement. Afin de cerner l'importance du vieillissement sur les résultats des essais réalisés à partir du montage développé au LUCREB, une série d'essai a été effectuée à partir d'un substrat prélevé en chantier, l'enrobé EB-10S.

Des essais conduits sur cet enrobé prélevé sur des chaussées âgées de 6 à 8 ans sont indiqués dans le Tableau XV et dont la composition est reportée au Tableau XIII.

Tableau XV

Caractéristiques mécaniques de l'enrobé EB-10S (PG 70-34)

Coefficient de dilatation thermique ($\mu\text{def}/^{\circ}\text{C}$)					TSRST		
à 5°C	à -5°C	à -15°C	à -25°C	à -34°C	T rupture ($^{\circ}\text{C}$)	σ rupture (MPa)	Pente
31	27	23	18	13	$-30^{(1)}$	4,0	0,24

⁽¹⁾Essai à $5^{\circ}\text{C}/\text{hre}$: $\phi 40 \times 250 \text{mm}$

3.3.4 La Chape CH-10

L'enrobé de type CH-10 joue un rôle de «chape d'étanchéité» entre la couche de base et la couche de resurfaçage.

L'enrobé a été préparé en laboratoire à partir des matériaux présentés dans les Tableaux VIII et IX. Le bitume utilisé pour la fabrication de la chape d'étanchéité est un bitume de classe de performance PG 70-34.

3.3.5 ECF (Enrobé coulé à froid)

Pour lutter contre la remontée des fissures dans l'enrobé de resurfaçage une de technique qui a fait ses preuves aux États-Unis sur les chaussées fissurées est la technique SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*). Cette technique consiste à répandre une membrane très déformable sur le substrat avant l'application de l'enrobé de resurfaçage. La membrane est constituée d'un liant modifié à forte teneur en élastomère (généralement des SBS) ou d'un bitume caoutchouc.

L'ECF est un enrobé ultra mince (7 à 15 mm d'épaisseur) à granulométrie discontinue (0/5mm– 0/10mm) à base de bitume modifié et de granulats concassés de haute performance et confectionné à partir de fibres souples synthétiques (voir Fiche technique Annexe 9).

3.4 Quelques caractéristiques rhéologiques des enrobés utilisés dans le cadre de ce projet

Les principales caractéristiques suivantes des différents matériaux bitumineux utilisés dans le cadre de nos essais, de manière à permettre une analyse et une interprétation rigoureuse:

- 1) le module complexe
- 2) la performance à la base température (TSRST),
- 3) le coefficient de dilatation thermique.

Dans un premier temps, nous donnerons quelques informations sommaires, relatives à l'essai et dans un deuxième temps les résultats obtenus seront présentés.

3.4.1 Fabrication et dimensionnement des éprouvettes

L'ensemble de ces mesures est effectué sur des éprouvettes compactées en laboratoire à partir des différents enrobés présentés précédemment.

De manière à s'assurer d'obtenir des éprouvettes représentatives du chantier, la compaction a été assurée à partir du compacteur de plaques LCPC du laboratoire LUCREB à l'ÉTS. Les plaques obtenues ont une forme prismatique (400 x 600 x 125 mm). Les carottes, à raison de onze par plaque, ont été prélevées dans la direction normale aux plans de sciage, parallèlement à la surface compactée. La planéité et le parallélisme des surfaces planes sont assurés à l'aide d'une surfaceuse rotative au carbure. La procédure de carottage est schématisée à la Figure 39. Les éprouvettes sont ensuite entreposées à température et humidité contrôlées ($T = 20^{\circ}\text{C}$ et $\text{H.R.} = 50\%$) sur un lit de sable, suivant leur axe de révolution, de manière à éviter leur gauchissement en cours d'entreposage.

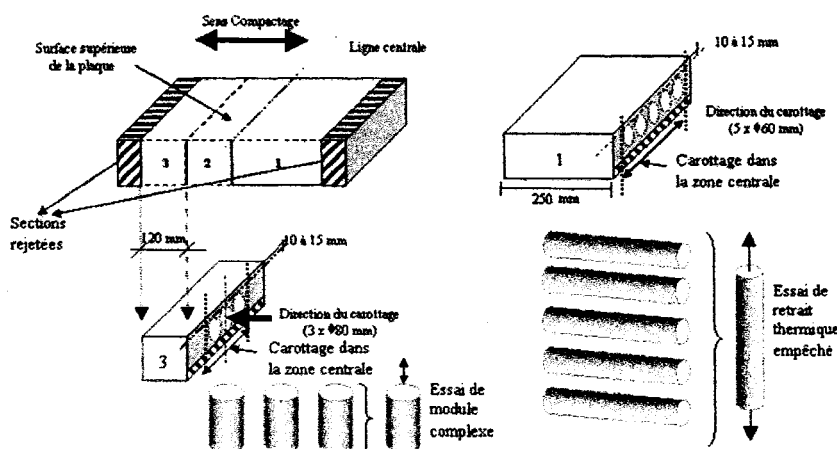


Figure 39 Schématisation du plan de carottage des plaques d'enrobés pour les essais de TSRST, de coefficient de dilatation thermique et de module complexe

Le Tableau XVI présente la liste des essais réalisés sur l'ensemble des enrobés pour évaluer leurs performances.

Tableau XVI

Liste des principaux essais réalisés

Essai	Norme / méthodologie	Taille des éprouvettes			Conditions de l'essai
		Ø ou e (mm)	L (mm)	l (mm)	
Module complexe (E*)	DGCB ENTPE Lyon	80	120	n/a	• Chargement cyclique sinusoïdal • Traction/compression alternée ($\sigma_{MOYEN} = 0$) • Mode : déformation imposée de 50 μdef • t_{STABILISATION} : 4 hres • T° D'ESSAIS (°C) : 35; 20; 10; 0; -10; -25; -35 • Fréquences (Hz) : 20; 10; 3; 1; 0,3; 0,1; 0,03; 0,01 • Extensomètres (3) • longueur : 100 mm • angle d'espacement : 120°
Retrait thermique empêché (TSRST)	ASSHTO TP 10-93	60	250	n/a	• T° DÉPART : 5°C • Conditionnement de 6 heures avec force = 0 • Taux de refroidissement : 10°C/hre • Extensomètres (3) • longueur : 165 mm • angle d'espacement : 120°
Coefficient de dilation thermique	LUCREB	80	120	n/a	• T° DÉPART : 20°C; stabilisation : 2 heures • Taux de refroidissement : 2°C/hre • Matériau de référence : silicate de titane • T° DE MESURE (°C) : 20; 10; 0; -10; -20; -30; -40 • Conditionnement : 2 hres / plateau

3.4.2 Essais de module complexe

La mesure du module complexe d'un enrobé demande un contrôle et une mesure précise de la déformation de l'éprouvette en cours d'essai afin de pouvoir imposer une déformation sinusoïdale tout au long de l'essai. L'utilisation d'une presse mécanique, asservie en temps réel et capable d'imposer une force adéquate permettant la déformation nécessaire, est essentielle. Une enceinte thermique, un système d'acquisition de données ainsi que des extensomètres capteurs de déplacement sont également nécessaires. Pour assurer un bon contrôle de l'essai, on utilise trois extensomètres, (longueur totale de 50 mm) dispersés uniformément suivant l'axe

longitudinal de l'éprouvette (angle d'espacement de 120° tout au tour de l'éprouvette). La mesure du module complexe est un essai non destructif.

La Figure 40a présente les résultats expérimentaux de la mesure des modules complexes dans le plan Cole-Cole, alors que la Figure 40b présente les courbes correspondantes obtenues du modèle de Huet-Sayegh

Le Tableau XVII présent les valeurs des paramètres du modèle Huet-Sayegh établis pour les enrobés EB-14, ESG-10 et CH-10.

Tableau XVII

Valeurs des paramètres du modèle de Huet-Sayegh pour les enrobés étudiés

Paramètres	Unités	ESG-10	EB-14	CH-10
Type de Bitume		PG 70-28	PG 58-28	PG 70-34
E_α	(MPa)	38700	40000	33500
E_0	(MPa)	5	120	70
δ	n/a	2,857	3,380	3,880
'k'	n/a	0,144	0,195	0,215
'h'	n/a	0,347	0,555	0,586
$\tau = e^{(a+b*T+c*T^2)}$	a	0,692	2,0220	-0,1322
	b	-0,404	-0,3987	0,3773
	c	0,004	0,0032	0,0024

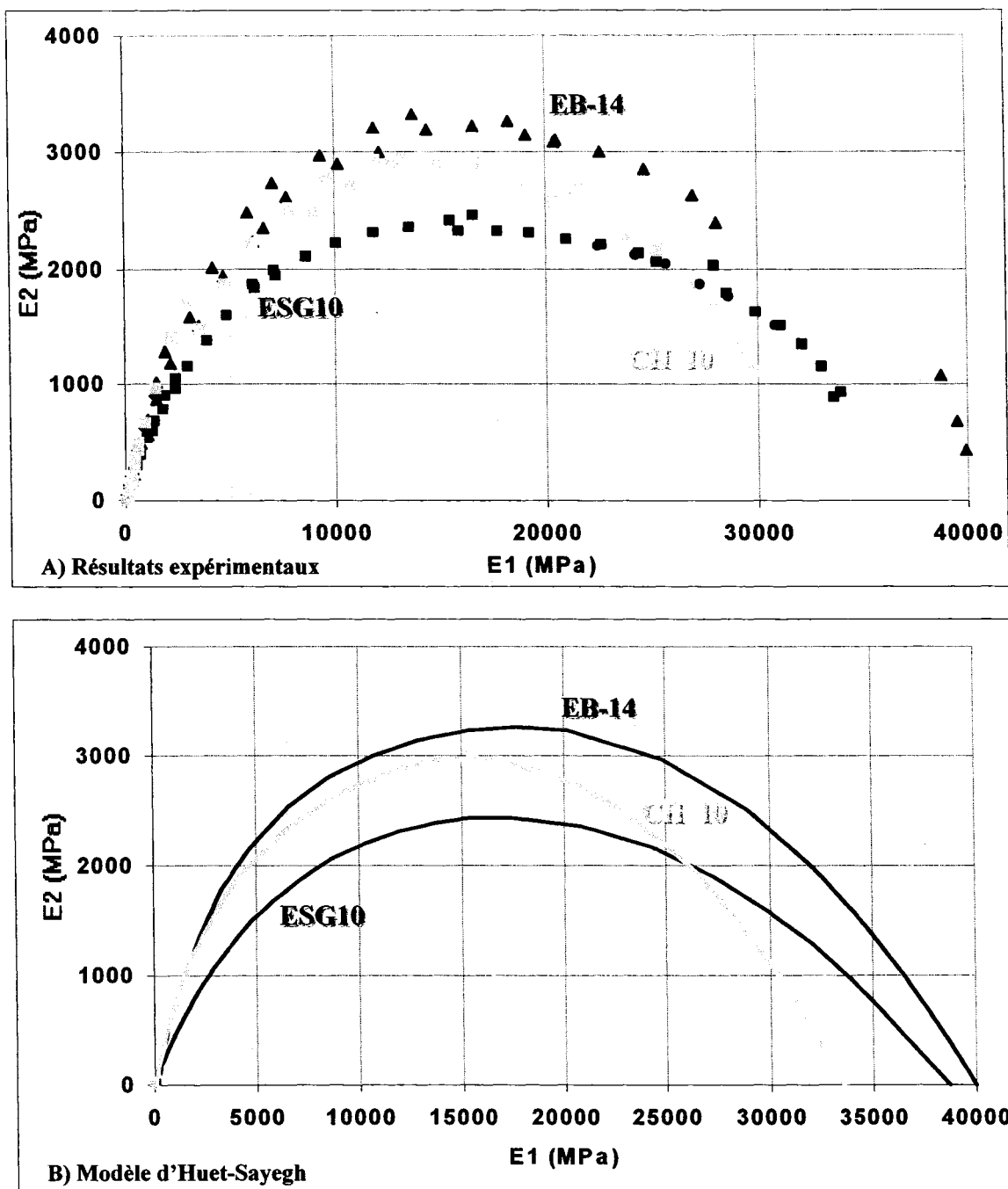


Figure 40 Représentation dans le plan Cole-Cole des résultats expérimentaux obtenus pour les 3 enrobés étudiés et des courbes obtenues de l'application du modèle d'Huet-sayegh ($\varnothing$ 80 mm X 120 mm; traction/compression alternée ($\epsilon_{\text{MOYEN}}=0$))

3.4.3 Essais à basse température TSRST

Le fondement de l'essai de retrait thermique empêché consiste à empêcher la déformation d'une éprouvette d'enrobé bitumineux de Φ 60 mm et de 250 mm de longueur sous l'effet d'un taux de refroidissement constant (10 °C/hr). L'essai a été réalisé suivant la norme AASHTO TP10-93 « Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength ».

L'essai TSRST a été effectué sur l'enrobé ESG-10, EB-14 et CH-10. la moyenne de trois essais et présentée dans le Tableau XVIII et les courbes présentant l'évolution de la contrainte au sein de l'éprouvette en cours de refroidissement est illustrée à la Figure 41.

Tableau XVIII

Données recueillies lors de l'essai TSRST

	T° de transition tangente	T° de transition bissectrice	Contrainte maximale de rupture	T° associée à la contrainte maximale	PG-bitume
	(°C)	(°C)	MPa	(°C)	
ESG-10	-15,52	-9,87	3,42	-27,36	70-28
EB-14	-26,94	-17,76	6,45	-37,05	58-28
CH-10	-28,59	-20,83	5,39	-34,57	70-34

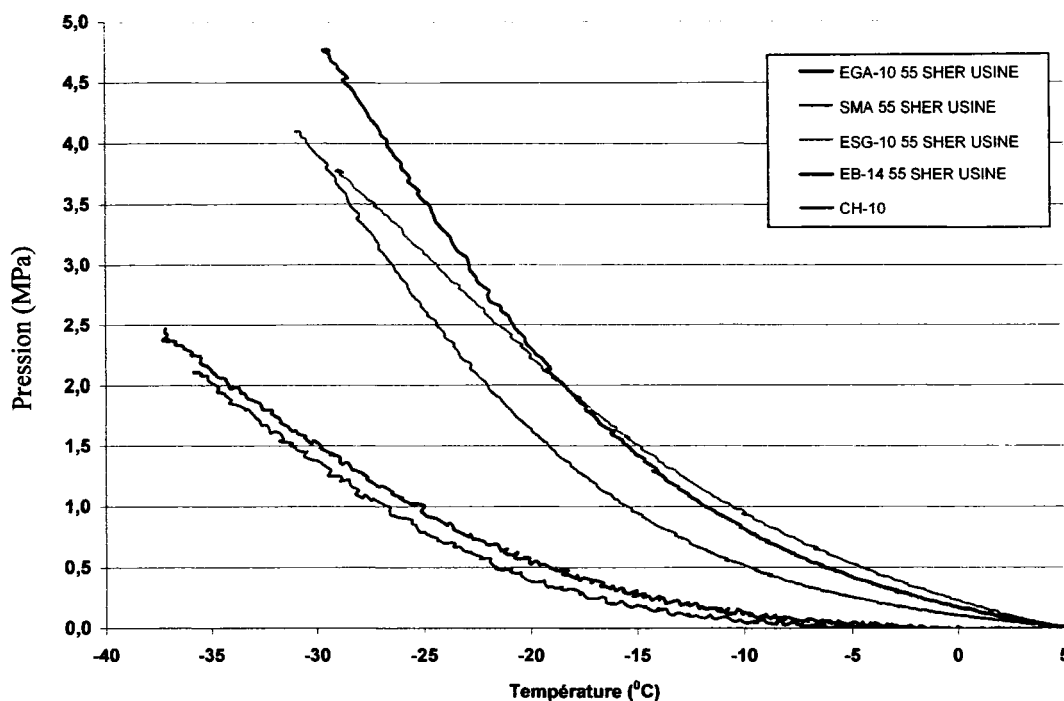


Figure 41 Résultats de l'essai TSRST

3.4.4 Mesure du coefficient de dilatation thermique

L'essai pour mesurer le coefficient de dilatation thermique est réalisé suite à un conditionnement d'une éprouvette Φ 80 mm et de 120 mm de longueur sur une période de 2 heures à 20 °C. Durant cette période de conditionnement, la force appliquée à l'éprouvette est maintenue à 0. Par la suite, la température est abaissée de 2 °C / heure et dilatation du matériau est étudiée à l'aide de jauges collées sur chaque éprouvette et d'une éprouvette témoin de silicate de titane. Le silicate de titane a la propriété de posséder un coefficient de dilatation thermique pratiquement nul (0,03 microdef/°C).

La déformation réelle d'une éprouvette est obtenue, en soustrayant de la valeur obtenue des jauges collées sur l'éprouvette (Figure 42), la valeur obtenue par la jauge de référence du silicate de titane.

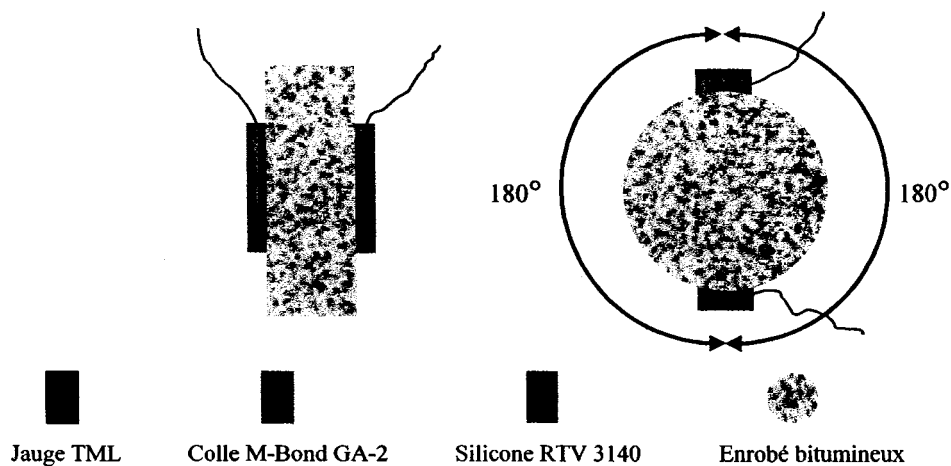


Figure 42 Schématisation des éprouvettes pour l'essai de coefficient de dilatation thermique

Les plateaux de température étudiés sont à +20, +10, 0, -10, -20, -30 et -40 °C. Entre chaque plateau, la température est abaissée suivant un taux de refroidissement de 2 °C / heure et maintenue à ce plateau pour une période de 2 heures. La Figure 43 illustre la variation typique de température à laquelle une éprouvette est soumise. L'acquisition débute après la période de conditionnement de 2 heures. L'essai se termine par une remontée de la température à 20 °C avec un taux de réchauffement de 10 °C / heure.

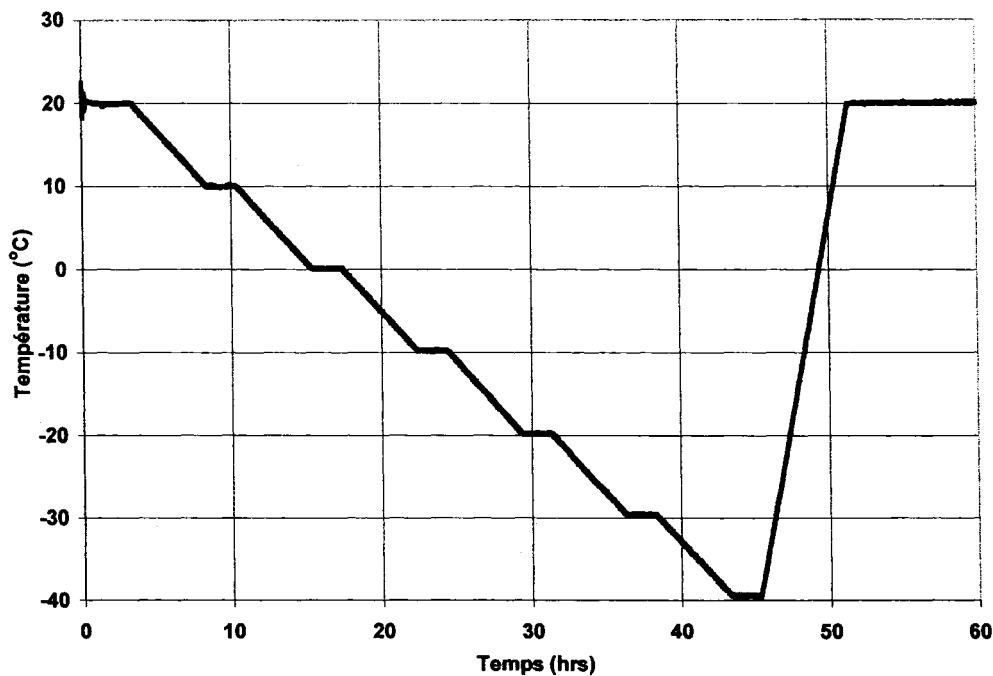


Figure 43 Variations typiques des températures pour laquelle une éprouvette est soumise durant l'essai visant à mesurer le coefficient de dilatation thermique

Les résultats obtenus pour l'essai de coefficient de dilatation thermique sont illustrés dans le Tableau XIX et à la Figure 44.

Tableau XIX

Résultats des coefficients de dilatation thermique en fonction de la température

Enrobé	Bitume	Coefficients de dilatation thermique (μ strain)			
		à -5°C	à -15°C	à -25°C	à -35°C
EB-10S	PG 58-34	20,38	18,85	17,00	4,38
EB-14	PG 58-28	24,98	22,47	20,81	16,99
CH-10	PG 70-34	24,96	23,75	23,27	9,00
ESG-10	PG 70-28	22,96	20,68	19,24	15,82

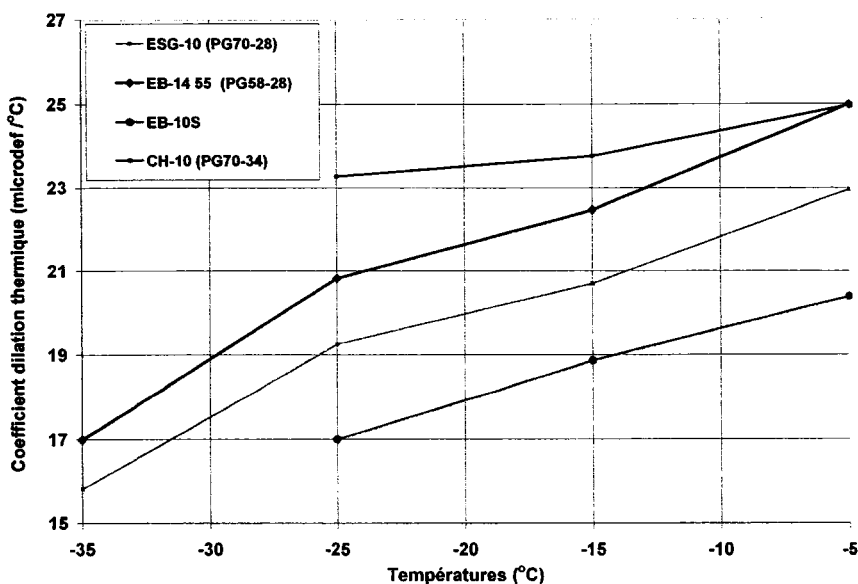


Figure 44 Résultats des coefficients de dilation thermique

3.5 Confection des corps d'épreuve

Les corps d'épreuve sont mis en œuvre suivant plusieurs séquences. La fabrication est assurée à partir du compacteur de plaques MLPC. Les photographies présentées à la Figure 58 illustrent le corps d'épreuve en cours et après préparation.

Globalement, la confection du corps d'épreuve vise à reproduire en laboratoire, en conditions contrôlées, la couche de base fissurée (le substrat), laquelle est constituée de 2 plaques d'enrobé EB-14 disposées sur deux plaquettes d'acier suivant un espacement de 5mm pré-établi, représentant la largeur de la fissure du substrat. Étant donné que les plaques de base en enrobé EB-14 sont compactées en laboratoire, l'épaisseur de ces plaques a été fixée à l'épaisseur minimale de mise en œuvre de l'enrobé EB-14 sur route, soit une épaisseur de 55 mm. Pour assurer une adhérence comparable aux surfaces usées en chantier, la surface de EB-14 est nettoyée au jet de sable et recouverte d'un agent de liaison suivant le dosage requis par le CCDG du MTQ (taux résiduel de 0,25 kg/m²). L'enrobé de resurfaçage est compacté normalement sur le substrat à l'aide du

compacteur de plaque MLPC. Après compactage de la couche de resurfaçage, la dimension de l'éprouvette est celle correspondante à une plaque d'ornièreur : 180x500 mm² et dont l'épaisseur sera différente suivant le plan d'expérience mis en œuvre (resurfaçage de 55mm et/ou 100mm).

En définitive, la confection d'un corps d'épreuve nécessite différentes séquences, lesquelles sont détaillées dans l'Annexe 8.

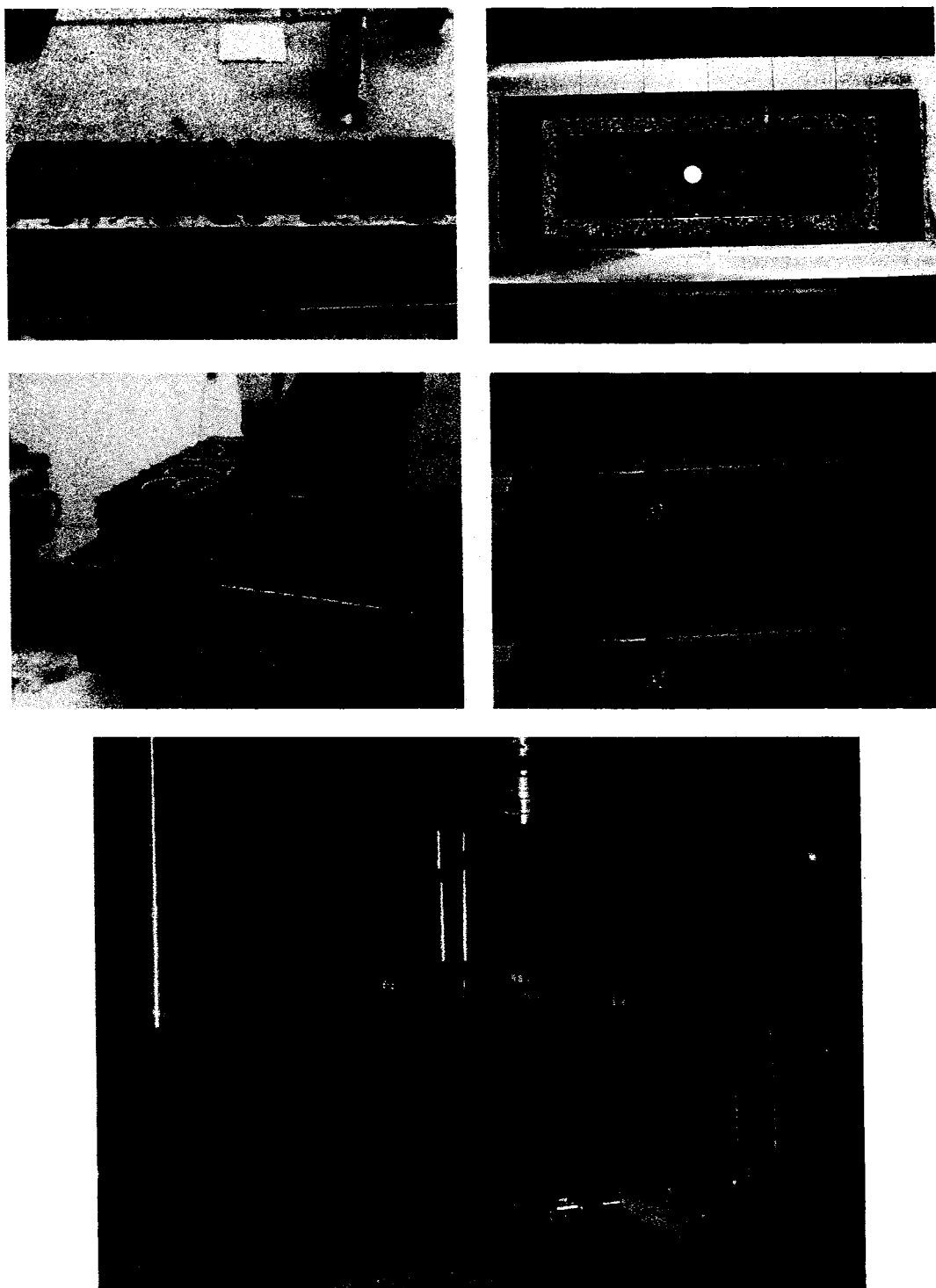


Figure 45 Corps d'épreuve en cours et après préparation

3.5.1 Rugosité de surface des substrats

La qualité d'adhérence du resurfaçage du substrat est directement tributaire de la propreté et de la rugosité de la surface du substrat : la présence d'huile ou d'éléments gras nuit à l'adhérence du liant d'accrochage au substrat et par conséquent, l'arrachement du resurfaçage est probant.

La confection de plaquettes d'enrobé à l'aide d'un compacteur de plaque va permettre d'obtenir une texture superficielle comparable entre les éléments pour obtenir une comparaison juste des différents systèmes de resurfaçage. À cet effet, étant donné qu'il est usuel d'appliquer des agents anti-adhérent sur le pneumatique du compacteur de plaques, ce dernier va nuire à l'adhérence de l'agent d'accrochage au substrat. Dans ce contexte, la procédure établie pour la préparation des plaquettes de « substrat » prévoit un nettoyage au jet de sable de la surface d'interface substrat-resurfaçage. Cependant, cette intervention peut conduire à des rugosités variables de la texture superficielle des plaquettes de substrat. Pour s'assurer de l'homogénéité de la rugosité superficielle des plaquettes de bases fissurées, des mesures de la rugosité de surface ont été faites à l'aide d'un pendule de frottement.

L'essai est utilisé pour déterminer la résistance d'une surface au dérapage. Le principe est de fournir une mesure relative caractérisant l'état limite de polissage des granulats sous le trafic routier (la résistance au polissage d'un matériau est quantifiée par son coefficient de polissage par projection, appelé aussi sa valeur CPP).

Le procédé est simple et il est présenté dans l'Annexe 7.

Le résultat de l'essai est la moyenne, arrondie au centième près, des valeurs CPP des éprouvettes de l'échantillon. Le tableau XX montre un résultat type de ces mesures.

Tableau XX

Relevé des mesures de rugosité

Lâcher Point	1	2	3	4	5	Moyenne	Moyenne générale des lectures
1	79	75	74	73	73	74,8	
2	77	75	73	73	72	74	
3	69	66	65	64	63	65,4	
4	94	91	89	87	87	89,6	76

Températures :

Eau : 22°C

Air : 24°C

La valeur CPP = 1,3

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Dans un premier temps, une brève description des différents modes de rupture observés lors des essais en laboratoire sera présentée et, dans un second temps, l'ensemble des résultats sera exposé.

4.1 Mode de rupture et durée de vie

Avant de présenter l'ensemble des résultats obtenus pour chacune des phases, il convient de définir à priori les critères qui ont été retenus pour classer les modes de rupture et pour déterminer la durée de vie de l'éprouvette.

Dans l'ensemble, trois différents modes de rupture ont été observés sur les corps d'épreuve à la suite des essais de remontée des fissures. Pour faciliter la présentation des résultats, une charte synthèse est proposée et présentée à la Figure 46.

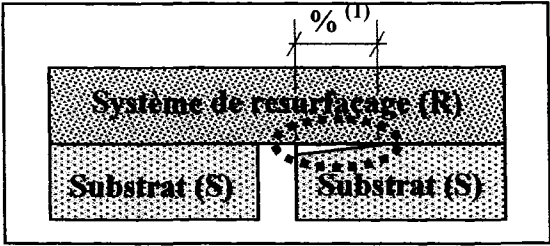
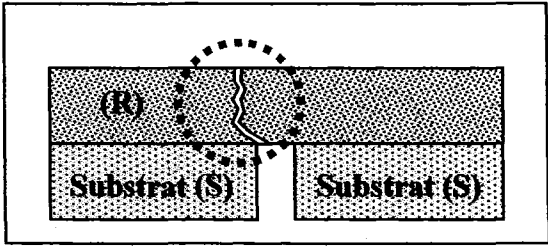
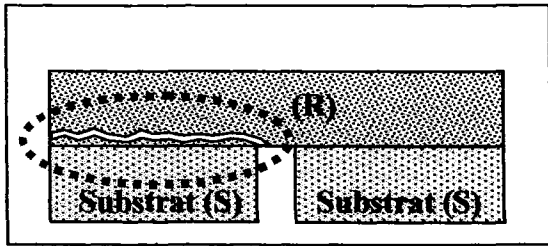
Mode de rupture	Code	Schéma illustrant le mode de rupture
Rupture partielle du corps d'éprouve suivant un plan parallèle à la surface du substrat particulièrement associée à l'interface.	(A)	 (1) % de la longueur de décohesionnement
Rupture du corps d'éprouve suivant un plan parallèle au plan de l'entaille.	(B)	
Rupture du corps d'éprouve suivant un plan parallèle à la surface du substrat lequel n'est pas localisé à l'interface proprement dite.	(C)	

Figure 46 Synthèse des différents modes de rupture observés sur les systèmes de resurfaçage testés en remontée des fissures.

La durée de vie d'une éprouvette sera, par définition, exprimée en référence au nombre de cycles verticaux imposés avant une perte significative d'un des paramètres de caractérisation présentés précédemment à la section 2.2.1.3 ($F_{\text{horizontale}}$ et/ou K_s). Étant donné que la fréquence de sollicitation à la verticale est fixée à 1 Hz, la durée de vie correspond à la durée de l'essai exprimé en secondes.

La détermination de la durée de vie de l'éprouvette est établie suivant son mode de rupture. Dans le cas d'une rupture de mode B, la durée de vie est évaluée à partir de l'évolution de la force horizontale qui correspond à la force de transfert de part et d'autre de l'entaille dans la couche de resurfaçage. En effet, à la rupture, la force dans les capteurs horizontaux chute radicalement à zéro. La Figure 47 montre un exemple de l'évolution de la force horizontale en cours d'essai. On constate qu'après 20000 cycles, la force horizontale chute radicalement témoignant ainsi de la propagation à la verticale d'une fissure dans le resurfaçage. En dépit de la fissure dans le resurfaçage, une force de transfert est toujours présente lorsque le mouvement horizontal imposé tend à refermer la fissure et induit un effort de compression. Suite à la fissuration de la couche de resurfaçage, ce n'est que dans le cas du mouvement qui tend à ouvrir la fissure que l'on constate que la force de traction demeure à zéro. Pour ce type de rupture, la durée de vie sera annotée N_f^{FV} (FV : fissuration verticale ; f : « failure »).

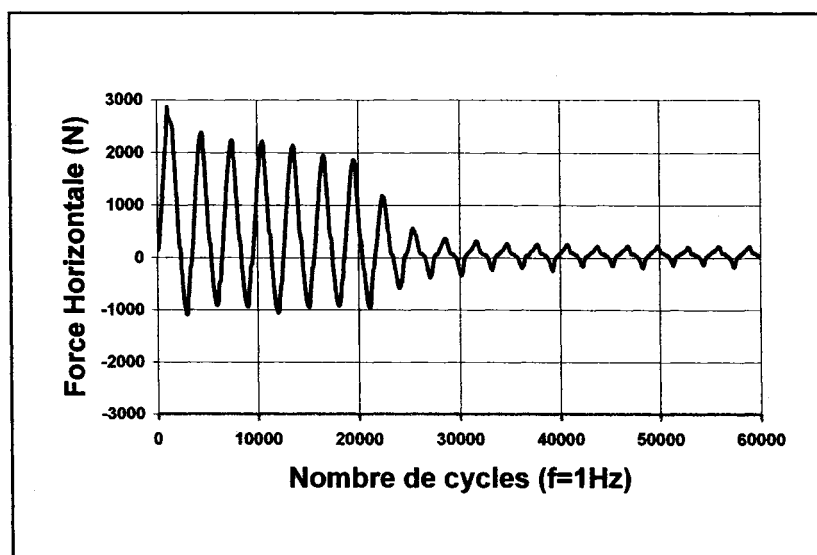


Figure 47 Évolution de $F_{horizontal}$ en cours d'essai

Par ailleurs, pour certains cas, la fissure du substrat se propage dans le système de resurfaçage le long d'un plan parallèle à l'interface avant de remonter à la surface du resurfaçage (rupture en mode A). Dans certains cas, la rupture du corps d'épreuve ne

présente pas de remontée de fissures proprement dite. Dans ces cas, on constate un changement marqué au niveau des paramètres caractéristiques suivant la direction parallèle au plan de la fissure : le facteur de rigidité change radicalement (Figure 48). Ce changement radical dans l'évolution de K_s est lié en partie au fait que la mesure de la différentielle d'élévation de part et d'autre de l'entaille est fortement altérée par le décohesionnement horizontal partiel. En effet, le décohesionnement, d'une part, interfère sur l'amplitude du mouvement en surface et de la force requise et, d'autre part, induit un effet biaisant lié à la rotation des repères collés à la surface du corps d'épreuve. La durée de vie d'une éprouvette, dont l'endommagement se manifeste dans le plan parallèle à l'interface, sera notée N_f^{FH} (FH : fissuration horizontale ; f : « failure »).

Dans certains cas, K_s diminue graduellement en cours d'essai. Tout comme pour le cas des essais de fatigue, la valeur de N_f^{FH} correspond à une chute de 50% de la valeur initiale de K_s (K_{s0}).

Le fait de mesurer les déplacements et les forces suivant les deux directions principales permet donc de mettre en évidence la séquence de rupture de l'éprouvette. Les Figures 48 et 49 illustrent la situation. La Figure 48 montre un changement important dans l'évolution du déplacement vertical à partir d'un certain nombre de cycles (~60 000) ce qui témoigne d'une altération significative suivant un plan parallèle à l'interface (fissuration en mode A). Par ailleurs, la Figure 49 montre qu'à cet instant précis, aucune fissure n'a encore remonté le système de resurfaçage jusqu'à la surface. En effet, la force horizontale mesurée dans la direction normale à l'entaille reste constante après 60 000 cycles. Ce n'est qu'après 15 000 cycles additionnels (>75 000 cycles) que la fissure commence à remonter sur l'épaisseur du système de resurfaçage.

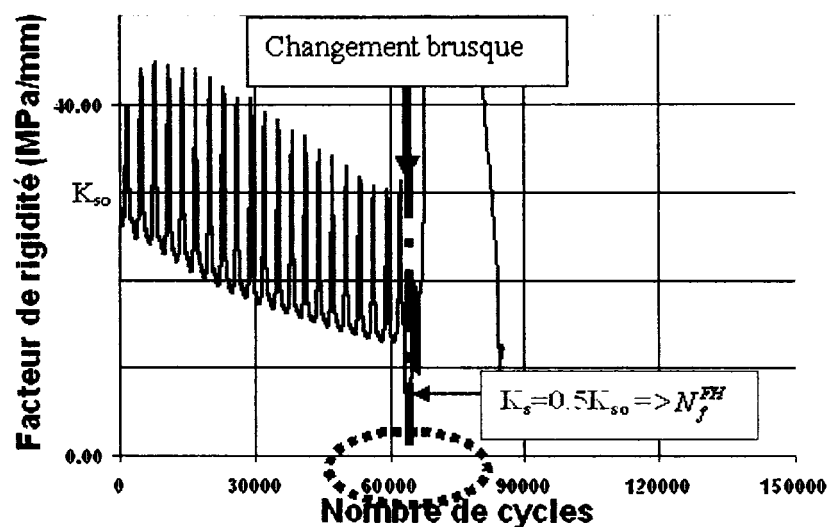


Figure 48 Évolution de facteur de rigidité et la force verticale en cours d'essai
($T^{\circ}_{\text{Essai}} = -5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 1\text{mm}$; $e_{\text{ReSurf}} = 100\text{ mm}$; Substrat : EB-14)

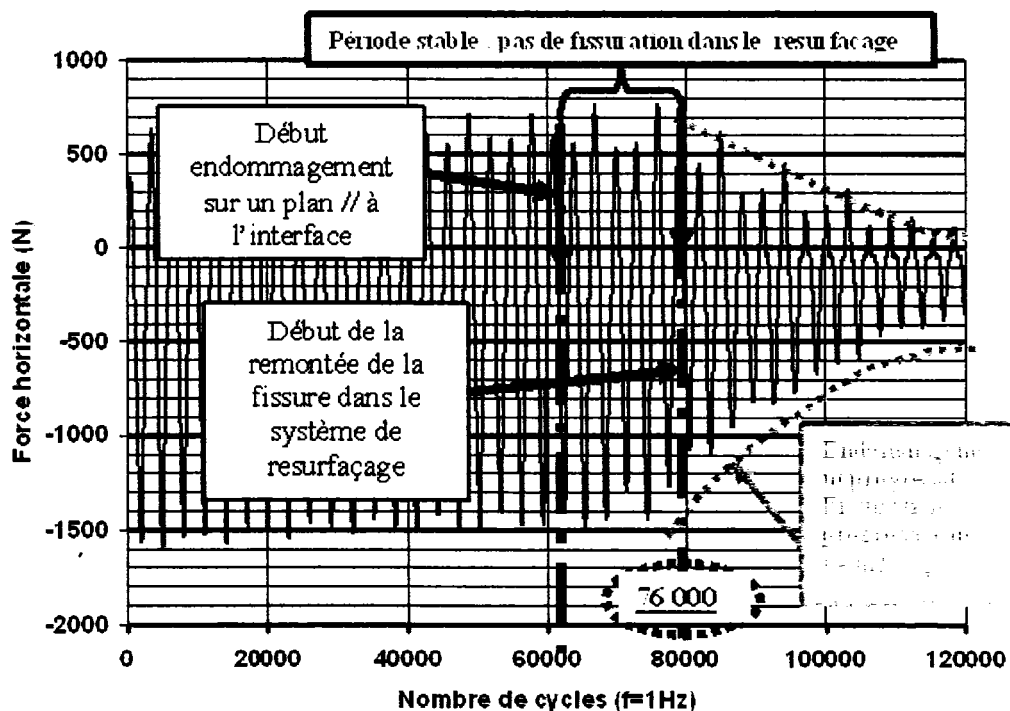


Figure 49 Évolution de la force horizontale en cours d'essai.
($T^{\circ}_{\text{Essai}} = -5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 1\text{mm}$; $e_{\text{ReSurf}} = 100\text{ mm}$; Substrat : EB-14)

4.2 Résultats d'essais du programme expérimental

Comme souligné précédemment (section 4.1), la présentation des résultats vise à mettre en relief l'évolution de K_s et la force horizontale pour chacun des systèmes étudiés. Les Figures 50 à 61 présentent les résultats pour chaque système de resurfaçage, unique ou multicouche, testés aux températures de -5°C et de $+5^\circ\text{C}$

Les figures, montrent les relations entre les différents paramètres permettant de juger l'évolution de l'endommagement du système de resurfaçage en cours d'essai : l'amplitude de la force horizontale et de la force verticale, le déplacement en verticale et le facteur de rigidité sont pris en considération et le nombre de cycle jusqu'à la fissuration de l'enrobé. À ce regard, dans le but de synthétiser l'ensemble de l'information pertinente à l'interprétation et l'analyse des résultats, chacun des systèmes testés est présenté à l'aide d'une figure. Chaque figure présente la relation entre la force horizontale et le nombre de cycles jumelés à une photo illustrant l'endommagement du corps d'épreuve en fin d'essai (Figure a) et l'évolution du facteur de rigidité (K_s) en cours d'essai (Figure b).

Pour bien mettre en perspective toute l'information disponible à partir de ces figures, nous présenterons dans un premier temps quelques commentaires relatifs à chacun des corps d'épreuves testés.

4.2.1 Essais réalisés à $+5^\circ\text{C}$

Échantillon 1 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55\text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=+5^\circ\text{C}$; $\Delta X=2\text{ mm}$ (Figure 50 a et b) :

- La relation entre la force horizontale et le nombre de cycle montre que la force du capteur de droite (CF-HD) présente une évolution incorrecte. La variation de la force dans le capteur ne semble pas répondre aux efforts de traction. Donc, la force de transfert est reprise entièrement par le capteur de force gauche. Il est plus que probable que le serrage du capteur de droite à l'assise du plateau horizontal était inadéquat.
- On constate également à la Figure 50b que le déplacement vertical mesuré en surface du resurfaçage augmente progressivement en cours d'essai alors que la force verticale demeure relativement constante. En conséquent la valeur de la K_s diminue jusqu'à la remontée franche de la fissure en surface. Cette information porte à croire qu'en cours d'essai l'endommagement du système de resurfaçage se dessine autour de l'entaille. Sa rigidité décroît et la valeur K_s diminue en cours d'essai.
- La photo de la Figure 50a montre une remontée franche de la fissure en surface.

Échantillon 2 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100$ mm; $T_{\text{essai}}=+5^\circ\text{C}$; $\Delta X=2$ mm (Figure 51 a et b) :

- A priori, la fissuration se développe essentiellement suivant le plan horizontal (mode C).
- Le changement abrupt de K_s dès les premiers cycles témoigne de la progression du fissure suivant le plan horizontal.

Échantillon 3 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $T_{\text{essai}}=+5^\circ\text{C}$; $\Delta X=2$ mm (Figure 52 a et b) :

- La Figure 52 montre clairement que la remontée de la fissure s'annonce suivant une direction oblique avant de remonter à la surface.

- Le nombre de cycle avant la remontée de la fissure est passablement réduit.
- On constate également à la Figure 52a que dès le deuxième cycle horizontal ($N > 3500$) on observe déjà une réduction de la force horizontale qui témoigne que la remontée de fissure est déjà marquée : le mouvement horizontal est donc extrêmement sévère.

Échantillon 4 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}} = 100$ mm; $T_{\text{essai}} = +5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X = 2$ mm (Figure 53 a et b) :

- Le déplacement vertical imposé présente un comportement particulier. La force horizontale chute rapidement et l'endommagement est déjà marqué après le premier cycle.
- L'annonce de la remontée de la fissure se fait suivant la direction oblique, mais rapidement elle suit le plan horizontal.
- L'évolution de K_s est particulière, inexplicable. Il est fort probable que la propagation de la fissure à l'horizontale sur une largeur importante, affecte la mesure du déplacement vertical.

Échantillon 5 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14 avec une chape d'étanchéité : $e_{\text{resurf}} = 55$ mm; $e_{\text{chape}} = 15$ mm $T_{\text{essai}} = +5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X = 2$ mm (Figure 54 a et b) :

- Les résultats présentés à la Figure 54 montrent que graduellement, en cours de sollicitation, la fissure remonte à la verticale. Suivant l'évolution de la force horizontale, cette remontée progresse à chacun des cycles horizontaux.
- D'autre part, on constate à la Figure 54b que K_s augmente légèrement en cours de sollicitation.

Échantillon 6 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14) avec une membrane d'élastomère : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{membrane}}=3$ mm; $e_{\text{ECF}}=8$ mm Tessai= $+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2$ mm (Figure 55 a et b) :

- L'essai a été arrêté après un peu moins de 2 jours de sollicitation.
- Aucune fissure apparente n'est observée après cette période de sollicitation.
- L'amplitude de la force horizontale est relativement faible et demeure constante durant toute la durée de l'essai.
- L'évolution de K_s présente également une diminution en début de sollicitation (jusqu'à 3000 cycles). Par la suite on constate une diminution lente jusqu'à l'arrêt de l'essai. Cette diminution montre un endommagement lent au sein du système de resurfaçage.

4.2.2 Essais réalisés à -5°C

Échantillon 7 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1$ mm (Figure 56 a et b) :

- À la Figure 56b on constate que le déplacement vertical augmente progressivement en cours d'essai. En conséquence K_s , diminue jusqu'à la remontée de la fissure.
- La photo de la Figure 56a nous montre une remontée franche de la fissure en surface.

Échantillon 8 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100$ mm; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1$ mm (Figure 57 a et b) :

- La force horizontale demeure constante en cours de sollicitation jusqu'à la fissuration.

- L'évolution de K_s présente également une diminution lente qui nous présente un endommagement lent du système de resurfaçage.

Échantillon 9 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $T_{\text{essai}}=-5^\circ\text{C}$; $\Delta X=1$ mm (Figure 58 a et b) :

- Les résultats présentés à la Figure 58 montrent un endommagement lent en cours de sollicitation. L'amplitude de la force horizontale diminue lentement.
- La fissuration du système se développe suivant le plan horizontal.
- À la Figure 58b on constate aussi une diminution lente de la K_s qui nous porte à croire que la rigidité du système diminue graduellement à chacun des cycles.

Échantillon 10 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100$ mm; $T_{\text{essai}}=-5^\circ\text{C}$; $\Delta X=1$ mm (Figure 59 a et b) :

- La force horizontale chute rapidement et l'endommagement est déjà marqué dès le premier cycle.
- Le système a été endommagé très rapidement. La K_s présente une chute abrupte et la fissure se propage suivant le plan horizontal.

Échantillon 11 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14 avec une chape d'étanchéité : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{chape}}=15$ mm $T_{\text{essai}}=-5^\circ\text{C}$; $\Delta X=1$ mm (Figure 60 a et b) :

- La photo de la Figure 60a nous montre une remontée franche de la fissure en surface.
- Suivant l'évolution de l'amplitude de la force horizontale, l'endommagement du système de resurfaçage se produit lentement et la rigidité diminue à chacun des cycles horizontaux.

Échantillon 12 : resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14) avec une membrane d'élastomère : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{membrane}}=3$ mm; $e_{\text{ECF}}=8$ mm Tessai= -5°C ; $\Delta X=1$ mm (Figure 61 a et b)

- L'essai a été arrêté après trois jours de sollicitation. L'amplitude de la force horizontale est relativement faible et demeure constante durant toute la durée de l'essai.
- Egaleme nt l'évolution de K_s demeure constante durant la sollicitation.
- Aucun endommagement n'a été observé jusqu'à l'arrêt de l'essai.

Globalement, les Tableau XXI et XXII présentent une synthèse de résultats des essais effectués pour chacun de système de resurfaçage.

La force correspondante à l'effort qui traverse de part et d'autre l'entaille est la somme des deux capteurs de force (CF-HD et CF-HG). À noter que pour l'échantillon no.1, à cause d'un comportement déficient du capteur droit, la force de transfert est associée entièrement à celle mesurée par le capteur gauche.

Tableau XXI
Synthèse des essais effectués à +5°C

Enrobé de resurfacement ESG-10				Rupture			Déplacement (μm)					1 ^{er} cycle		Avant Rupture	
No. échantillon	Type Base	e _r (mm)	Interface type	Mode	N _f		Horizontal				Vertical				
							1 ^{er} cycle		Avant Rupture		1 ^{er} cycle				
					FH	FV	Interface (2)	En surface (3)	Interface (2)	En surface (3)	En surface (4)	Δ(CF-HD)	Δ(CF-HG)	Δ(CF-HD)	Δ(CF-HG)
1	EB-14 Labo (Fig.50)	55	Agent de liaison ⁽¹⁾	B	~25000	~25000	78 (T)	115 (C)	207 (T)	137 (T)	20,0	---	4080	---	4960
												K _s =21 MPa/mm		K _s =10 MPa/mm	
2	EB-14 Labo (Fig.51)	100	Agent de liaison ⁽¹⁾	C	~85000	~23000	179 (T)	190 (C)	266 (T)	241 (C)	19,0	3955 N	3350 N	2785 N	2609 N
												K _s =38 MPa/mm		K _s =3 MPa/mm	
3	EB-10S In Situ (Fig.52)	55	Agent de liaison ⁽¹⁾	B	~7000	~7000	304 (T)	190 (C)	n/a	n/a	19,8	3930 N	3825 N	n/a	n/a
												K _s =19 MPa/mm		K _s =1 MPa/mm	
4	EB-10S In Situ (Fig.53)	100	Agent de liaison ⁽¹⁾	B-C	~6000	6000	424 (T)	238 (C)	n/a	n/a	19,4	3095 N	2827 N	n/a	n/a
												K _s =18 MPa/mm		K _s =0 MPa/mm	
5	EB-14 Labo (Fig.54)	74	Chape CH-10	B	~22000	~22000	279 (T)	180 (C)	633 (T)	446 (T)	18,6	3286 N	3071 N	2097 N	2161 N
												K _s =3 MPa/mm		K _s =7 MPa/mm	
6	EB-14 Labo (Fig.55)	67	SAMI	aucune	>178000	>178000	147 (T)	134 (T)	111 (T)	98 (T)	18,0	1418 N	1443 N	719 N	764 N
												K _s =9 MPa/mm		K _s =7 MPa/mm	

- (1) Émulsion Supercol 60 : taux résiduel de 0,25 kg / m²
 (3) Capteur de déplacement No. 5954
 T = traction

- (2) Capteur de déplacement No. 2325
 (4) Capteur de déplacement No. 5955
 C = compression

Tableau XXII
Synthèse des essais effectués à -5°C

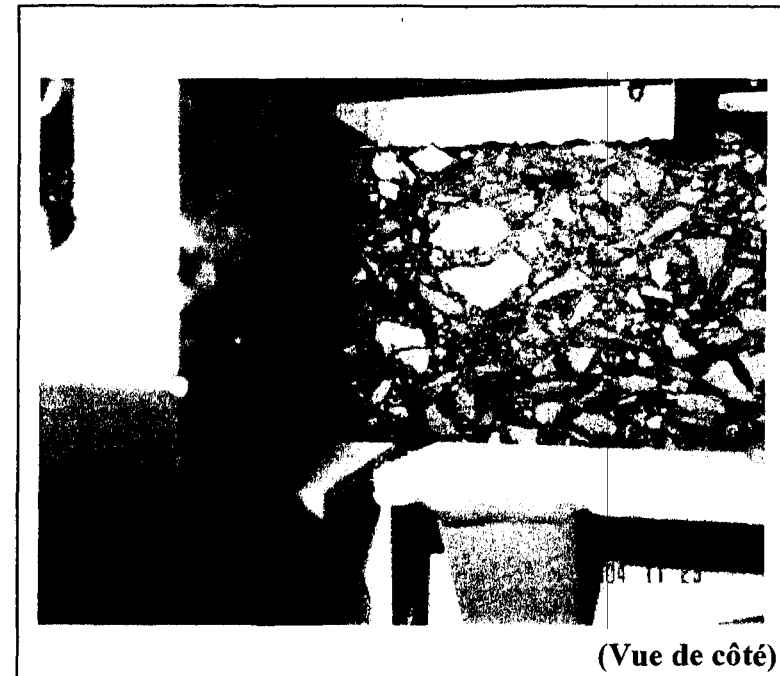
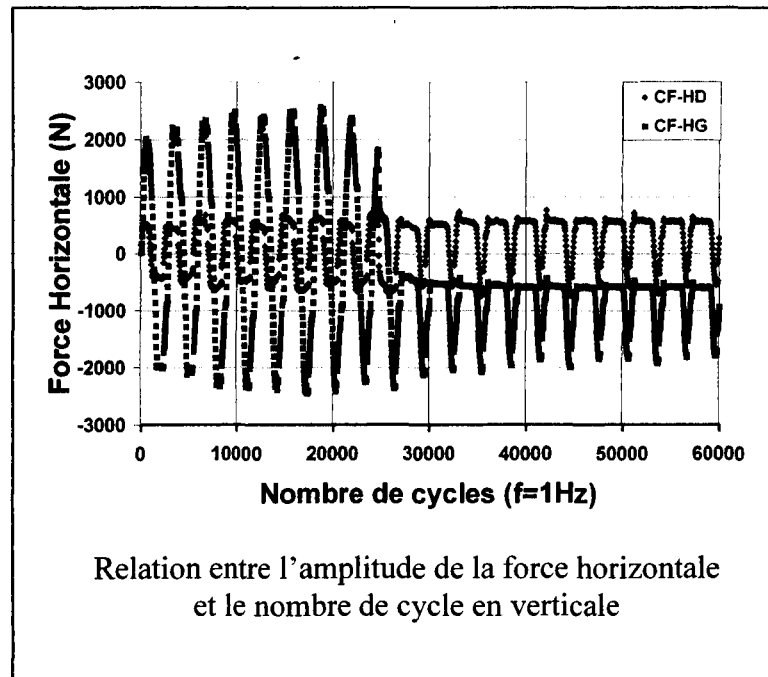
Enrobé de resurfçage ESG-10				Rupture			Déplacement (µm)					1 ^{ère} cycle		Avant Rupture	
							Horizontal				Vertical				
No. échantillon	Type Base	e _{re} (mm)	Interface type	Mode	N _f		1 ^{ère} cycle		Avant Rupture		1 ^{ère} cycle				
							Interface (2)	En surface (3)	Interface (2)	En surface (3)	En surface (4)				
					FH	FV						Δ(CF-HD)	Δ(CF-HG)	Δ(CF-HD)	Δ(CF-HG)
7	EB-14 Labo (Fig.56)	55	Agent de liaison ⁽¹⁾	B	~35000	~35000	72 (T)	110 (C)	154	76	18,6	2544 N	2346 N	2114 N	1974 N
												K _s = 27 MPa/mm		K _s =3 MPa/mm	
8	EB-14 Labo (Fig.57)	100	Agent de liaison ⁽¹⁾	C	~6000	~6000	160 (T)	248 (C)	182	242	17,2	4416 N	3450 N	4086 N	3498 N
												K _s =29 MPa/mm		K _s =7 MPa/mm	
9	EB-10S In Situ (Fig.58)	55	Agent de liaison ⁽¹⁾	B	~32000	~32000	66 (T)	126 (C)	148	80	19,0	2288 N	2094 N	2182 N	2002 N
												K _s =28 MPa/mm		K _s =2 MPa/mm	
10	EB-10S In Situ (Fig.59)	100	Agent de liaison ⁽¹⁾	C	~3000	~3000	54 (T)	134 (C)	---	---	18,8	2440 N	2234 N	---	---
												K _s =35 MPa/mm		K _s =14 MPa/mm	
11	EB-14 Labo (Fig.60)	74	Chape CH-10	B	~180000	~180000	110 (T)	126 (C)	280	74	17,4	2170 N	1990 N	1754 N	1898 N
												K _s =25 MPa/mm		K _s =10 MPa/mm	
12	EB-14 Labo (Fig.61)	67	SAMI	aucune	>320000	>320000	30 (T)	32 (C)	24	24	18,6	680 N	676 N	522 N	496 N
												K _s =11 MPa/mm		K _s =11 MPa/mm	

T = traction

C = compression

- (1) Émulsion Supercol 60 : taux résiduel de 0,25 kg / m²
(3) Capteur de déplacement No. 5954

- (2) Capteur de déplacement No. 2325
(4) Capteur de déplacement No. 5955



Échantillon # 1

Figure 50a

Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfacement avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2 \text{ mm}$ (19 nov.2004)

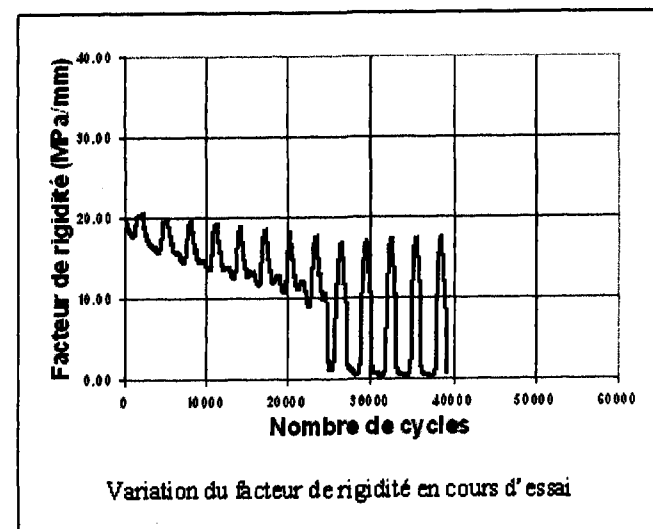
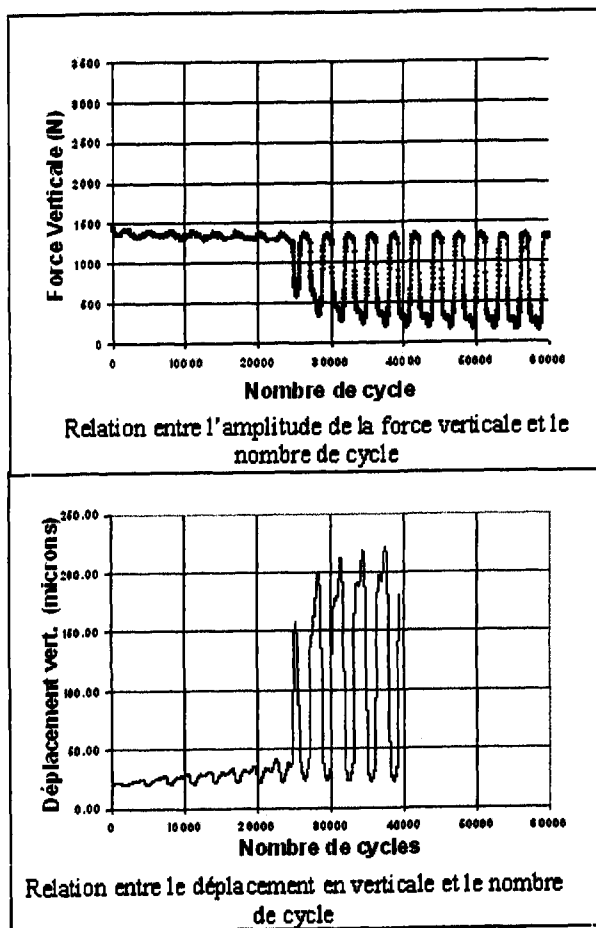
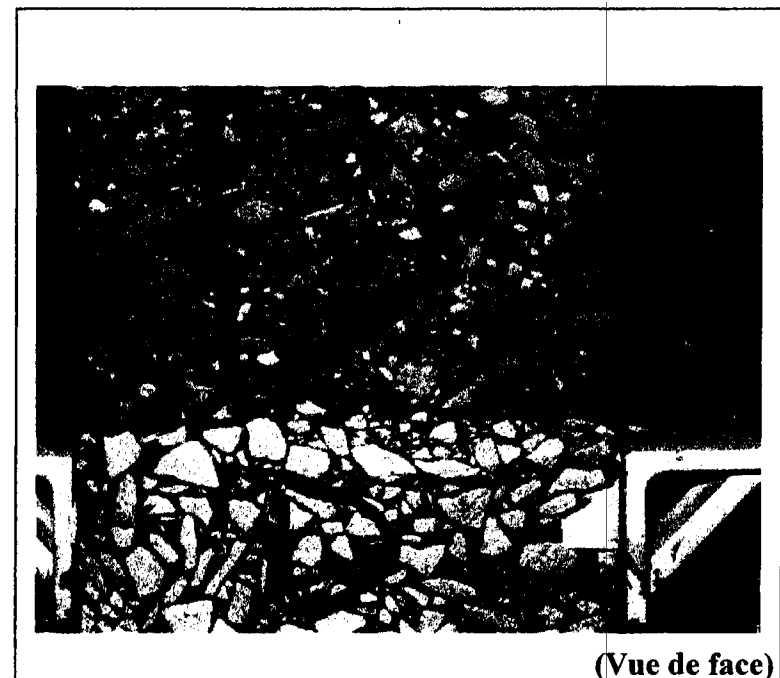
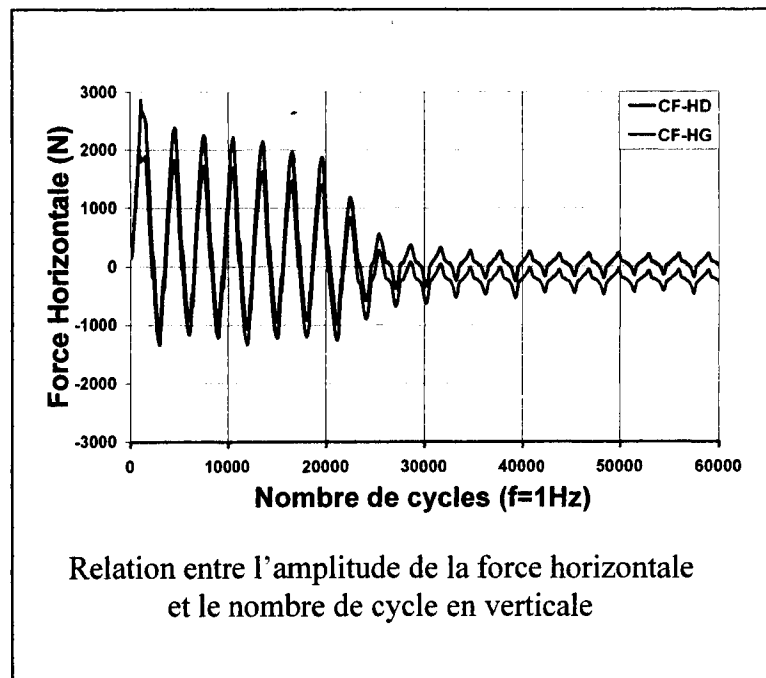


Figure 50b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2 \text{ mm}$ (19 nov.2004)



Échantillon # 2

Figure 51a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfacement avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2 \text{ mm}$ (26 nov.2004)

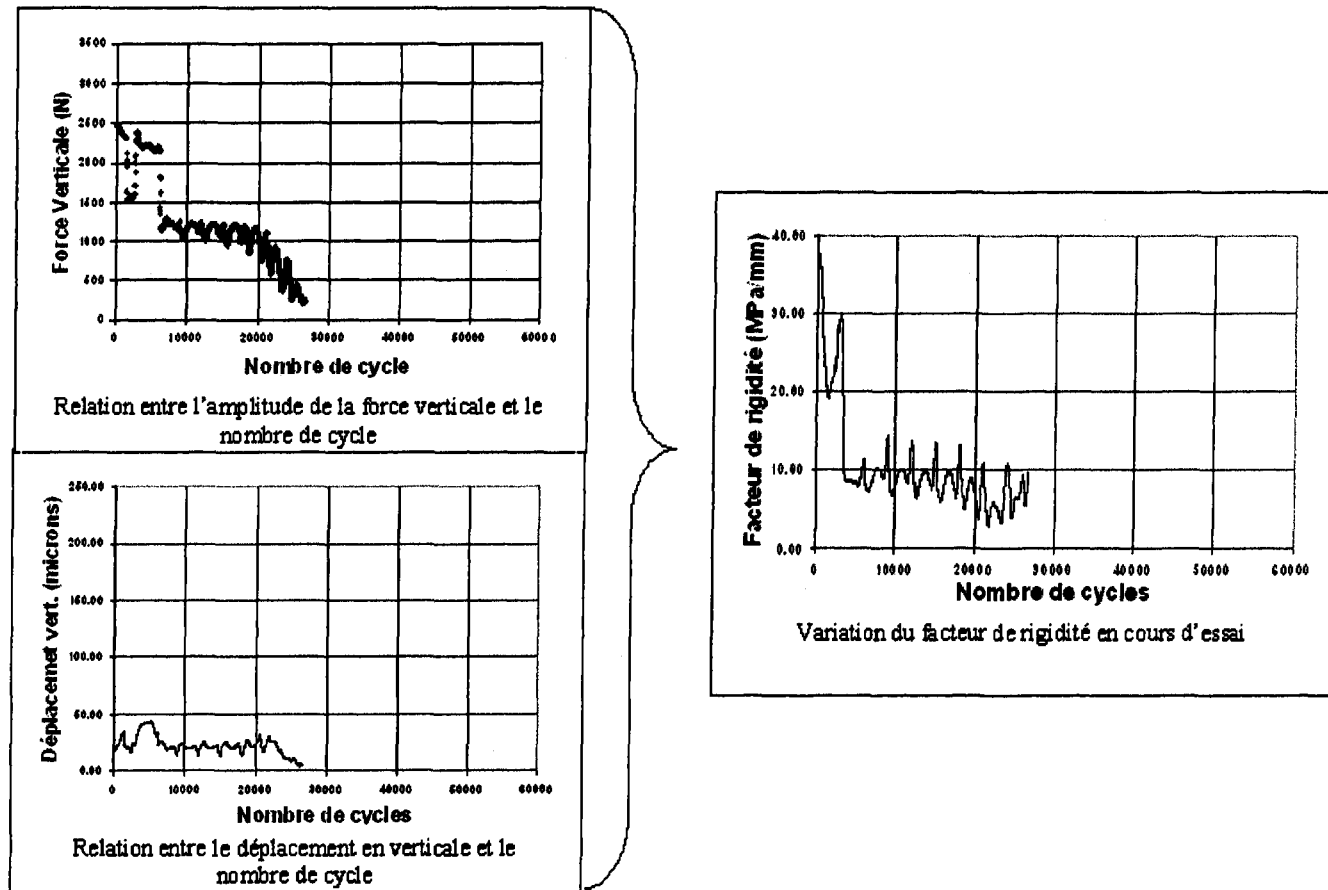


Figure 51b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100$ mm; $T_{\text{essai}}=+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2$ mm (26nov.2004)

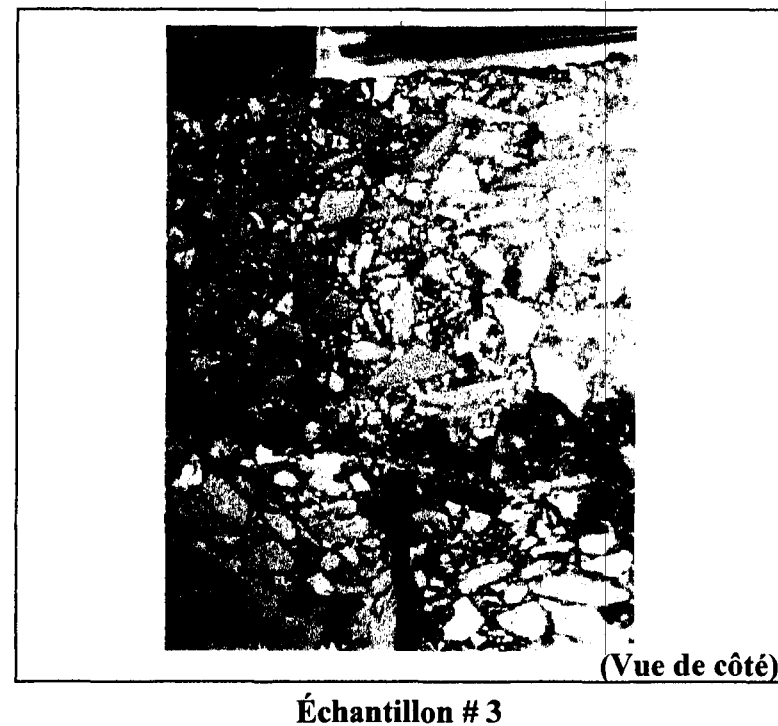
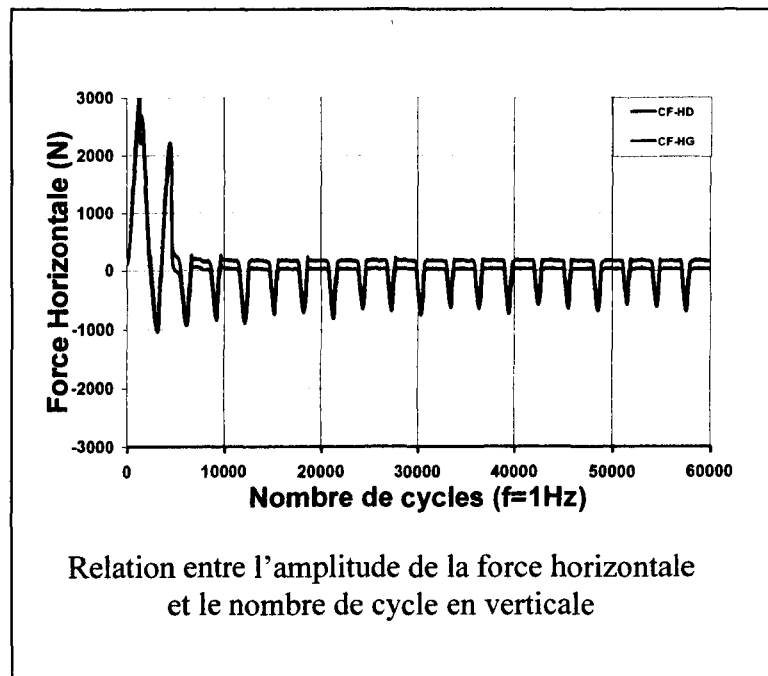


Figure 52a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $T_{\text{essai}}=+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2$ mm (04 dec.2004)

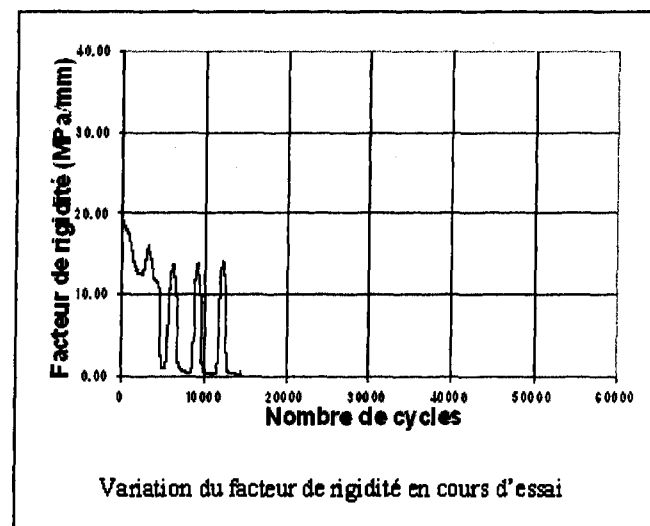
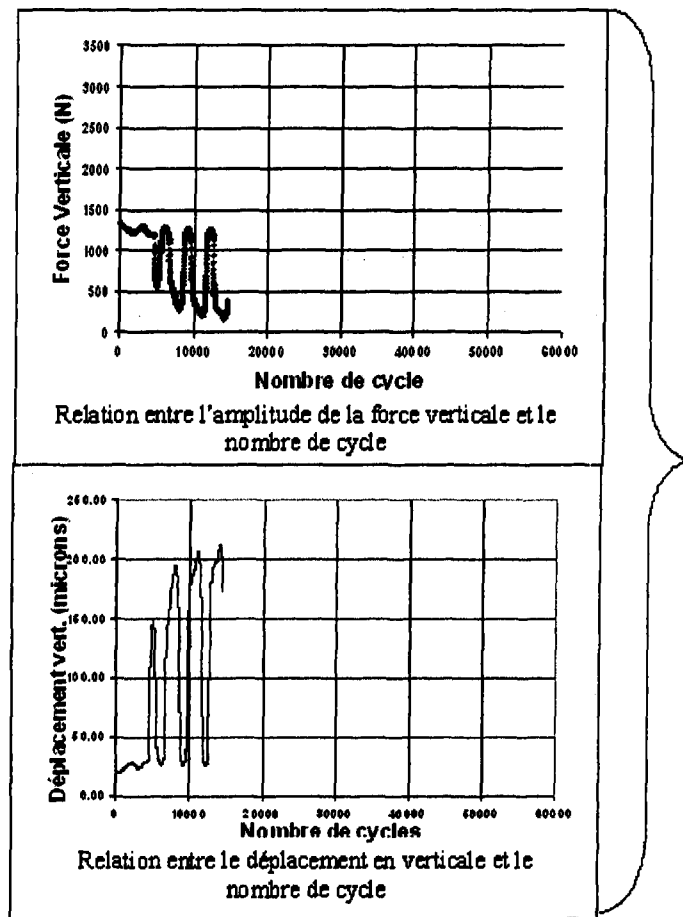
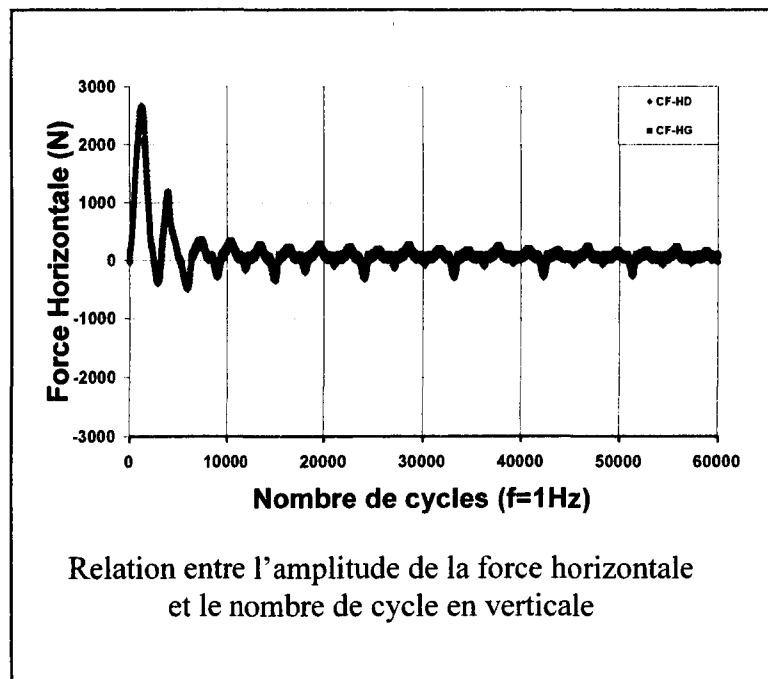


Figure 52b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $T_{\text{essai}}=+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2$ mm (04 dec.2004)



Échantillon # 4

Figure 53a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2 \text{ mm}$ (07 dec.2004)

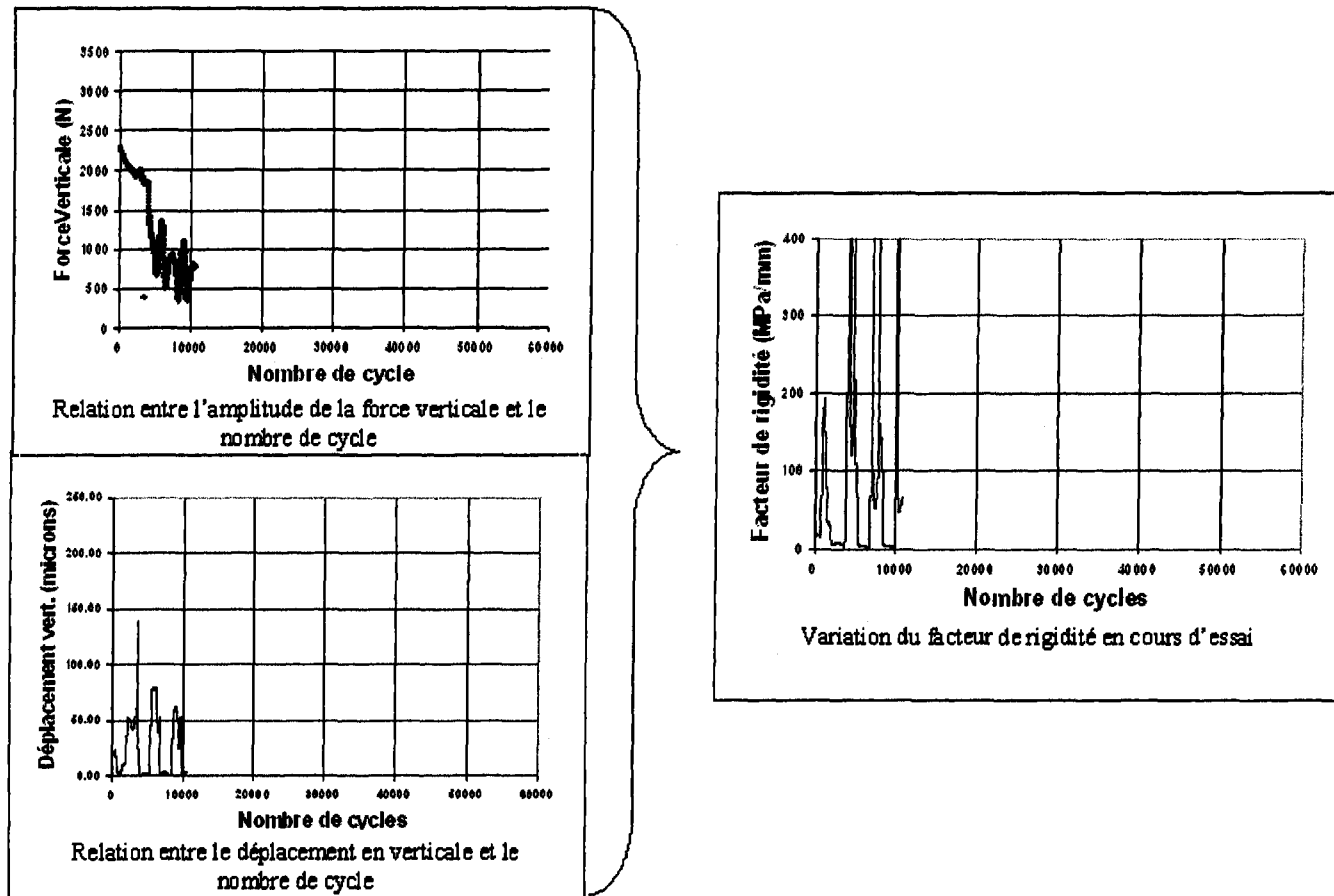
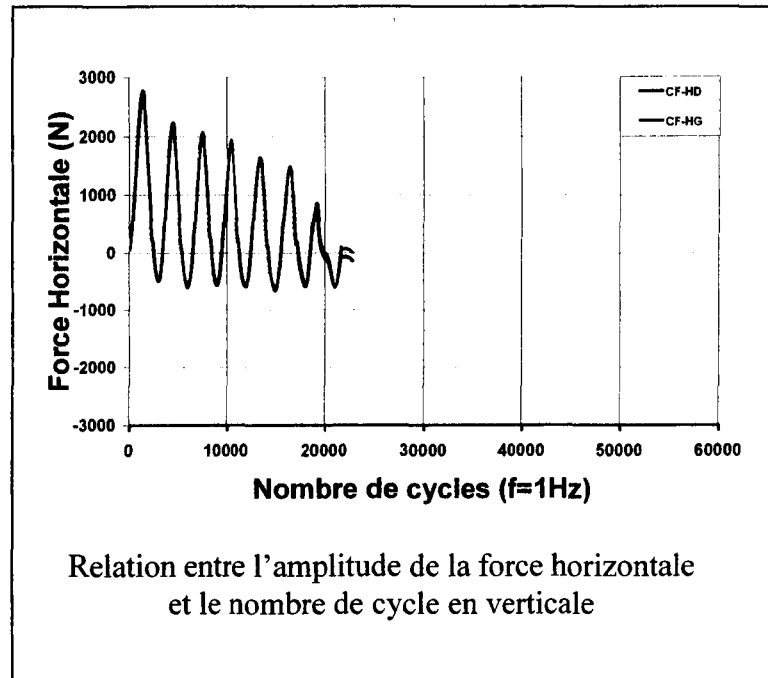


Figure 53b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2 \text{ mm}$ (07 dec.2004)



Échantillon # 5

Figure 54a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14 avec une chape d'étanchéité : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{chape}}=15$ mm Tessai= $+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2$ mm (15 mars 2005)

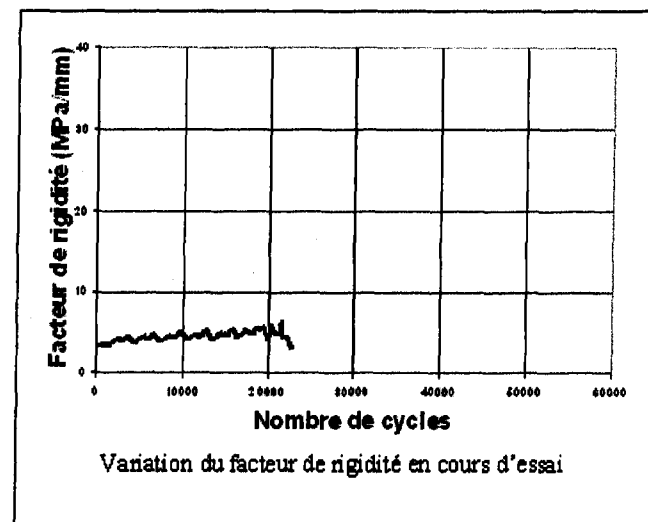
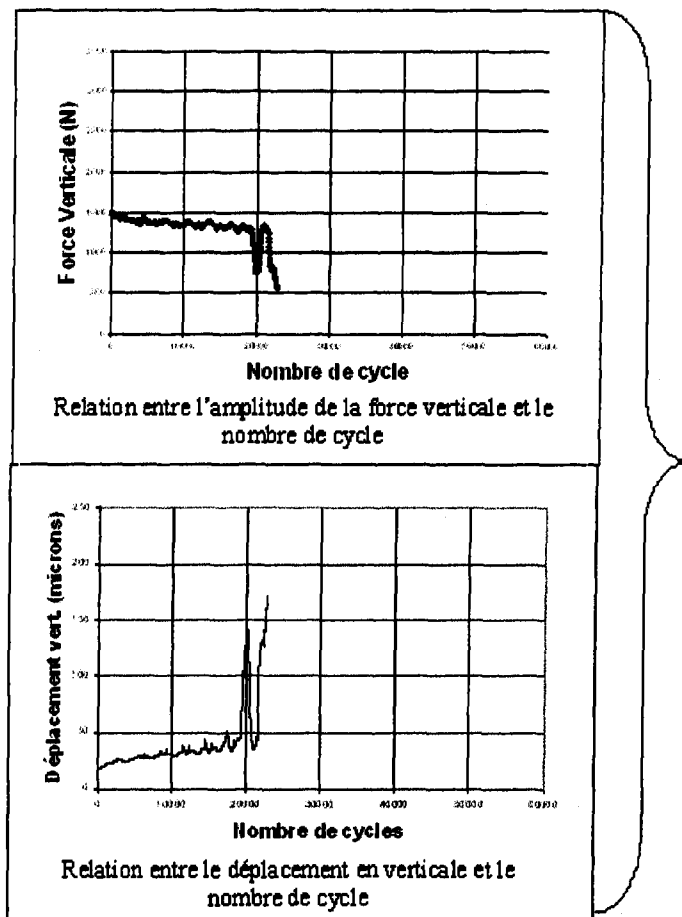
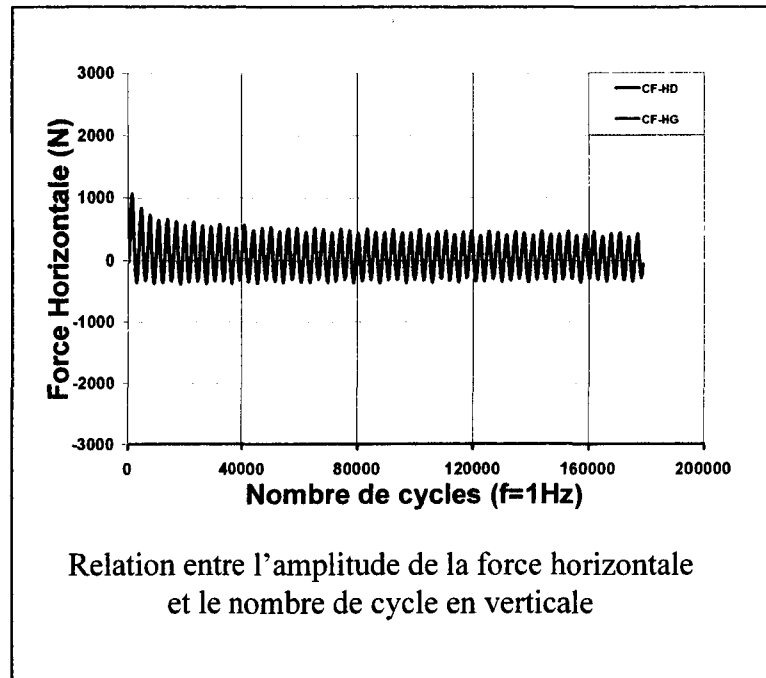


Figure 54b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14 avec une chape d'étanchéité : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{chape}}=15$ mm Tessai= $+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2$ mm (15 mars 2005)



Échantillon # 6

Figure 55a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14) avec une membrane d'élastomère : $e_{\text{resurf}}=55 \text{ mm}$; $e_{\text{membrane}}=3 \text{ mm}$; $e_{\text{ECF}}=8 \text{ mm}$ Tessai= $+5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=2 \text{ mm}$ (17 mars 2005)

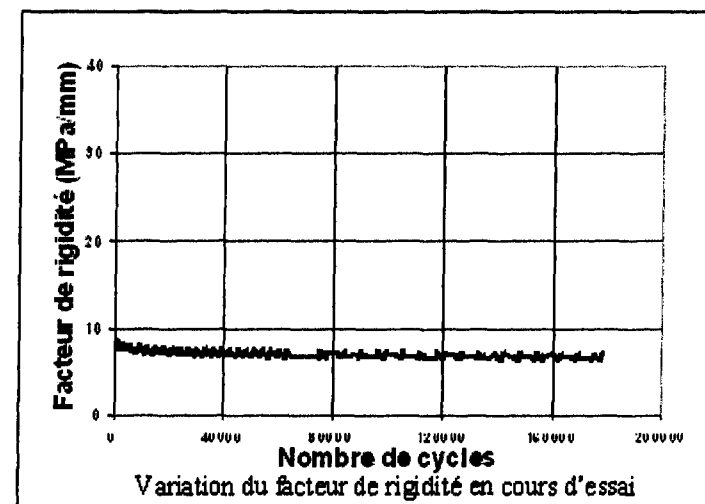
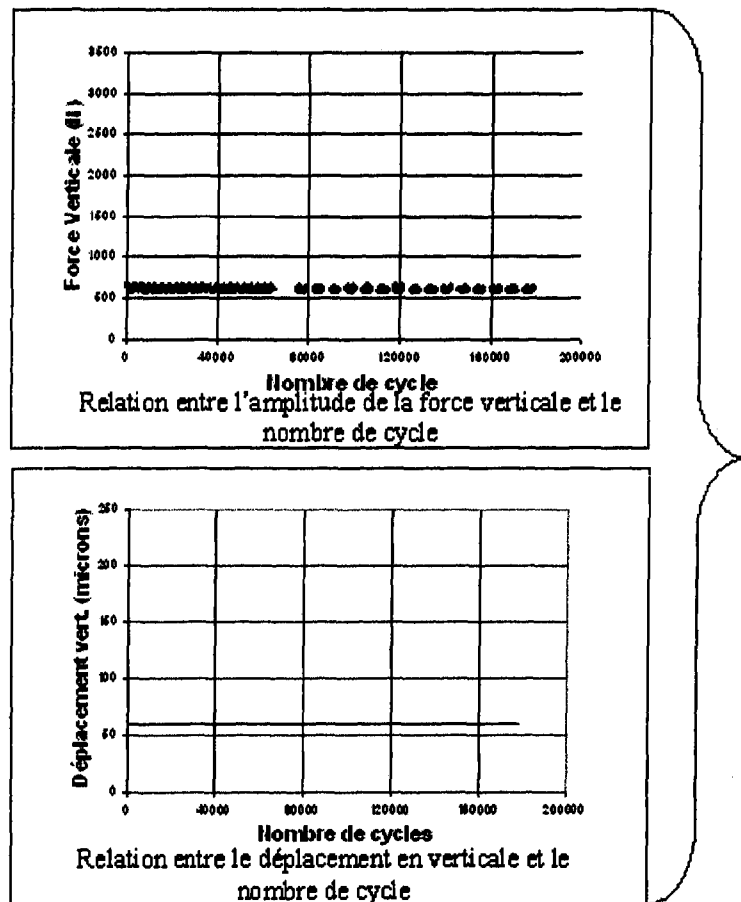


Figure 55b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14) avec une membrane d'élastomère : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{membrane}}=3$ mm; $e_{\text{ECF}}=8$ mm Tessai=+5°C; $\Delta X=2$ mm (17 mars 2005)

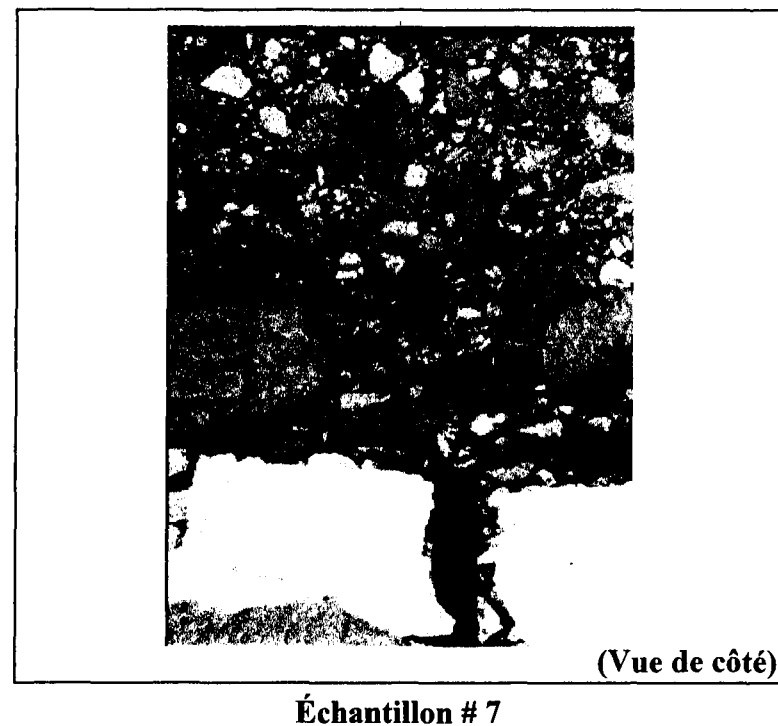
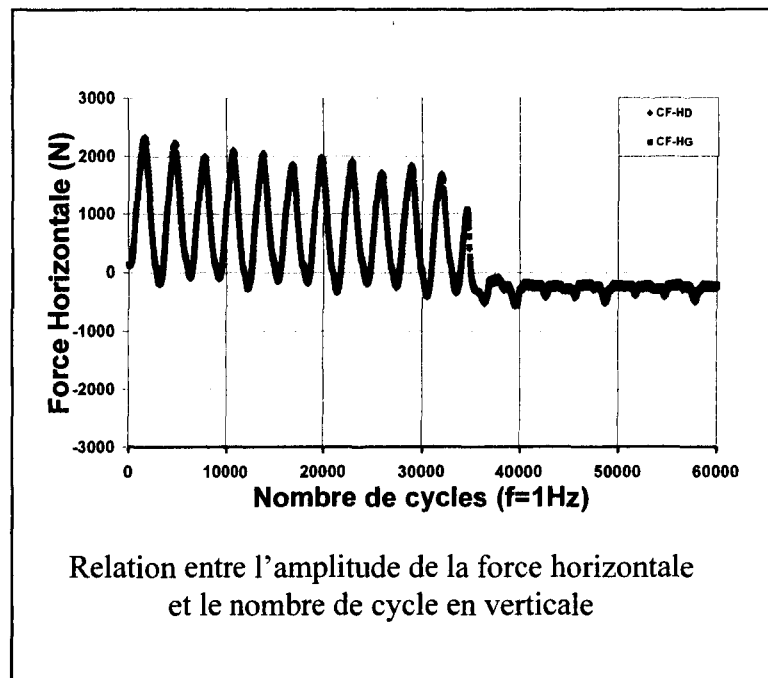


Figure 56a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfacement avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1 \text{ mm}$ (06 jan.2005)

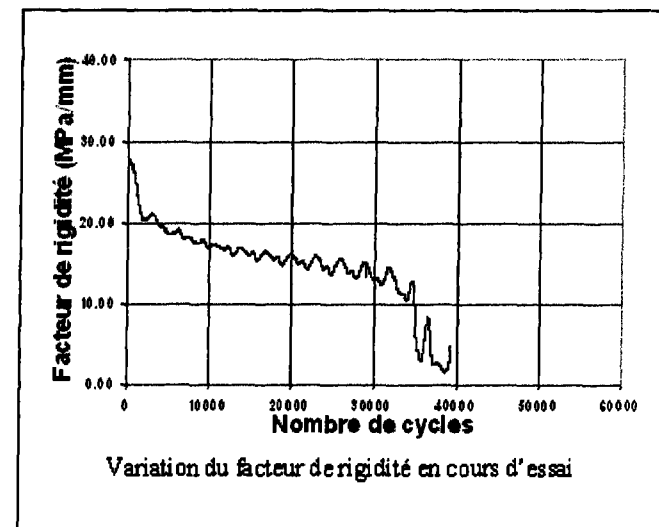
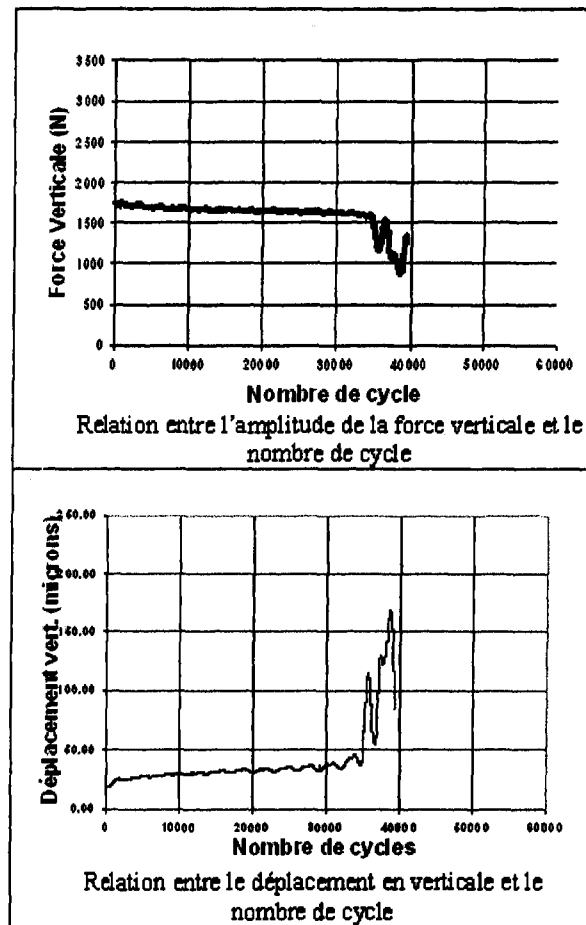
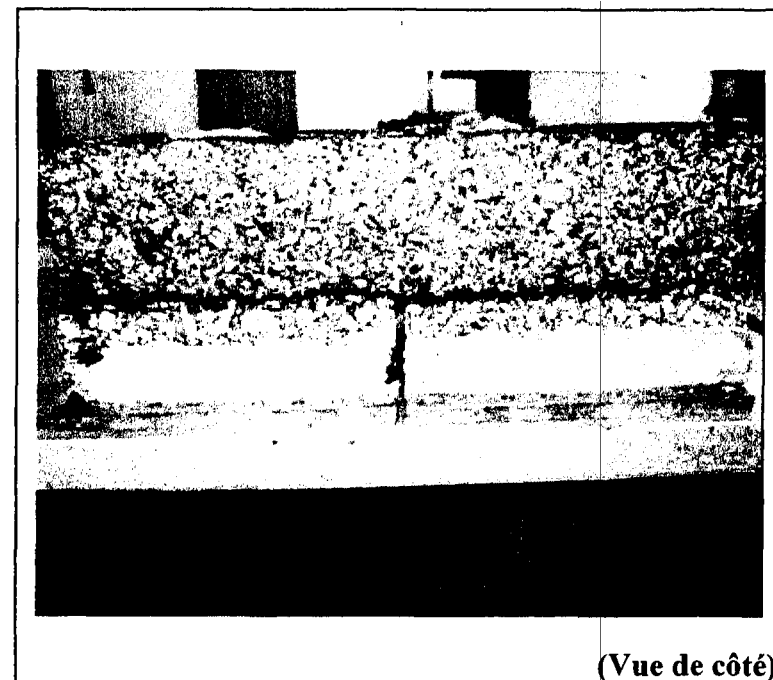
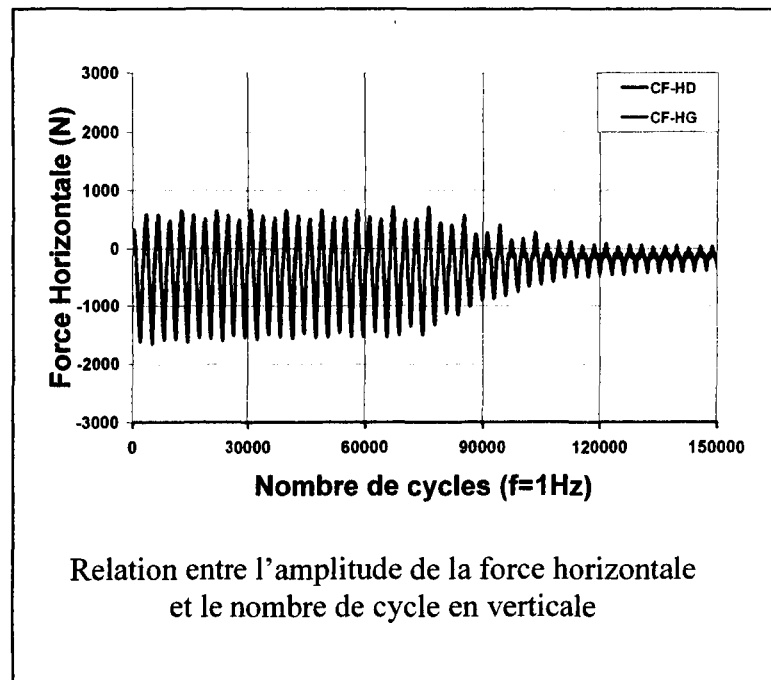


Figure 56b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1 \text{ mm}$ (06 jan.2005)



Échantillon # 8

Figure 57a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfacement avec l'enrobé ESG-10 en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1 \text{ mm}$ (03 nov.2004)

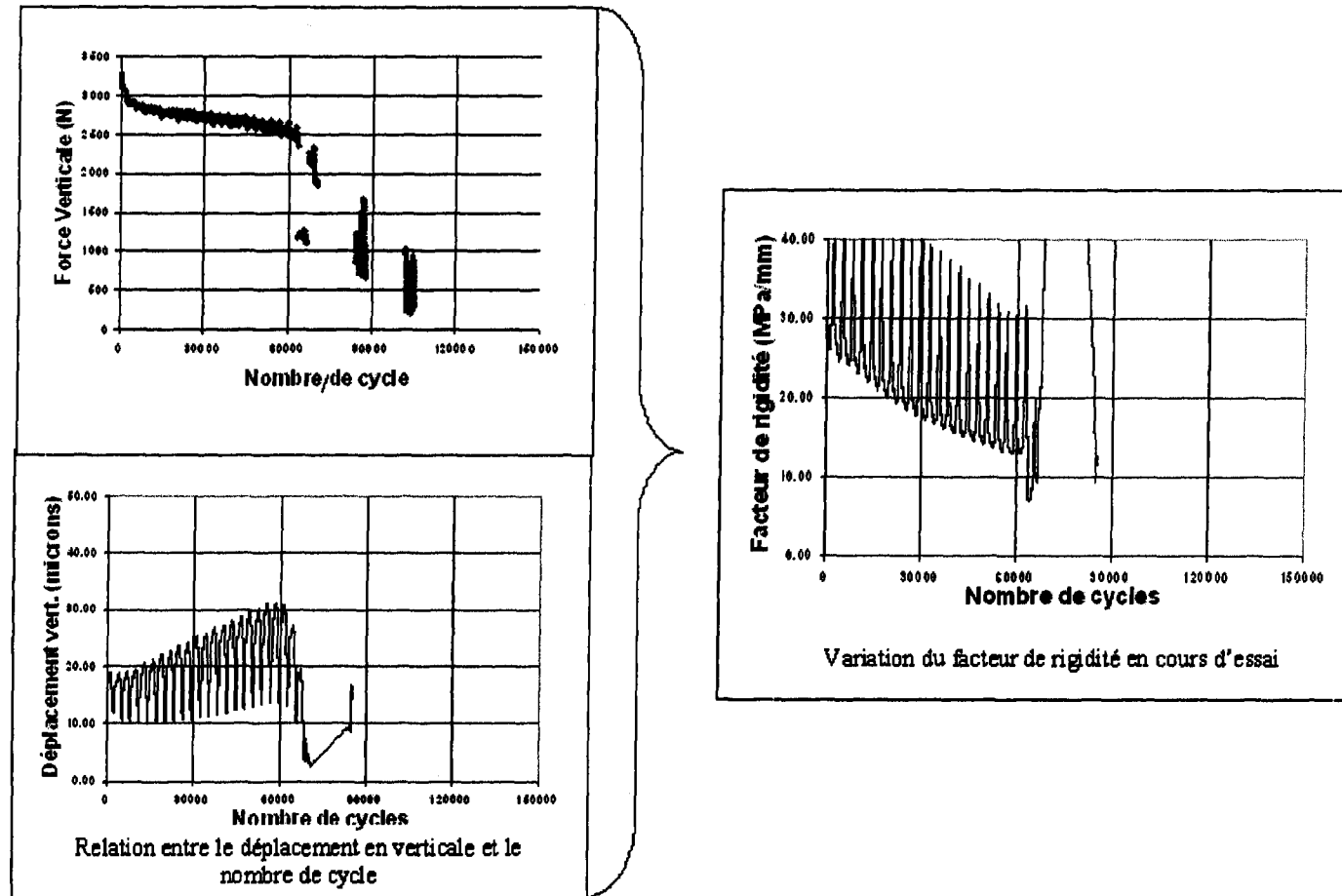
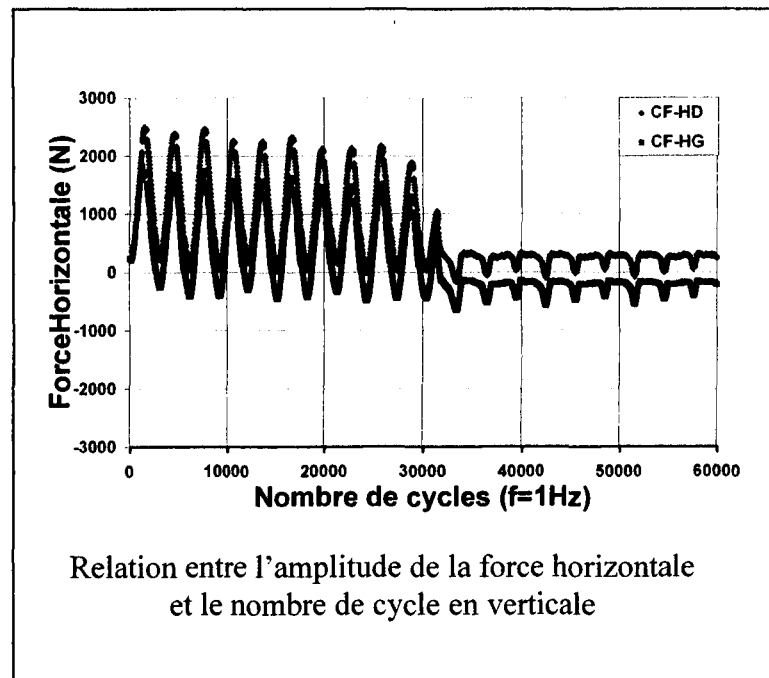


Figure 57b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en enrobé EB-14 avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100$ mm; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1$ mm (03 nov.2004)



Échantillon # 9

Figure 58a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1 \text{ mm}$ (10 dec.2004)

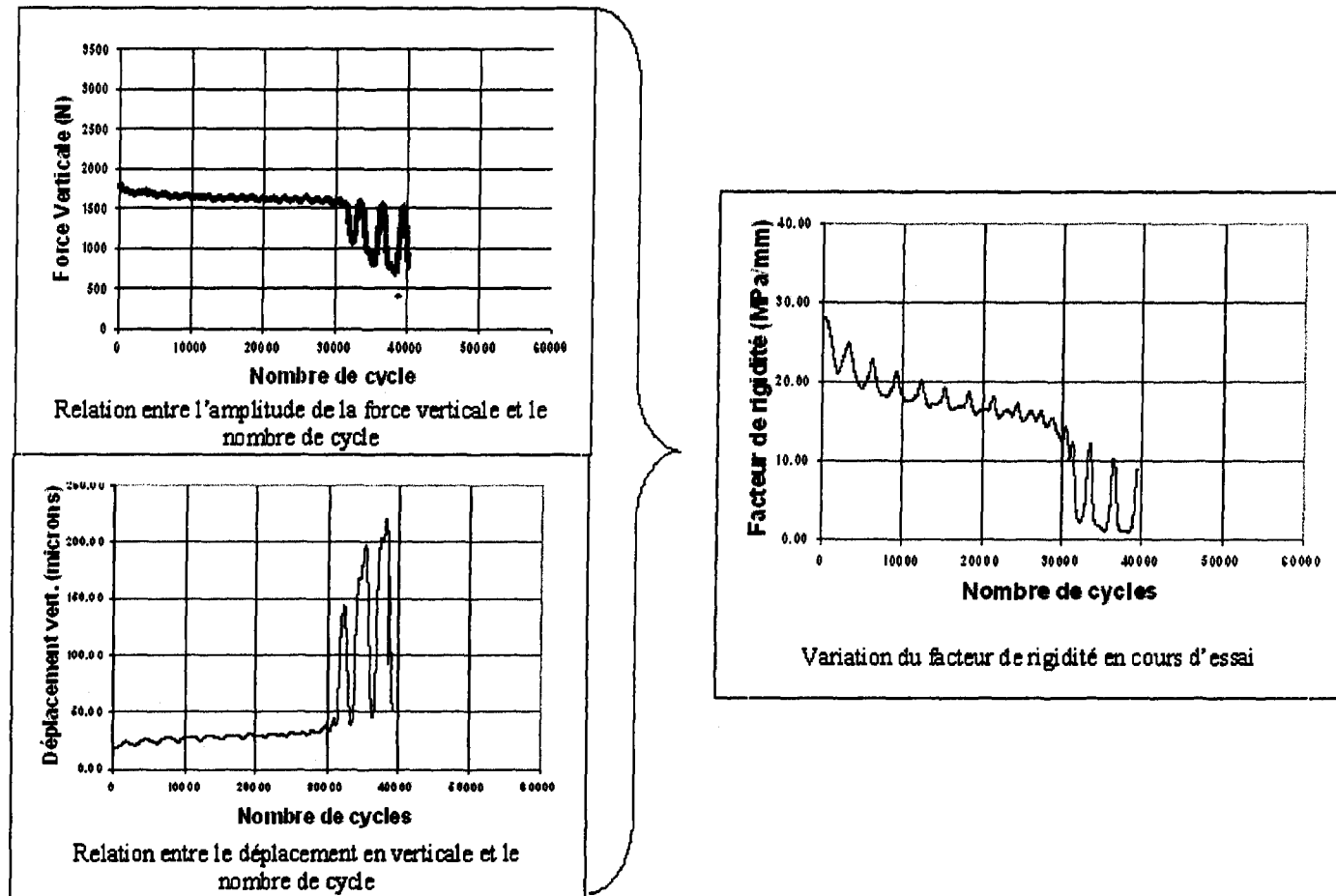
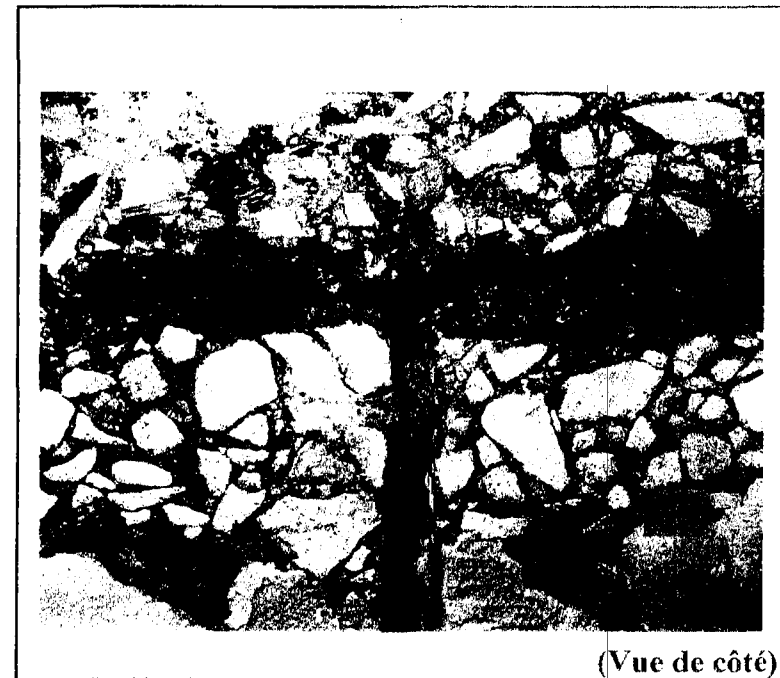
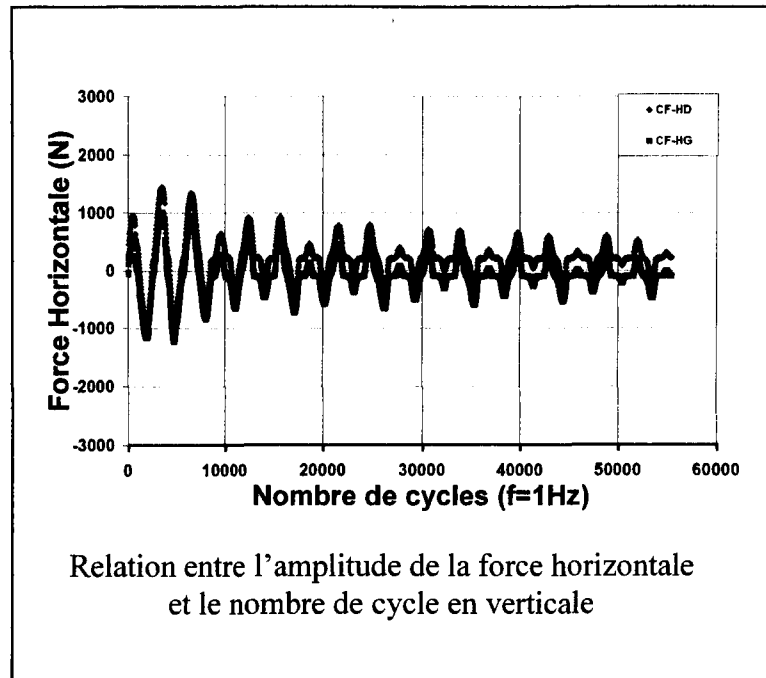


Figure 58b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1$ mm (10 dec.2004)



Échantillon # 10

Figure 59a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1 \text{ mm}$ (12 dec.2004)

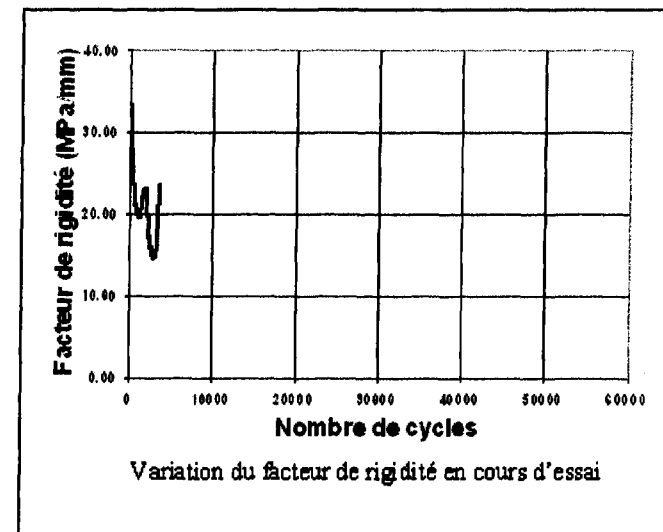
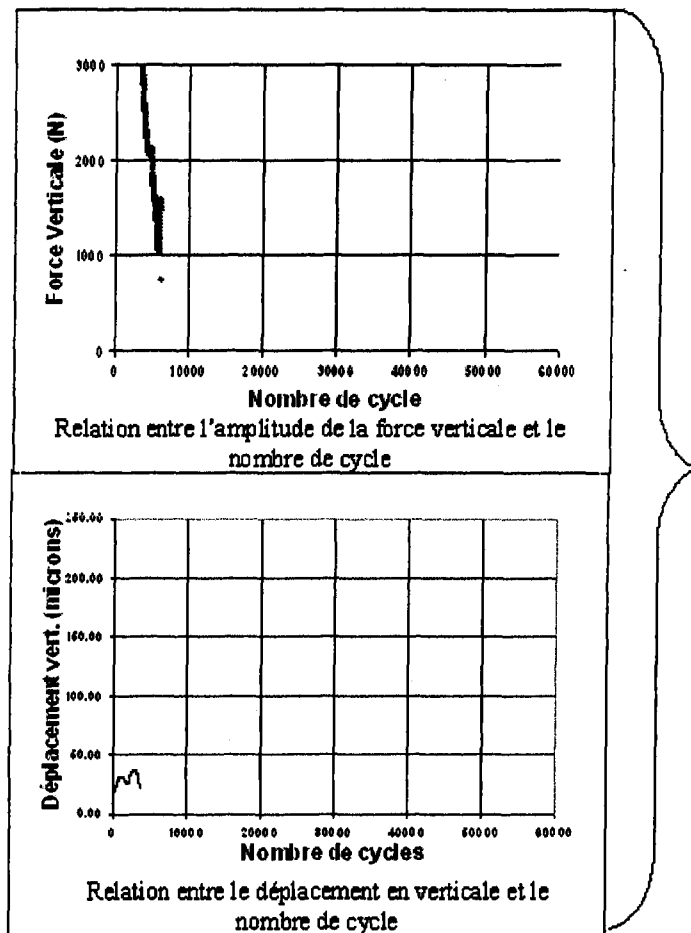
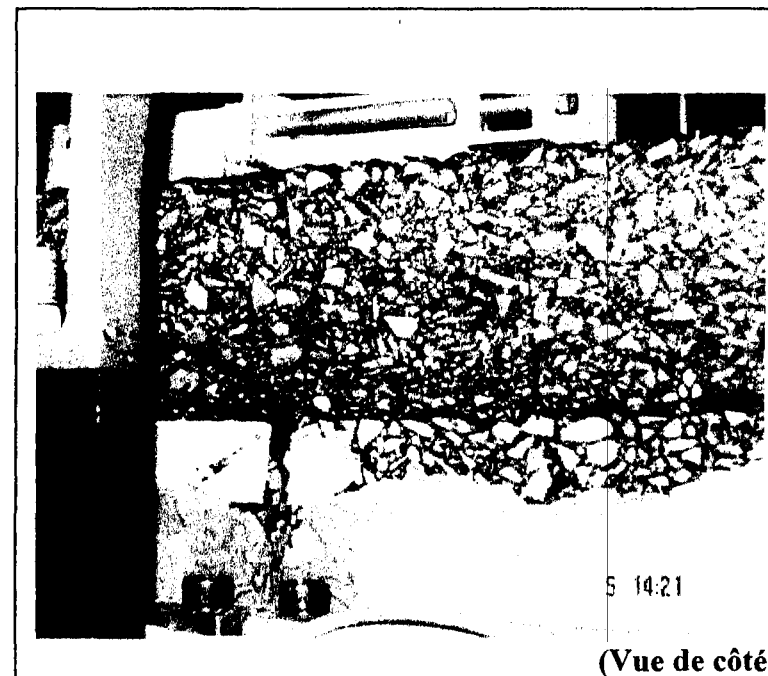
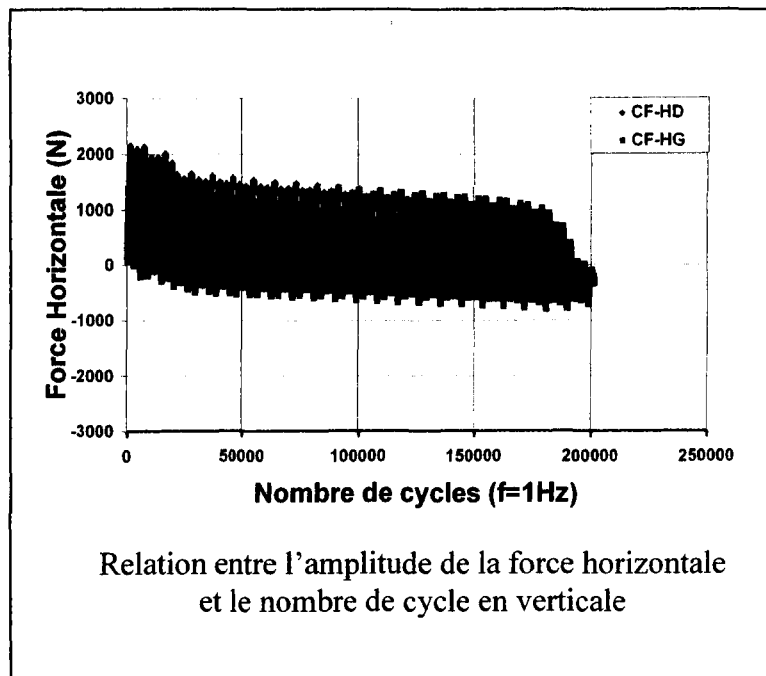


Figure 59b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée prélevé en chantier (EB-10S) avec un agent de liaison : $e_{\text{resurf}}=100 \text{ mm}$; $T_{\text{essai}}=-5^{\circ}\text{C}$; $\Delta X=1 \text{ mm}$ (12 dec.2004)



Échantillon # 11

Figure 60a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfacement avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14 avec une chape d'étanchéité : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{chape}}=15$ mm Tessai=-5°C; $\Delta X=1$ mm (22 dec. 2004)

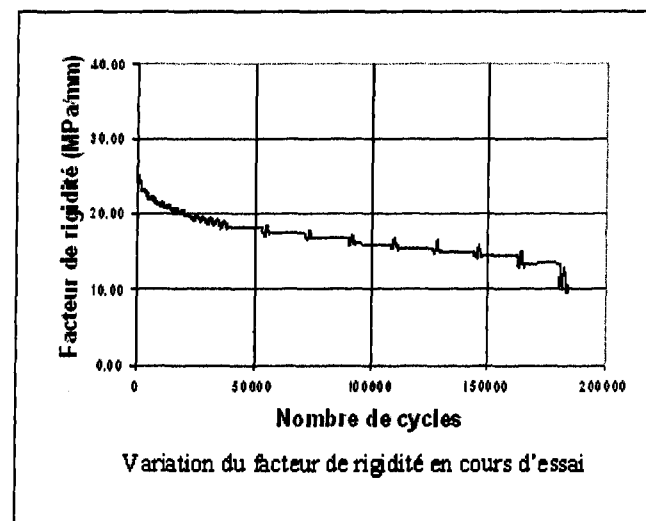
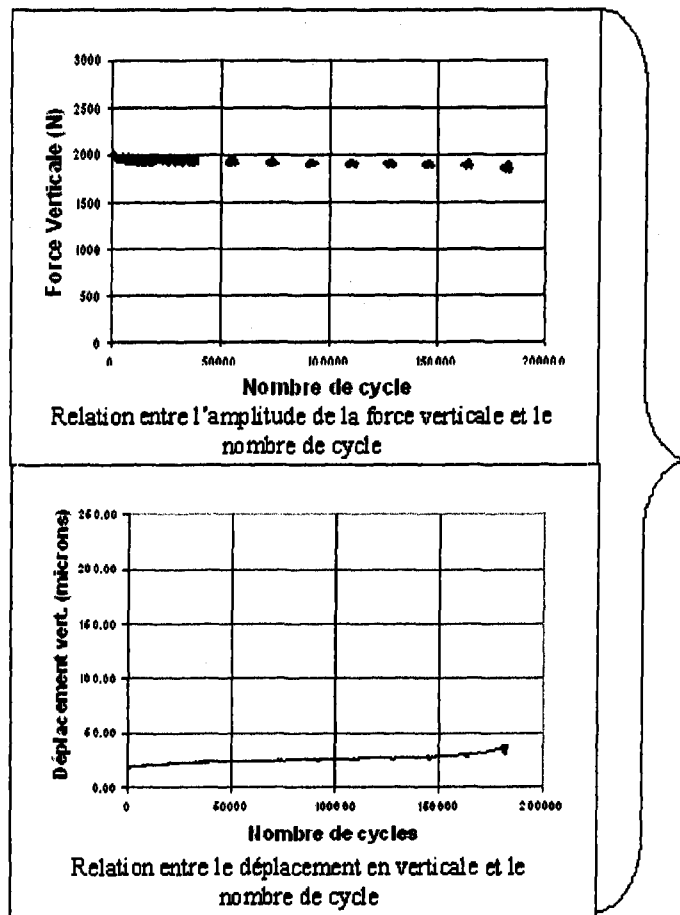
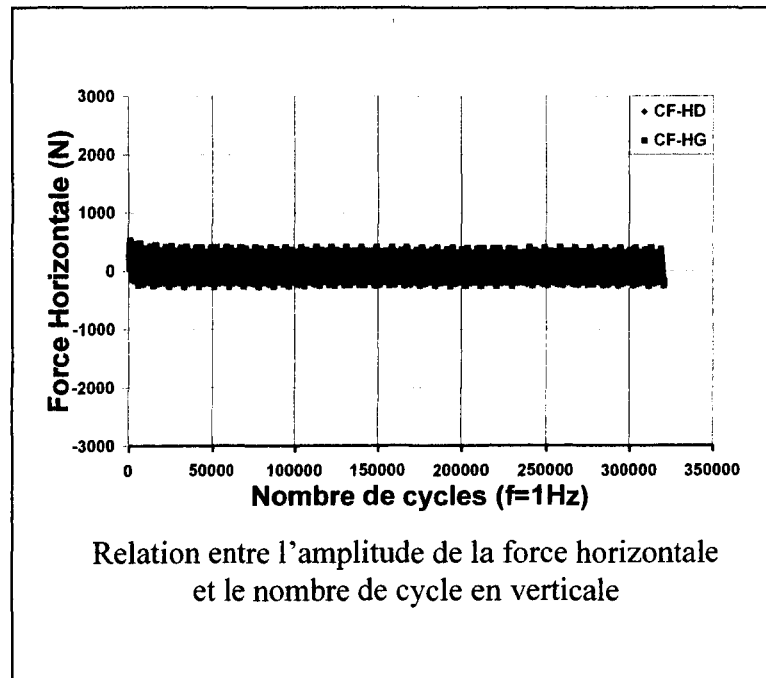


Figure 60b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14 avec une chape d'étanchéité : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{chape}}=15$ mm Tessai=-5°C; $\Delta X=1$ mm (22 dec. 2004)



Échantillon # 12

Figure 61a Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14) avec une membrane d'élastomère : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{membrane}}=3$ mm; $e_{\text{ECF}}=8$ mm Tessai=-5°C; $\Delta X=1$ mm (17 dec. 2004)

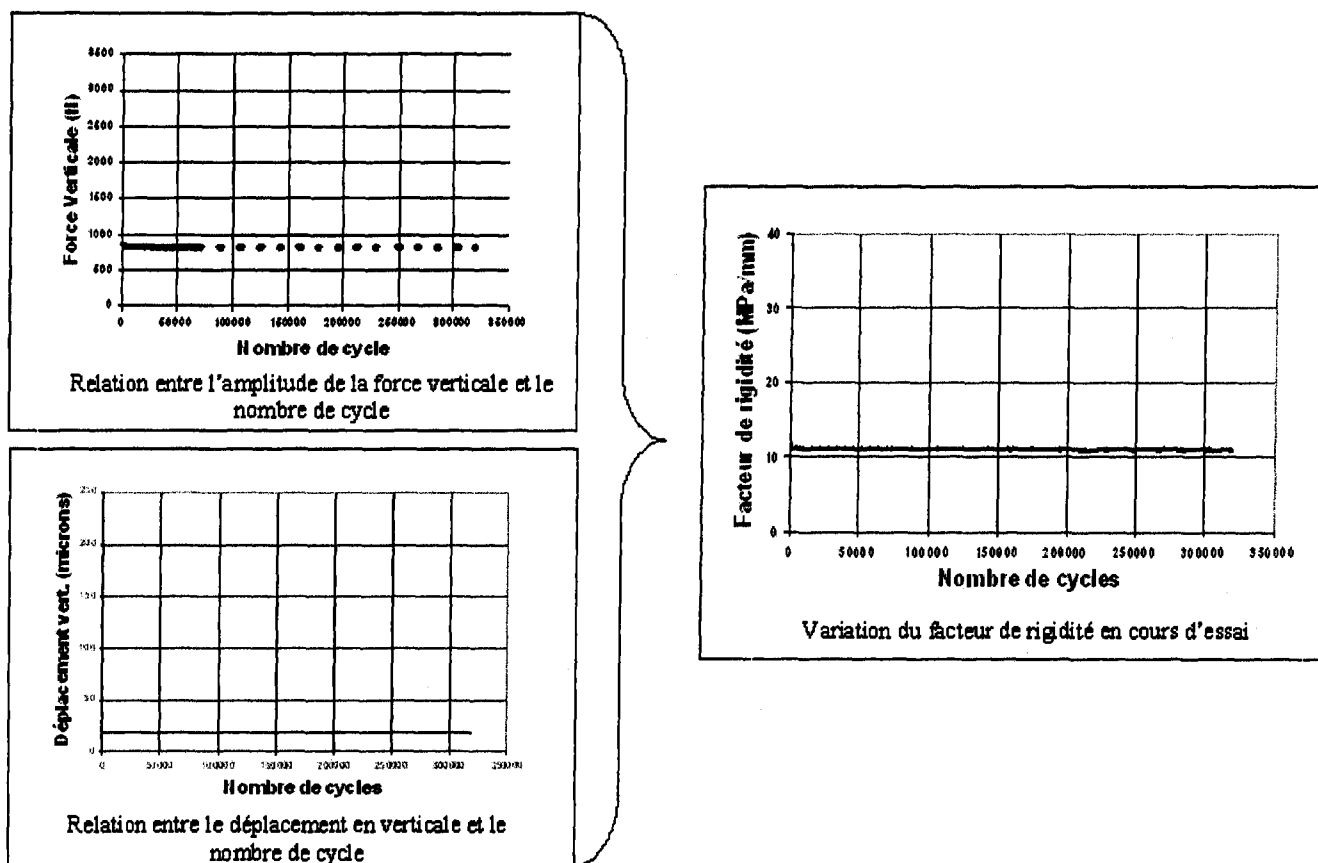


Figure 61b Résultats des essais de remontée d'une fissure pour un resurfaçage avec l'enrobé ESG-10 mis en œuvre sur une base pré-fissurée en EB-14) avec une membrane d'élastomère : $e_{\text{resurf}}=55$ mm; $e_{\text{membrane}}=3$ mm; $e_{\text{ECF}}=8$ mm Tessai=-5°C; $\Delta X=1$ mm (17 dec. 2004)

CHAPITRE 5

SYNTHÈSE ET ANALYSE DES RÉSULTATS

À partir de l'ensemble des résultats présentés dans le Chapitre 4, l'analyse de ces résultats sera présentée suivant quatre sections distinctes. Dans un premier temps, nous observerons la relation entre l'amplitude de la force horizontale en fonction du nombre de cycles verticaux. Dans un deuxième temps, nous analyserons l'influence du type de substrat utilisé en cours d'essai sur les résultats de la remontée des fissures. Ensuite, nous étudierons l'influence de l'épaisseur sur les résultats d'essai et finalement nous comparerons les performances des trois systèmes de resurfaçage soumises aux essais à $+5^{\circ}\text{C}$ et -5°C , tenant compte de la rigidité globale de chaque système.

Dans la perspective d'élaborer une analyse la plus complète possible et de pouvoir éventuellement comparer les résultats des essais avec certaines données de la littérature, il convient de bien préciser les paramètres de sollicitation relatifs aux conditions d'essai auxquelles les différentes éprouvettes testées ont été soumises. Deux paramètres de sollicitation vont s'avérer particulièrement déterminants :

- 1) La déformation horizontale maximale imposée, $\epsilon_{\max}$
- 2) La vitesse moyenne à laquelle cette déformation est imposée au système, $\overline{\dot{\epsilon}}_{\max}$

Par ailleurs, il serait intéressant de comparer l'ensemble des résultats obtenus pour chacun des domaines de température étudiés sur une même base de comparaison. À cet effet, nous proposons de mettre en application le principe d'équivalence temps-température (PETT) pour déterminer un facteur de translation, a_T , permettant la transposition des résultats d'un domaine de température donnée vers un autre domaine ciblé.

5.1 Facteur de translation, a_T , permettant de transposer les résultats d'un domaine de température à un autre

Dans le but de transposer les résultats obtenus à $+5^\circ\text{C}$ dans le domaine de $T_{\text{REF}} = -5^\circ\text{C}$, on peut en première approximation se référer au principe d'équivalence temps-température (PETT). Le PETT permet, sur la base des propriétés intrinsèques des matériaux bitumineux, de calculer une fréquence de sollicitation équivalente, pour laquelle la réponse de l'enrobé à une sollicitation donnée demeure la même pour un autre domaine de température. En effet, on observe, pour un enrobé testé suivant un couple de sollicitation donné (fréquence-température : f_1-T_1), une réponse équivalente lorsqu'on le sollicite dans un autre domaine de température de référence pourvu que l'on ajuste la fréquence de sollicitation ($a_T \cdot f_1 - T_{\text{REF}}$).

La figure 62 montre de façon explicite le principe d'équivalence temps-température à partir des résultats de la mesure des modules complexes de l'enrobé ESG-10 établie en petites déformations ($\epsilon_0 < 100 \mu\text{strain}$). Notons que le PETT est valable pour les essais conduits en petites déformations, soit lorsque l'enrobé présente un comportement viscoélastique linéaire. Toutefois, l'équipe de recherche de l'ÉNTPE de Lyon a récemment mis en relief l'applicabilité potentielle du PETT pour des essais à grandes déformations (essais d'orniérage en conditions homogènes). De surcroît, les premiers résultats de leurs essais portent à croire que les facteurs de translation (valeurs d' a_T) demeurent les mêmes que ceux établis en petites déformations (Di Benedetto, 2005).

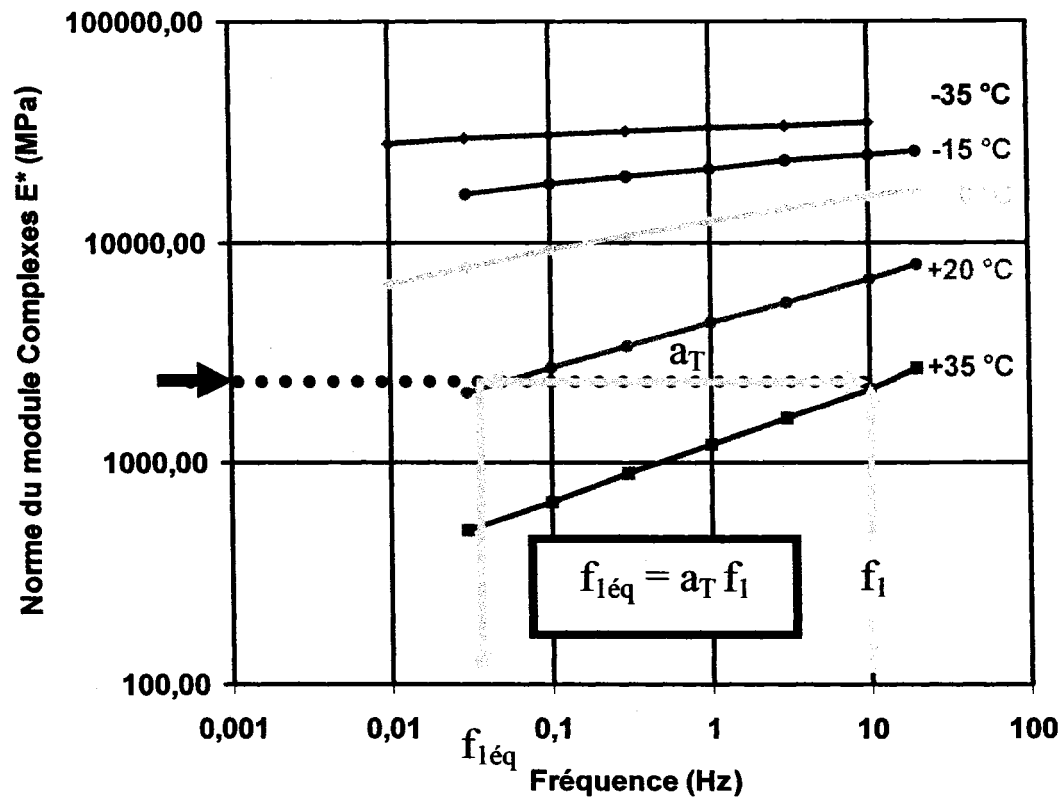


Figure 62 Relation entre la norme du module complexe et la fréquence de sollicitation (le temps de sollicitation), établie en petites déformations pour l'enrobé ESG-10, permettant d'illustrer le principe d'équivalence temps-température (PETT)

Le calcul de la fréquence équivalente se fait à partir de facteurs de translation, a_T , établis expérimentalement. Les facteurs a_T sont inférieurs à l'unité lorsqu'on veut transposer les résultats d'un domaine de température plus élevé à la température de référence (T_{REF}) alors qu'ils sont supérieurs à l'unité dans le cas de la transposition des résultats d'un domaine de plus basse température vers le domaine de référence (T_{REF}). Les facteurs de translation pour l'enrobé ESG-10 et CH-10, ont été déterminés à partir de la mesure des modules complexes dans le cadre d'un autre projet de recherche (Pierre P. et coll, 2005) et sont présentés dans le Tableau XVII.

Pour connaître la valeur d' a_T à appliquer dans le cas des essais de simulation de la remontée des fissures, on se réfère aux relations suivantes :

$$\tau(T) = e^{a+bT+cT^2} \quad \text{avec} \quad \tau(T) = \tau_0 a_T,$$

où, τ_0 correspond au temps de relaxation du matériau à la température de référence.

À partir des valeurs des paramètres a, b et c déterminées pour l'enrobé ESG-10 (Tableau XVII), on estime que la valeur d' a_T correspondante, pour transposer les valeurs de $T = +5^\circ\text{C}$ à la température de référence, en l'occurrence fixée à -5°C ($T_{\text{REF}} = -5^\circ\text{C}$), est égale à 0,0176. En appliquant directement ce facteur de translation aux fréquences de sollicitation des essais réalisés à $+5^\circ\text{C}$, on en déduit alors la fréquence équivalente qu'il convient d'associer aux réponses de ces essais au domaine de température de référence (ici $T_{\text{REF}} = -5^\circ\text{C}$).

Comme nous l'avons indiqué au Tableau V, la fréquence de sollicitation horizontale est constante pour les deux températures d'essai et correspond à une valeur de $3,2 \times 10^{-4}$ Hz. En appliquant le facteur de translation établi précédemment, la fréquence de sollicitation équivalente à -5°C pour les essais conduits à $+5^\circ\text{C}$ est de $5,6 \times 10^{-6}$ Hz, donc nettement plus faible que celle appliquée pour les essais conduits à -5°C . De la même façon, pour le mouvement vertical, la fréquence de sollicitation imposée pour les deux températures d'essais a été fixée à 1 Hz. En conséquence, la fréquence de sollicitation équivalente à -5°C pour les essais conduits à $+5^\circ\text{C}$ est d'environ 0,02 Hz.

5.2 Déformation horizontale maximale imposée, ϵ_{max}

Certes la fréquence et la vitesse auxquelles on impose une déformation à un enrobé influencent la performance de ce dernier: une vitesse lente lui permet de «s'adapter» (caractère visqueux des matériaux bitumineux) de sorte que le processus d'endommagement sera différent de celui associé à une vitesse de sollicitation plus

rapide. Par ailleurs, dans le cas d'une sollicitation cyclique, la déformation maximale imposée va représenter un paramètre déterminant quant à la performance escomptée puisque tout matériau présente une limite admissible de déformation avant rupture. Notamment dans le cas d'essais cycliques, tels que les essais de fatigue, il est admis que la durée de vie d'une éprouvette sera d'autant plus courte que l'amplitude de déformation imposée, de façon répétitive, sera élevée. À ce titre, des amplitudes de déformation de l'ordre de 80 à 100 μ déformation (μ strain), imposées à une fréquence de 10 Hz (condition usuelle pour les essais de fatigue) conduisent à des durées de vie de l'ordre du million de cycles (Pierre P et coll., 2005).

Dans le processus de la remontée des fissures, on peut admettre que l'intensité des efforts de traction induits au niveau de l'interface, dans la zone à proximité de l'entaille, va gouverner essentiellement la durée de vie du resurfaçage quant au phénomène de la remontée de la fissure. Dans ce contexte l'exercice visant à calculer le degré de déformation du matériau et la vitesse à laquelle elle est imposée, sera conduit par rapport aux données relatives à l'interface seulement. Comme souligné précédemment, pour chacun des essais, un capteur de déplacement (un extensomètre) a été placé au niveau de l'interface pour mesurer en continu le degré de sollicitation.

Pour calculer les déformations correspondantes aux déplacements mesurés, il faut connaître avec précision la longueur référentielle de mesure ($\epsilon = \Delta L/L$ avec ΔL donné par l'extensomètre à l'interface). La valeur de L à prendre en considération est difficile à établir. Bien que la longueur physique correspondante à l'espacement des repères collés à la surface de l'éprouvette pour permettre de fixer l'extensomètre soit connue, $L = 55\text{mm}$, cette longueur couvre plusieurs zones pour lesquelles les conditions limites sont variables. La Figure 63 illustre la situation.

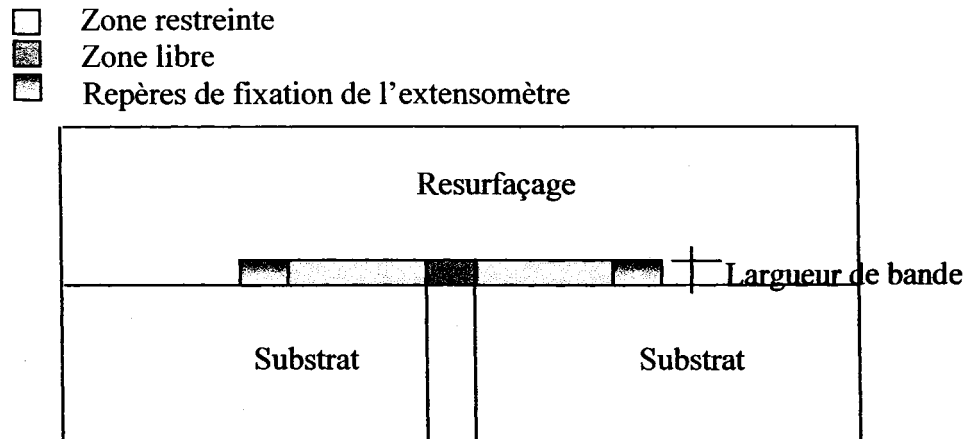


Figure 63 Croquis illustrant les différentes zones existantes entre les repères de fixation de l'extensomètre

D'autre part, il est important de souligner ici que la largeur de la bande de mesure n'est pas négligeable et qu'elle n'intègre pas uniquement les déformations de l'interface. Finalement, il ne faut pas oublier que le positionnement des repères est ponctué d'une certaine incertitude : il conviendra ultimement de définir une méthode plus rigoureuse quant au positionnement de ces repères.

En définitive pour calculer la déformation horizontale maximale imposée, deux cas de figures s'imposent en faisant l'hypothèse que:

- le déplacement horizontal mesuré à l'interface est représentatif du cumul d'une déformation uniforme sur l'ensemble de la zone de mesure délimitée par la position des 2 repères de fixation : $L = 55\text{mm}$, $\varepsilon_{\max}^a$
- le déplacement horizontal mesuré à l'interface est uniquement réparti sur la zone libre, au droit de l'entaille : $L = 5\text{mm}$, $\varepsilon_{\max}^b$

Dans ces conditions, le calcul de la déformation horizontale maximale imposée se fait en référence aux déplacements maximaux mesurés à l'interface pour chacune des

éprouvettes testées. Ces déplacements sont donnés aux Tableaux XXI et XXII et les valeurs des déformations maximales imposées correspondantes ont été calculées.

Le tableau XXIII présente la synthèse des résultats des essais de remontée des fissures pour le groupe d'éprouvettes dont l'épaisseur de resurfacement en enrobé ESG-10 est égal à 55mm.

Tableau XXIII

Synthèse des résultats des essais de simulation de la remontée des fissures pour le groupe d'éprouvettes dont l'épaisseur de resurfacement (ESG-10) est égale à 55mm

			ΔH (μm)	f_r $\times 10^6$ (Hz)	ϵ_{max}^a ($\mu strain$)	ϵ_{max}^b ($\mu strain$)	$\overline{\epsilon}_{max}$ ($\mu strain/h$)	a_T	f_r^{equiv} $\times 10^6$ (Hz)	$\overline{\epsilon}_{max}^{equiv}$ ($\mu strain/h$)	N_f (cycles)	F_H (N)
-5°C	EB-14	REF-Labo	72	320	1309	14400	3020	1	320	3016	35000	4890
		Chape	110	320	2000	22000	4615	1	320	4608	180000	4160
		SAMI	30	320	545	5995	1258	1	320	1256	320000	1356
	EB-10S	REF-InSitu	66	320	1200	13200	2769	1	320	2765	32500	4382
+5°C	EB-14	REF-Labo	78	320	1418	15598	3272	0,018	6	58	25000	4080
		Chape	279	320	5072	55792	11705	0,018	6	206	22000	6357
		SAMI	147	320	2673	29403	6169	0,018	6	108	178000	2810
	EB-10S	REF-InSitu	304	320	5527	60797	12755	0,018	6	224	4000	7755

- (a) ϵ_{max} est calculé en présumant que le déplacement horizontal à l'interface est uniformément réparti entre les repères de mesure : espacement entre les repères = 55mm
- (b) ϵ_{max} est calculé en présumant que le déplacement horizontal à l'interface est uniquement réparti au droit de la fissure : ouverture de la fissure = 5mm

5.3 Vitesse moyenne de la déformation horizontale maximale imposée, $\dot{\epsilon}_{\max}$

À partir du moment où la valeur de $\epsilon_{\max}$ est connue, le calcul de la vitesse va dépendre directement de la fréquence de sollicitation imposée. Cependant, la vitesse de sollicitation varie en cours d'essai du fait que le déplacement est imposé suivant un profil sinusoïdal (courbe en rouge de la Figure 64). Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de la vitesse de déformation imposée pour chacun des essais, il est proposé de calculer une vitesse moyenne par la linéarisation du profil du déplacement imposé (courbe en bleu de la Figure 64). En conséquence, la vitesse de déformation horizontale maximale imposée est déterminée en faisant l'hypothèse que la déformation maximale est imposée progressivement de façon linéaire pour une période de sollicitation fixe de 3120 sec., soit :

$$\dot{\epsilon}_{\max} (\mu\text{strain/h}) = \frac{2 \epsilon_{\max} (\mu\text{strain})}{T_c (\text{h})} = \frac{2 \cdot 3600 \epsilon_{\max} (\mu\text{strain})}{T_c (\text{sec})} = 7200 f_r (\text{Hz}) \epsilon_{\max} (\mu\text{strain})$$

À partir de la relation précédente, on pourra également transposer la vitesse de sollicitation des essais réalisés à +5°C au domaine de T_{REF} (-5°C) en calculant une vitesse équivalente de déformation, soit :

$$\dot{\epsilon}_{\max} (\mu\text{strain/h}) = 7200 f_r a_T \epsilon_{\max} (\mu\text{strain})$$

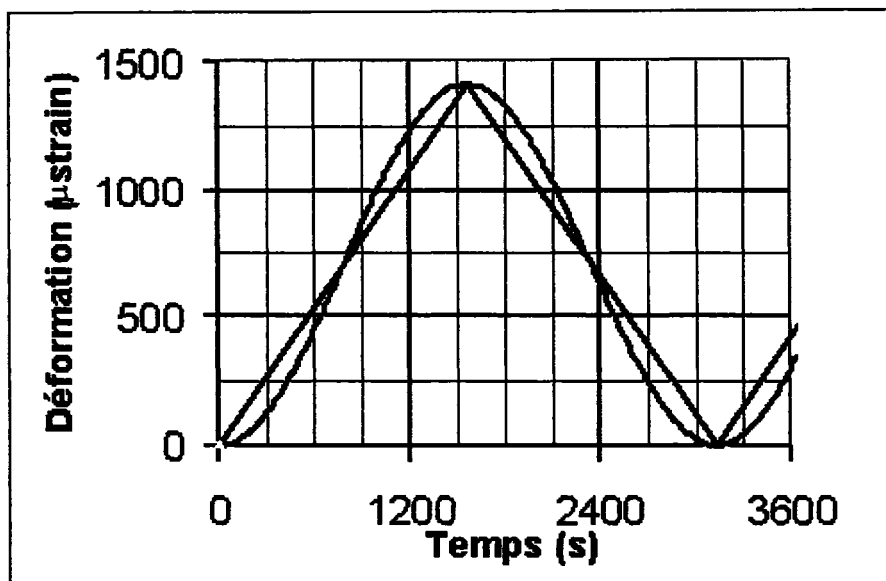


Figure 64 Évolution de déplacement horizontal imposé en cours d'essai

5.4 Analyse des résultats pour les deux températures mises à l'essai

À partir de l'ensemble des résultats présentés aux Tableaux XXI et XXII, nous pouvons mettre en relief la performance des différents systèmes testés vis-à-vis de la remontée des fissures en cherchant à regrouper les résultats sur une même base de référence, en l'occurrence $T_{REF} = -5^{\circ}\text{C}$. Pour cet exercice visant à mettre en commun l'ensemble des résultats, nous nous limiterons au traitement des résultats associés aux éprouvettes dont l'épaisseur du resurfaçage était de l'ordre de 55mm. En effet, compte tenu du mode de rupture observé pour ce groupe d'éprouvettes, on peut admettre que leur durée de vie se rapporte essentiellement au phénomène de la remontée des fissures (rupture en mode B – voir Tableaux XXI et XXII). Par contre, il est clair que la durée de vie mesurée pour le groupe d'éprouvettes de forte épaisseur (100mm) était plutôt tributaire de la qualité de la compaction en bas de couche que de leur performance vis-à-vis de la remontée des fissures proprement dite (rupture suivant un plan parallèle à l'interface substrat-

resurfaçage : rupture en mode C). Ce dernier aspect sera traité plus en détail à la section §5.8.

La Figure 65 présente la relation entre la durée de vie et la fréquence de sollicitation équivalente en référence à la température de référence, T_{REF} , pour l'ensemble des résultats des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 55mm. Pour chacun des points, la valeur de la vitesse de déformation correspondante est indiquée. Il est difficile de porter une appréciation éclairée sur l'ensemble des résultats puisque d'une part la vitesse de déformation varie d'un essai à l'autre et, d'autre part, la déformation maximale imposée diffère également d'un essai à l'autre (voir Tableau XXIII – $\overline{\epsilon}_{max}$). Cette dernière est relativement critique dans le cadre des essais réalisés puisque les déformations maximales imposées sont importantes, soit de l'ordre de grandeur des limites des déformations admissibles à la rupture d'un enrobé type soumis à des efforts de traction. À cet effet, la Figure 66 présente la relation contrainte-déformation établie en traction directe sur éprouvettes cylindriques ($\phi 80 \times 120 \text{ mm}^2$) pour diverses températures et vitesses de sollicitation pour un enrobé bitumineux confectionné à partir d'un bitume standard d'indice de pénétration 50-70. À titre d'indication, une vitesse de déformation de $300 \times 10^{-6} \text{ m/m/h}$ ($300 \text{ } \mu\text{stain/h}$) correspond environ à la vitesse de sollicitation en jeu lors de l'essai de retrait thermique empêché (TSRST) alors que la vitesse de déformation de $45\,000 \times 10^{-6} \text{ m/m/h}$ ($45\,000 \text{ } \mu\text{stain/h}$) s'apparente plutôt à la vitesse de chargement lorsque l'on évalue la performance d'un bitume pur à basse température (mesure de la déformation à la rupture traction directe).

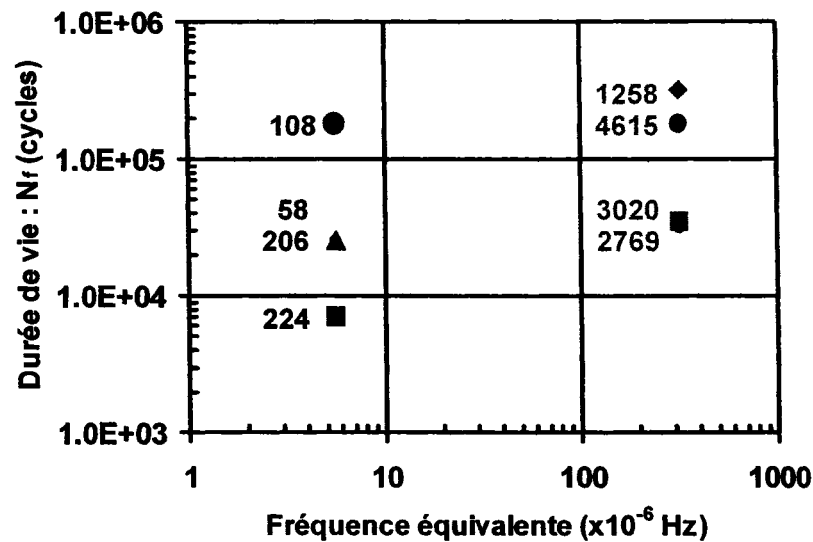


Figure 65 Relation entre la durée de vie, N_f , et la fréquence équivalente de sollicitation pour l'ensemble des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 55mm en référence à une température de -5°C ($\epsilon_{\text{rReSurf}} = 55\text{mm}$; ReSurf = ESG-10)

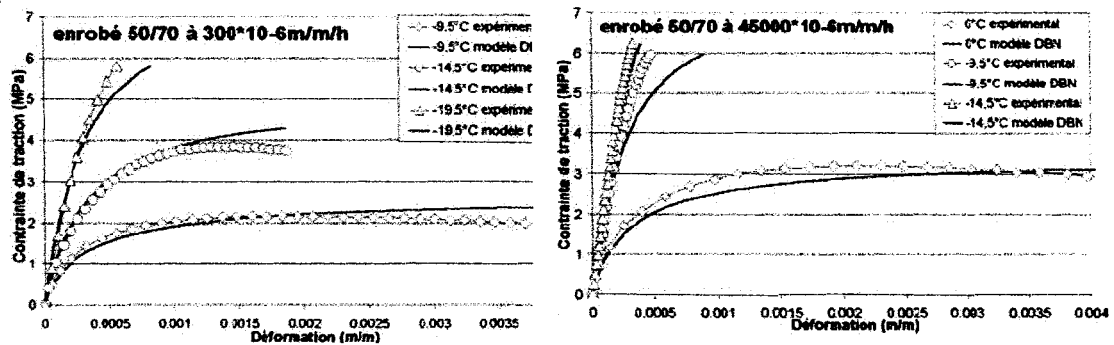


Figure 66 Relations contrainte-déformation établies en traction directe sur éprouvettes cylindriques ($\phi 80 \times 120\text{mm}^2$) pour diverses températures et vitesses de sollicitation (Ollard 2003)

Selon les résultats présentés à la figure 66, on constate que pour une vitesse de déformation voisine de $300 \mu\text{stain/h}$ et une température d'essai de $-9,5^{\circ}\text{C}$, la contrainte

admissible est relativement faible, inférieure à 2,2 MPa, et qu'elle est décroissante (début de l'endommagement dans la masse) pour des déformations supérieures à 0,15% (0,0015). En considérant les données du Tableau XXIII, le niveau de déformation imposée à -5°C pour les essais de simulation, de la remontée d'une fissure est comprise, entre 0,13% ($\varepsilon_{\max}^a$) et 1,39% ($\varepsilon_{\max}^b$), c'est-à-dire passablement élevée.

D'autre part, les résultats présentés à la Figure 66, témoignent de l'influence de la vitesse de déformation imposée quant à la réponse de l'enrobé. À -9,5°C, les résultats indiquent que pour une vitesse rapide de sollicitation la contrainte admissible de l'enrobé augmente par rapport à une vitesse lente (de 2,2 MPa à 6,0 MPa). De plus, le matériau présente un changement radical de comportement passant de ductile pour une vitesse lente (300 μ strain/h) à fragile pour une vitesse rapide (45000 μ strain/h). En effet, la Figure 66 montre pour la vitesse rapide à -9,5°C une rupture de l'enrobé à moins de 0,05% (0,0005).

En appliquant le PETT aux résultats obtenus pour les essais réalisés à +5°C, on peut calculer la vitesse de déformation équivalente à -5°C. Les vitesses de déformation équivalente (Tableau XXIII) sont nettement plus faibles (58/210/111 et 229) comparativement à celles correspondantes aux essais réalisés à -5°C (3020/4615/1258 et 2769) de sorte que le niveau de sollicitation des éprouvettes testées à +5°C est nettement moins sévère. Cependant, à +5°C, on constate que l'intensité de la déformation imposée, $\varepsilon_{\max}$, est particulièrement critique avec une moyenne de l'ordre de 0,37% et 4,04% (pour $\varepsilon_{\max}^a$ et $\varepsilon_{\max}^b$ respectivement) donnant lieu à des conditions d'essai nettement plus sévères que celles établies pour les essais à -5°C (valeurs de 0,13% et 1,39% pour $\varepsilon_{\max}^a$ et $\varepsilon_{\max}^b$ respectivement) de sorte que dans l'ensemble les durées de vie des éprouvettes testées à +5°C sont nettement moindres que celles établies pour les essais à -5°C.

5.5 Relation entre la force horizontale, F_H , et la durée de vie, N_f , et la vitesse de déformation imposée

La Figure 67 présente la relation entre l'amplitude maximale de la force horizontale de transfert dans le resurfaçage mesurée dans le premier cycle horizontal (~3500 secondes) et la vitesse de déformation imposée. La force horizontale est induite par les mouvements imposés horizontalement et verticalement. On constate à la figure 68a que l'augmentation de la vitesse de déformation imposée horizontalement à une incidence directe sur la force horizontale induite dans l'enrobé de resurfaçage. Le niveau de corrélation est relativement acceptable pour les essais conduits à la température de -5°C ($R^2 = 0,75$) et de $+5^{\circ}\text{C}$ ($R^2 = 0,85$). À titre indicatif, nous avons porté en graphique (Figure 68b) l'ensemble des résultats en retranchant les valeurs de l'essai REF-labo ($+5^{\circ}\text{C}$). En conséquence, le degré de corrélation est nettement amélioré ($R^2=0,98$).

Il apparaît donc que la vitesse de déformation imposée représente un paramètre déterminant quant à la performance des essais de simulation de la remontée de la fissure pour les essais réalisés. Pour mettre en perspective l'importance de ce paramètre, la Figure 68 présente la relation entre la durée de vie et la vitesse de déformation imposée en cours d'essai. Tout comme précédemment, en excluant du groupe les valeurs de l'essai REF-Labo à $+5^{\circ}\text{C}$ (Figure 68c), la relation entre la vitesse de déformation et la durée de vie est excellente ($R^2 = 0,99$).

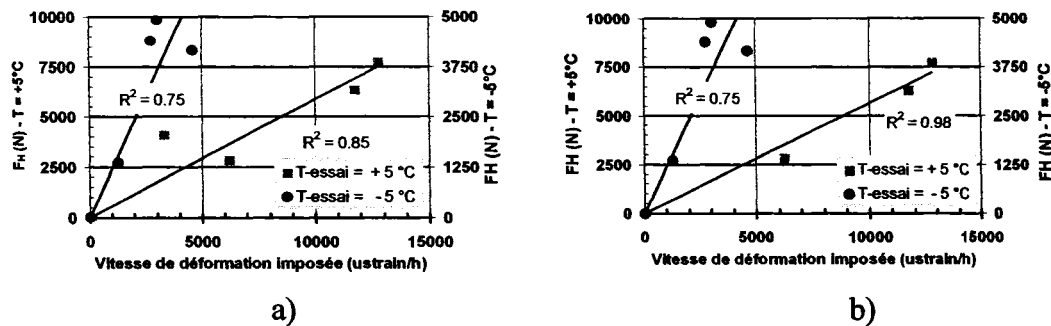


Figure 67 Relation entre la force horizontale et la vitesse de déformation imposée pour l'ensemble des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfacement de 55mm ($e_{rReSurf} = 55\text{mm}$; $ReSurf = \text{ESG-10}$)

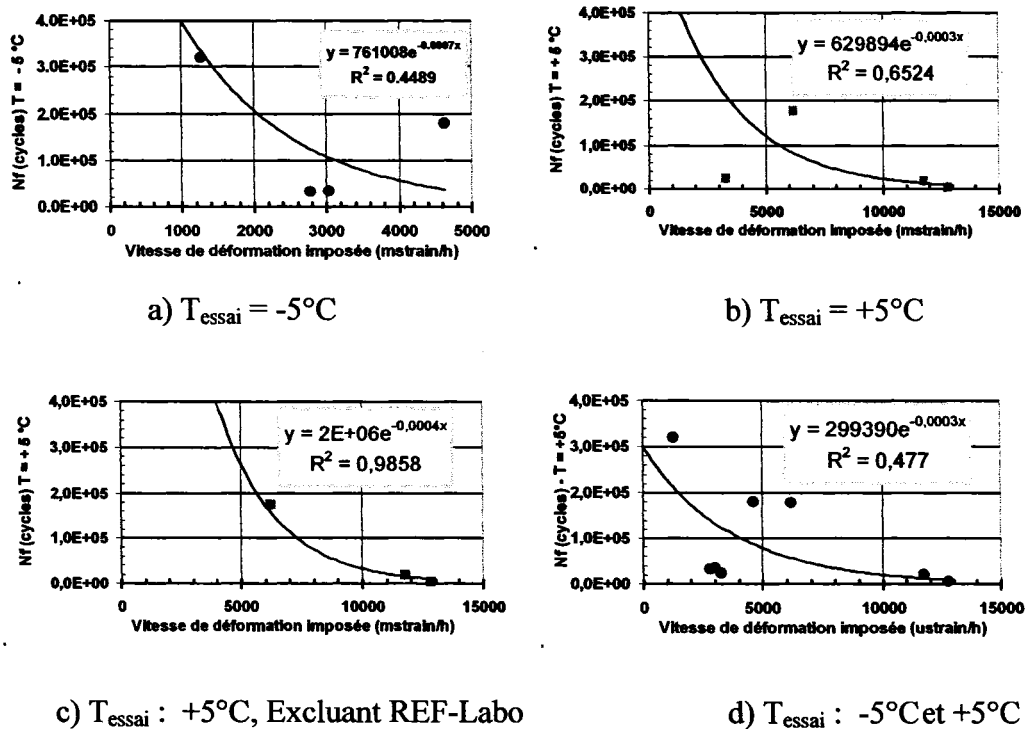


Figure 68 Relation entre la durée de vie et la vitesse de déformation imposée pour l'ensemble des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfacement de 55mm ($e_{rReSurf} = 55\text{mm}$; $ReSurf = \text{ESG-10}$)

5.6 Influence du type de substrat utilisé en cours d'essai

Une série d'essais a été réalisée en utilisant un substrat prélevé sur route, soit le EB-10S. Les Figures 69 et 70 présentent la relation entre la force horizontale en fonction du type de substrat utilisé.

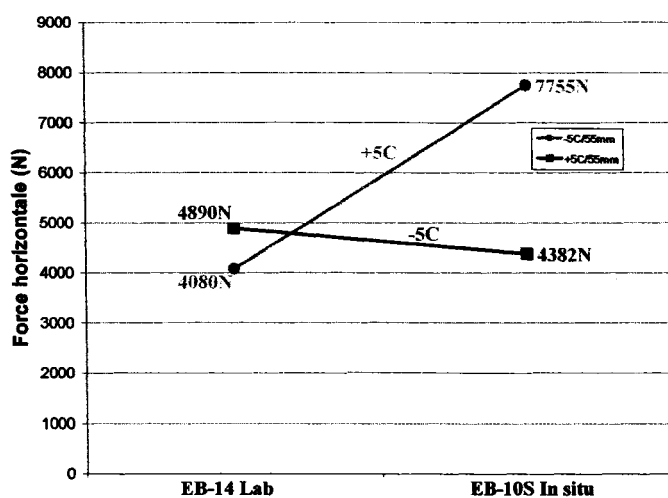


Figure 69 Force horizontale en fonction du type de substrat ($e_r=55\text{mm}$; resurfaçage=ESG-10)

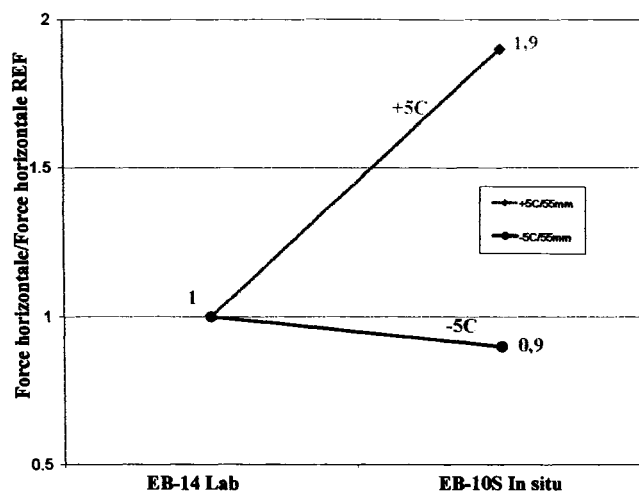


Figure 70 Force horizontale relative au substrat référence en fonction du type de substrat ($e_r=55\text{mm}$; resurfaçage=ESG-10)

Les résultats des essais effectués avec de resurfaçages de 100 mm d'épaisseur sont exclus des graphiques pour la même raison que celle évoquée précédemment (§5.4 – rupture mode C pour $e_r=100$ mm). Il est à noter que pour le même resurfaçage, le fait que le substrat soit plus rigide dû notamment à l'oxydation du bitume en condition in situ (EB-10S) entraîne une augmentation de la force de transfert. Cette augmentation est nettement plus marquée pour les essais effectués à $+5^\circ\text{C}$ (Figures 69 et 70). Comme nous l'avons mentionné précédemment, les essais à $+5^\circ\text{C}$ sont plus sévères et mettent en relief de façon plus significative un raidissement du substrat.

5.7 Relation entre l'amplitude du mouvement horizontal imposé (Δ_H) et le type de substrat

Les Figures 71 et 72 présentent la relation entre le déplacement horizontal à l'interface et en surface (TOP) respectivement en fonction du type de substrat utilisé.

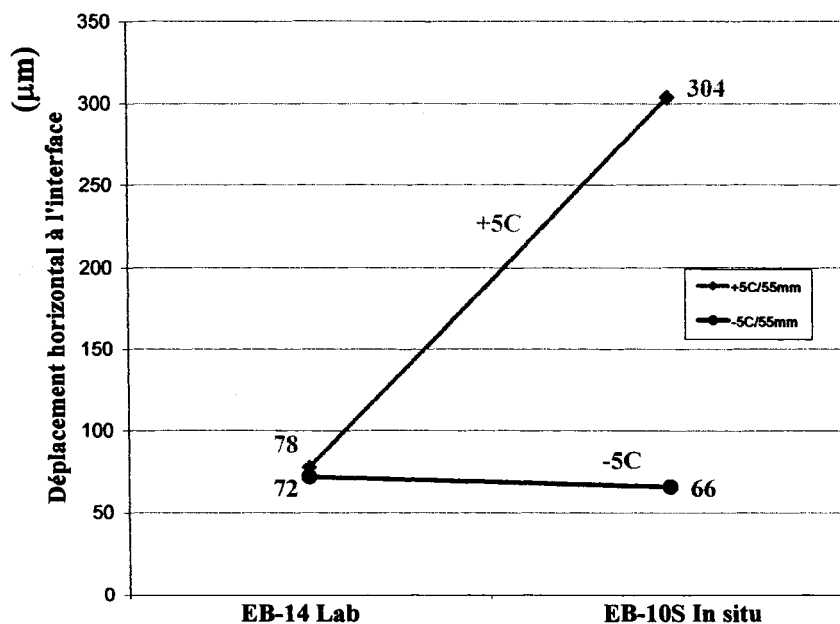


Figure 72 Déplacement horizontal à l'interface en fonction du type de substrat ($e_r=55\text{mm}$; resurfaçage=ESG-10)

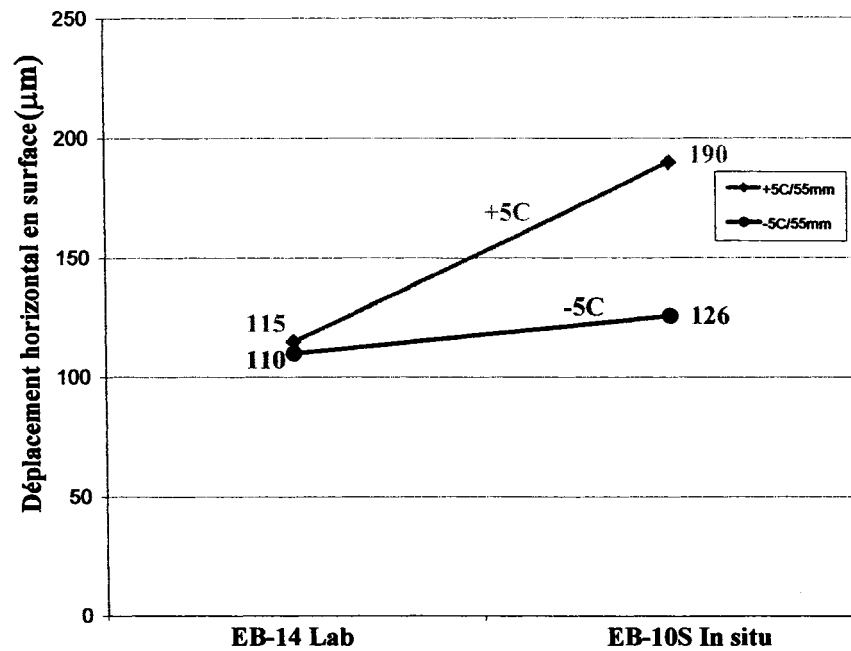


Figure 72 Déplacement horizontal en surface en fonction du type de substrat ($e_r=55\text{mm}$; resurfaçage=ESG-10)

Il est important de souligner le fait que les déplacements max/min mesurés à l'interface et en surface (TOP) sont inversés : lorsque le resurfaçage à l'interface est allongé, on observe un «raccourcissement» induit dans la fibre supérieure en surface (TOP). La Figure 73 montre l'inversion entre les déplacements mesurés à l'interface et à la surface (TOP).

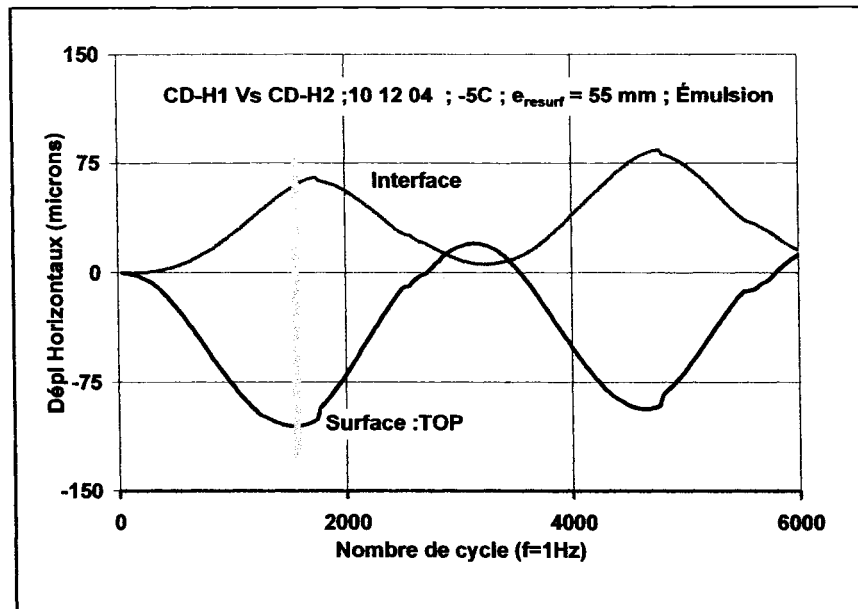


Figure 73 Relation entre les déplacements horizontaux mesurés à l'interface et à la surface du resurfaçage et le nombre de cycles verticaux

Les échantillons (EB-10S) prélevés sur l'autoroute 55 dans la région de Richmond ne permettait pas de réaliser les essais de module complexe. Néanmoins, il est hors de tout doute, suite aux essais de performance des systèmes de resurfaçage réalisés avec cet enrobé EB-10S, que sa rigidité est nettement supérieure à celle de l'enrobé EB-14 confectionné en laboratoire. Les déplacements de part et d'autre de l'entaille au niveau de l'interface sont nettement plus intenses lorsque la rigidité du substrat augmente (voir Figures 71 et 72). Les taux de déformation peuvent être calculés à partir de la distance correspondante entre les repères intégrant l'ensemble des déformations mesurées. Les déformations calculées à l'interface et en surface (TOP) sont données au Tableau XXIV pour les essais effectués à +5°C. Le calcul des déformations au niveau de l'interface a été effectué en supposant que le déplacement mesuré est tributaire de la déformation du resurfaçage au niveau de l'entaille uniquement ($\Delta L=5\text{mm}$).

Tableau XXIV

Déplacements mesurés à l'interface et en surface suivant le type de substrat utilisé quant aux essais réalisés à $T=+5^{\circ}\text{C}$ ($\Delta_H=2\text{ mm}$)

		Déplacements mesurés		Déformations			
		Interface	Surface	Interface ⁽¹⁾		Surface ⁽²⁾	
Épaisseur	Substrat	(μm)	(μm)	%	(μs)	%	(μs)
55 mm	EB-14	78	115	0,12	1200	0,07	697
	EB-10S _{InSitu}	304	190	0,46	4676	0,12	1152
100 mm	EB-14	179	190	0,28	2770	0,12	1152
	EB-10S _{InSitu}	424	238	0,66	6524	0,14	1442

⁽¹⁾ L'espacement entre les repères de mesure à l'interface est de 5 mm (voir Figure 20).

⁽²⁾ L'espacement entre les repères de mesure en surface est de 165 mm (voir Figure 20).

Les résultats du Tableau XXIV soulignent un point critique du montage mis en oeuvre et qu'il conviendra de corriger. En effet, le déplacement imposé de 2 mm à la base du substrat conduit à des efforts internes qui diffèrent d'un essai à l'autre en fonction du type de substrat. Suivant les données présentées au Tableau XXIV, un facteur d'accroissement d'intensité de charge en regard au type de substrat est établi et varie de 2,3 à 3,9 pour l'interface et de 1,3 à 1,6 pour la surface (TOP). Également, on constate au Tableau XXIV que le degré de sollicitation appliqué au système de resurfaçage (la déformation induite à l'interface) varie lorsque l'épaisseur du resurfaçage augmente de 55 mm à 100 mm, et ce, pour les deux types de substrats. Pour permettre une comparaison juste des différents systèmes de resurfaçage, il conviendra de contrôler non pas le déplacement imposé à la base du substrat tel qu'il en est actuellement, mais plutôt de contrôler le déplacement imposé au niveau de l'entaille, à la base du resurfaçage.

5.8 Influence de l'épaisseur de resurfaçage sur les résultats d'essai

Bien que les résultats présentés aux Tableaux XXI et XXII font référence aux premiers cycles de sollicitation soient tout à fait cohérents et pertinents, les résultats des essais à la rupture pour les éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 100 mm sont de notre point de vue, peu représentatifs et difficilement exploitables. Deux éléments permettent d'expliquer en grande partie ce constat : un effet d'échelle marqué et un rendement au compactage inadéquat. En effet, la mise à l'essai d'un corps d'épreuve dont le rapport des dimensions épaisseur/largeur est proche de l'unité s'avère critique, l'échantillon étant peu représentatif des conditions réelles que l'on cherche à simuler. Le fait d'augmenter l'épaisseur de resurfaçage a pour conséquence d'intensifier le degré de sollicitation du corps d'épreuve en dehors des zones d'étude au pourtour de l'entaille. L'augmentation requise de la force verticale à imposer pour atteindre l'amplitude du déplacement vertical ciblé (20 μm) accentue la contrainte dans l'enrobé suivant un plan perpendiculaire à celui de l'entaille et parallèle à l'interface de collage substrat-resurfaçage. Or, à la base de la couche de resurfaçage compacté à l'aide du compacteur à charge roulante MLPC, le degré de compacité atteint est largement moindre que celui obtenu pour des resurfaçages plus minces (55 mm). D'autres études (Pierre P. et coll, 2005) visant à mettre en relief l'homogénéité des plaques compactées à l'aide du compacteur MLPC ont montré que le degré de compaction en bas de plaque est nettement moindre que celui obtenu en haut de plaque, à proximité de la charge mobile de compaction.

Le mode de mise en œuvre de l'enrobé sur chaussées (épandage du matériau foisonné par couche et compactage par passages successifs de compacteurs à la surface) confère au matériau une certaine anisotropie (gradient de densité dans le sens de l'épaisseur de la couche, orientation privilégiée des grains par le compactage). De la même façon, les éprouvettes fabriquées en laboratoire présentent ce type de propriétés. Des mesures du

module en traction-compression réalisées sur des éprouvettes cylindriques prélevées suivant trois axes de carottage dans des plaques d'enrobé fabriquées en laboratoire (Di Benedetto et de la Roche 1998), ont montré des variations pouvant atteindre 20%. Le compacteur de plaques permet la fabrication en laboratoire de plaques d'enrobé ayant des caractéristiques semblables aux enrobés mis en œuvre sur chantier. Le compactage d'un enrobé sur chantier avec un rouleau compacteur a pour effet de forcer les granulats à prendre une orientation particulière créant ainsi un matériau avec une structure fortement anisotrope. Pour minimiser ces effets, on réalise souvent les essais sur des éprouvettes prélevées par carottage (ou sciage) au cœur du matériau. Dans les calculs de dimensionnement routier, on fait l'hypothèse d'isotropie du matériau. Pour le compactage, une séquence de passe est décrite dans la norme préliminaire du MTQ LC 26-400 qui s'inspire de la norme française NF P 98-250-2 partie 2 : compactage. Cette procédure a été minutieusement suivie pour la compaction des corps d'épreuve. Pour le compactage des corps d'épreuve, il faut impérativement chercher à limiter les différentielles de densité au sein de la plaque, lesquelles sont inévitables dans les extrémités et le pourtour (effets de bout : densité plus faible) et dans les plans parallèles éloignés de la charge roulante (la densité diminue en fonction de la profondeur).

L'effet combiné d'une compacité moindre et de l'intensité de la charge verticale imposée à l'essai explique le mode de rupture particulier des éprouvettes de forte épaisseur c'est-à-dire une rupture suivant un plan parallèle à l'interface substrat-resurfaçage (mode C).

En définitive, l'étude de l'épaisseur aurait été plus rigoureuse en limitant l'épaisseur dans un intervalle de 35 à 65 mm. Une étude à partir de 3 épaisseurs cibles (35mm; 50mm; 65mm) permettrait de mettre en relief l'influence de l'épaisseur sur la durée de vie et d'extrapoler le rendement pour des épaisseurs plus significatives.

5.9 Influence du type de système de resurfaçage quant à la durée de vie des éprouvettes

Pour les deux températures d'essai (+5°C et -5°C), trois différents systèmes de resurfaçage ont été étudiés : 1) resurfaçage simple avec ESG-10 (liaison avec émulsion) 2) un système avec découplage à partir d'un mortier bitumineux placé entre le substrat et le resurfaçage (émulsion + 15 mm d'un CH-10 + 55 mm de ESG-10) et 3) un système avec découplage basé sur le concept des SAMI (*Stress Absorbance Membrane Layer*) (3 mm d'une membrane élastomère + 8 mm d'un enrobé coulé à froid (ECF) + 55 mm de ESG-10). Les fiches techniques du CH-10 et du système SAMI sont fournies à l'Annexes 10 et 12. L'analyse de résultats sera présentée suivant les deux températures d'essai étudiées.

5.10 Performance des différents systèmes de resurfaçage testés à T = -5°C

Le fait d'intégrer dans le resurfaçage une couche intermédiaire modifie substantiellement l'intensité de la force qui transite de part et d'autre de l'entaille dans la couche de resurfaçage : la présence d'une couche déformable à l'interface a pour effet de réduire le niveau de contrainte au sein de l'enrobé de resurfaçage. Cette distinction est clairement mise en perspective par le montage développé. La Figure 74 montre le niveau de la force au sein du resurfaçage en cours d'essai pour les trois différents systèmes de resurfaçage testés à -5°C. *Il est clair que le système de membrane élastomère permet de réduire le niveau des contraintes dans le resurfaçage permettant ainsi un retard appréciable de la remontée de la fissure : une partie importante de l'énergie mécanique imposée est dissipée dans la membrane placée à l'interface.* En fait, l'essai réalisé sur le système de resurfaçage SAMI n'avait pas atteint sa limite ultime après 5,2 jours d'essai, soit après plus de 320 000 cycles de sollicitation verticale.

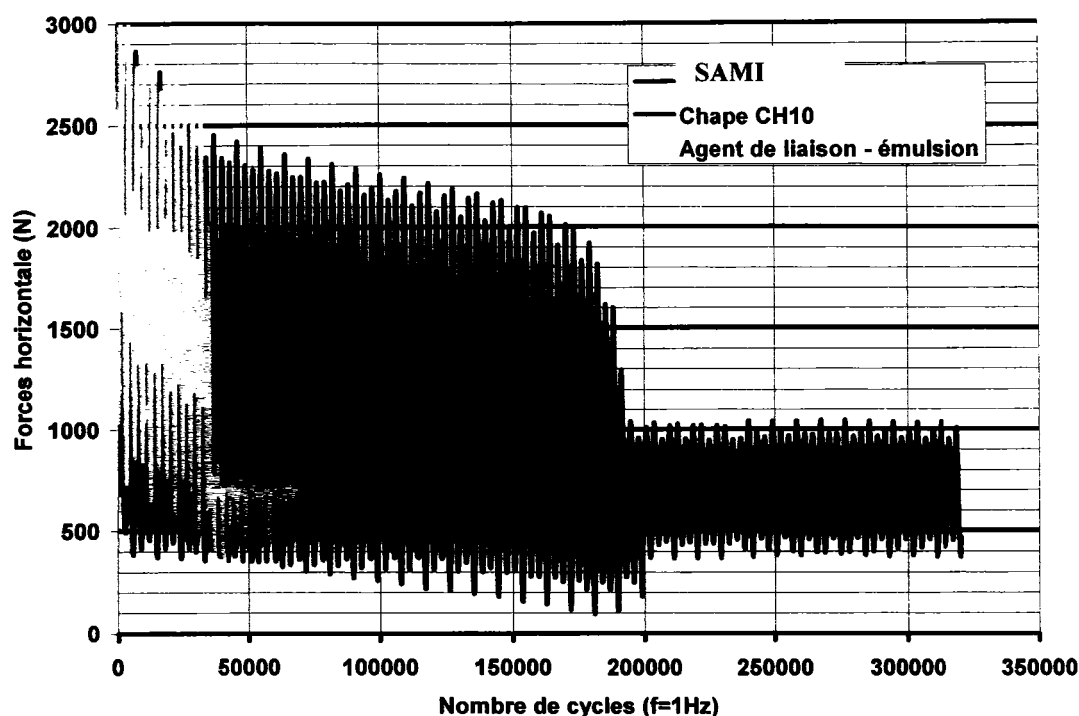


Figure 74 Relation entre la force horizontale et le nombre de cycles pour les trois différents systèmes de resurfacement étudiés dans le cadre de ce projet : resurfacement simple-agent de liaison; resurfacement avec membrane élastomère (SA) et resurfacement avec chape d'étanchéité (CH10); ($T_{\text{essai}} = -5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 1\text{mm}$; $e_{\text{ReSurf}} = 55\text{mm}$; Substrat = EB-14; ReSurf = ESG-10)

Par ailleurs, les résultats des mesures effectuées suivant la direction verticale montrent également un endommagement moins rapide pour le système avec chape et encore plus lent pour le système SAMI. La Figure 75 montre que la relation entre K_s et le nombre de cycles évolue distinctement pour les trois systèmes mis à l'essai. La pente de cette relation peut être associée au taux d'endommagement par cycle de chargement. À chacun des cycles de chargement, l'énergie dissipée dans le système, propre au caractère visqueux des matériaux bitumineux, se traduit, en partie, par la formation de microfissures au sein des matériaux du système. Ces microfissures vont se multiplier en cours d'essai. En conséquent, la rigidité globale du système, exprimée ici par la valeur de K_s , décroît graduellement par un phénomène d'endommagement progressif. Cet

endommagement se traduit concrètement par une diminution progressive de la K_s , laquelle est représentée par la pente de la relation K_s et le nombre de cycles verticaux.

Le Tableau XXV donne les pentes correspondantes de la relation K_s versus le nombre de cycles verticaux. En prenant pour référence le système de resurfaçage simple (interface de collage avec émulsion simple), *on estime que le taux d'endommagement relatif du système avec chape est réduit de 11% et celui avec SAMI est réduit de plus de 98%, soit un taux d'endommagement 75 fois plus lent*. Sur la base des durées de vie mesurées pour chacun des systèmes, les résultats des essais en laboratoire montrent que le système avec Chape est 5 fois plus durable qu'un resurfaçage simple et que le système SAMI est au moins 10 fois plus performant. Pour ce dernier, cette valeur est très conservatrice puisqu'à l'arrêt de l'essai, à 320000 cycles, le système ne présentait aucun signe de fatigue apparent (K_s et F_H sont entièrement stables à l'arrêt).

Tableau XXV

Pentes correspondantes de la relation K_s vs le nombre de cycles verticaux pour les essais effectués à -5°C

		Taux d'endommagement K_s vs N		Durée de vie	
		Pente $\times 10^4$ (MPa/cycle)	Relatif ⁽¹⁾ (%)	N_f (cycles)	Relatif ⁽¹⁾
Système de resurfaçage : couche de roulement en ESG-10	RÉFÉRENCE Émulsion à l'interface	-7,5	100%	~35 000	1,0
	CHAPE Découplage avec mortier bitumineux	-6,7	89%	~180 000	5,1
	SAMI Découplage avec membrane élastomère	-0,1	< 2%	> 320 000	> 9,1

⁽¹⁾ rapport de la pente calculée pour un système donné à celle du système de référence

⁽²⁾ rapport de N_f d'un système donné à N_f du système de référence

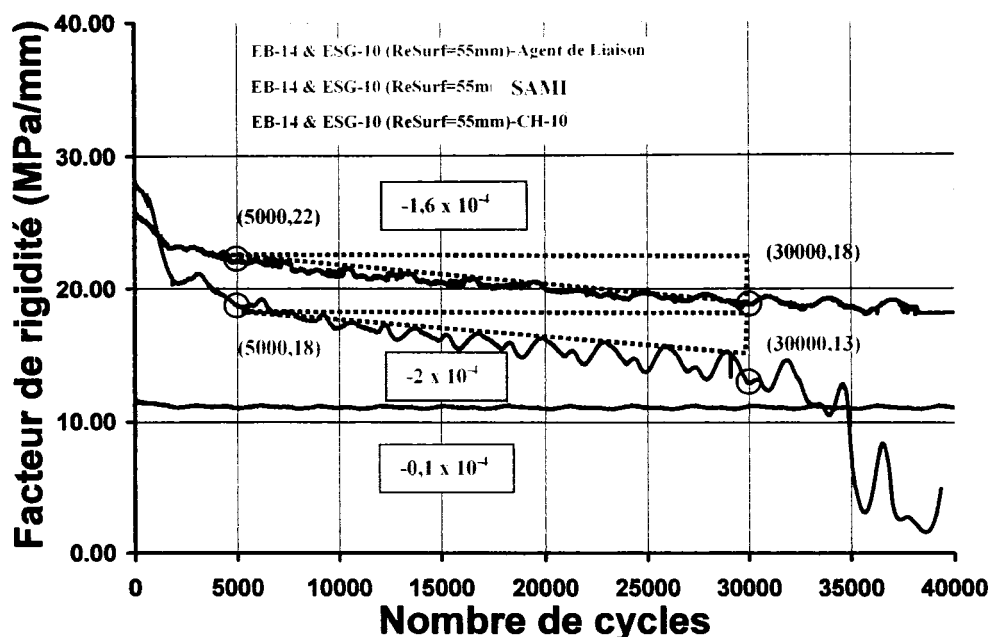


Figure 75 Relation entre K_s et le nombre de cycles pour les trois systèmes de resurfacement étudiés: Agent de liaison (émulsion seule); découplage avec Chape; découplage avec Flexiplast ($T_{\text{essai}} = -5^\circ\text{C}$; $\Delta x = 1\text{mm}$; $e_r = 55\text{mm}$; Substrat = EB-14)

Comme souligné précédemment, on peut avoir un ordre de grandeur quant à l'amplitude de la déformation imposée au système de resurfacement en considérant les déplacements horizontaux mesurés en surface et à l'interface. Le système SAMI permet un décohésionement efficace entre le resurfacement et le substrat. Il est donc plus que probable que la mesure de la déformation à l'interface est le reflet de la déformation du resurfacement entre les repères, concentrée au niveau de l'entaille. En conséquent, il est proposé de calculer la déformation à l'interface du système, en admettant que le déplacement soit induit par une déformation uniforme du resurfacement entre les repères collés à l'interface ($L = 55\text{mm}$), et nous estimons que la déformation imposée à l'interface est de l'ordre de $545 \mu\text{déformation}$ (μstrain) pour un déplacement total mesuré de l'ordre de $30 \mu\text{m}$ (voir Tableau V). Dans ces conditions ($T = -5^\circ\text{C}$; $\epsilon_{\text{interface}} = 545 \mu\text{strain}$; $f_r = 3,2 \times 10^{-4} \text{ Hz}$), il est tout à fait réaliste de croire que la durée vie de

l'éprouvette puisse être régie par la résistance en fatigue du resurfaçage, laquelle devrait être largement au-delà de 500 000 de cycles.

La Figure 76 présente l'évolution de la force horizontale en fonction du mouvement imposé au niveau de la cestroïdée (centre de gravité géométrique) du substrat. On peut constater que l'hystérésis est de plus en plus marquée en cours d'essai. Cette constatation témoigne de la progression de l'endommagement du système, laquelle devrait se manifester suivant le plan d'interface par une propagation horizontale de la fissure. Bien évidemment, les mouvements imposés (horizontalement et verticalement) induisent également des efforts dans le resurfaçage qui selon toute vraisemblance l'endommagent progressivement par un effet de fatigue.

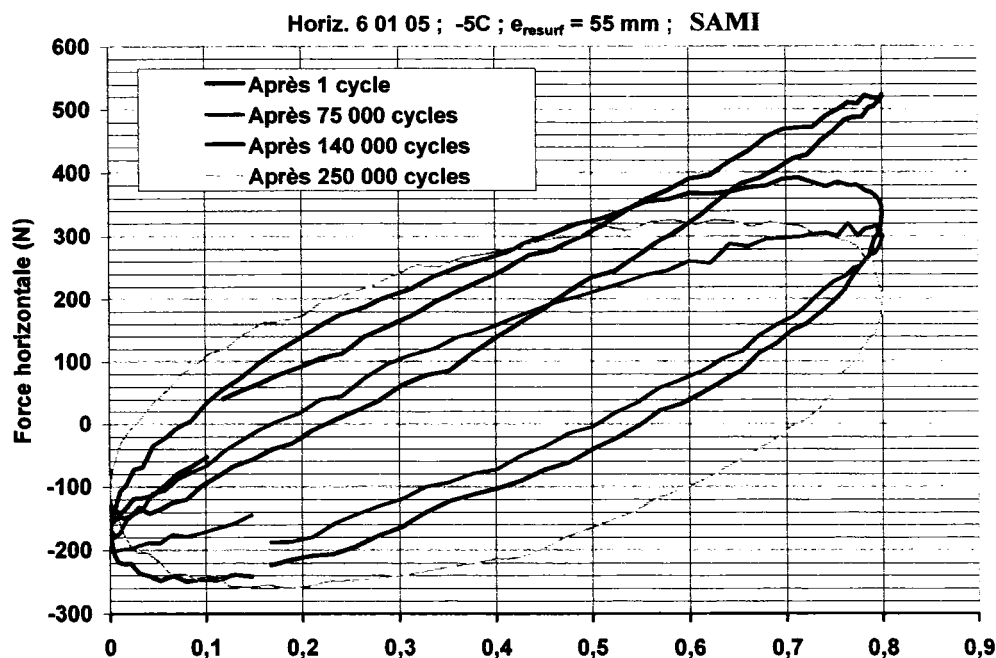


Figure 76 Relation entre la force horizontale et le déplacement imposé après différents cycles d'essai ($T_{\text{essai}} = -5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 1 \text{ mm}$; $e_{\text{rReSurf}} = 55 \text{ mm}$; Substrat = EB-14; Resurfaçage = ESG-10; Système SAMI)

5.11 Performance des différents systèmes de resurfaçage testés à $T = +5^{\circ}\text{C}$

La Figure 77 présente l'évolution de la force horizontale induite dans le resurfaçage pour les trois systèmes testés à $+5^{\circ}\text{C}$. Pour les essais réalisés à $+5^{\circ}\text{C}$, on observe sensiblement la même relation entre les trois systèmes (REF vs Chape vs SAMI) : une progression quant à la durée de vie lorsqu'on intercale une couche d'interface. Toutefois, le rôle de la Chape est nettement moins marqué : en référence à REF-Labo le système avec Chape présente à toutes fins pratiques la même durée de vie (REF-Labo : $N_f = \sim 25\,000$ et Chape CH-10 : $N_f = \sim 22\,000$).

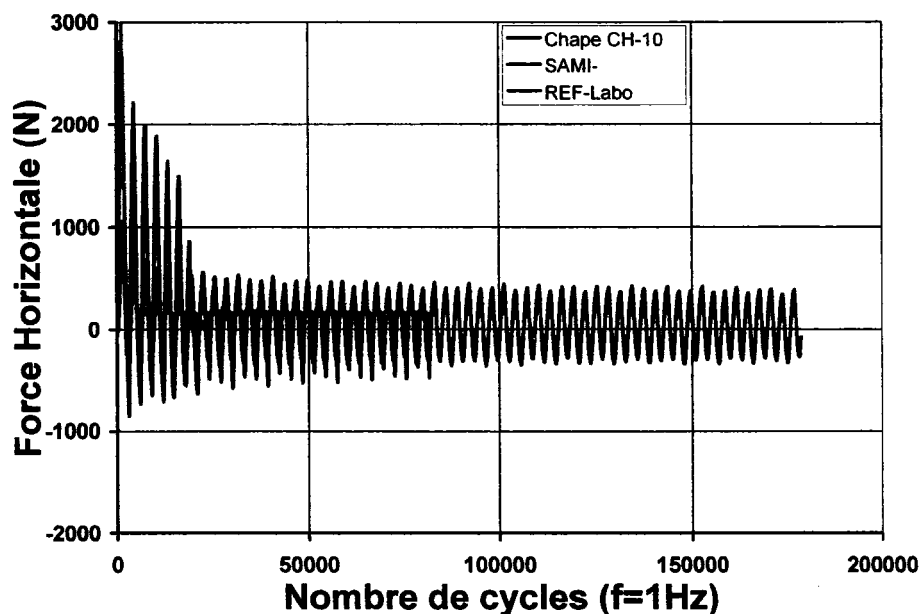


Figure 77 Relation entre la force horizontale et le nombre de cycles pour les trois différents systèmes de resurfaçage étudiées dans le cadre de ce projet : resurfaçage simple-agent de liaison; resurfaçage avec membrane élastomère (Système SAMI) et resurfaçage avec chape d'étanchéité (CH10) ($T_{\text{essai}} = +5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 2\text{mm}$; $e_{\text{rReSurf}} = 55\text{mm}$; ReSurf=ESG-10)

Un élément intéressant est mis en relief dans le cadre des essais réalisés à $+5^{\circ}\text{C}$ pour le système SAMI. La Figure 78 montre clairement une inversion quant à la direction du

déplacement à l'interface de celle du déplacement à la surface du resurfaçage: allongement vs/ raccourcissement. Exception faite du système SAMI testé à $+5^{\circ}\text{C}$, de façon générale, ce comportement a été observé sur l'ensemble des éprouvettes testées à $+5^{\circ}\text{C}$ et -5°C . Ce résultat peut laisser croire qu'il subsiste au sein du montage des jeux au niveau des patins.

Or, nous avons constaté que dans le cas du système SAMI testé à $+5^{\circ}\text{C}$, d'une part il n'y a plus d'inversion et d'autre part un déphasage entre le déplacement à l'interface et celui à la surface est observé. La Figure 78 présente, pour les deux températures d'essai étudiées (-5°C et $+5^{\circ}\text{C}$), la relation entre les déplacements horizontaux mesurés à l'interface et à la surface du resurfaçage observée pour les deux types de systèmes de découplage étudiés (Chape et SAMI). La Figure 78b montre clairement la présence d'un déphasage entre les déplacements pour le système SAMI. Compte tenu de la grande déformabilité d'une membrane élastomère, il est possible qu'à cette température le resurfaçage puisse se déformer par gauchissement dû à un mouvement vertical moins restreint à l'interface et minimisant ainsi l'effet des jeux au niveau des patins.

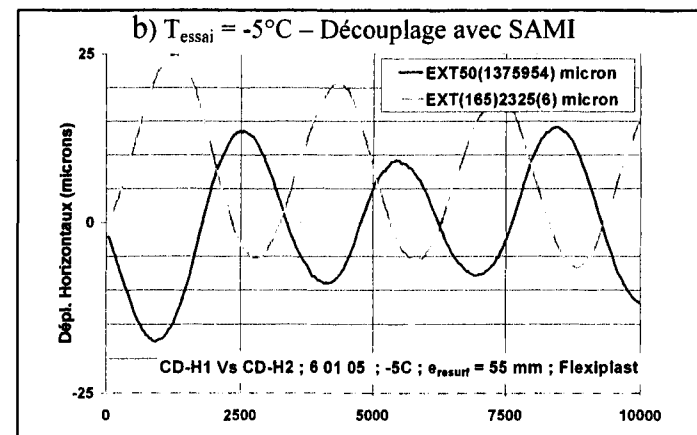
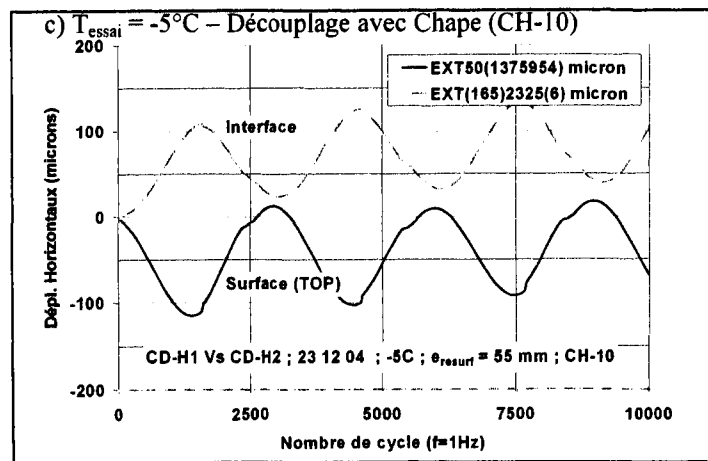
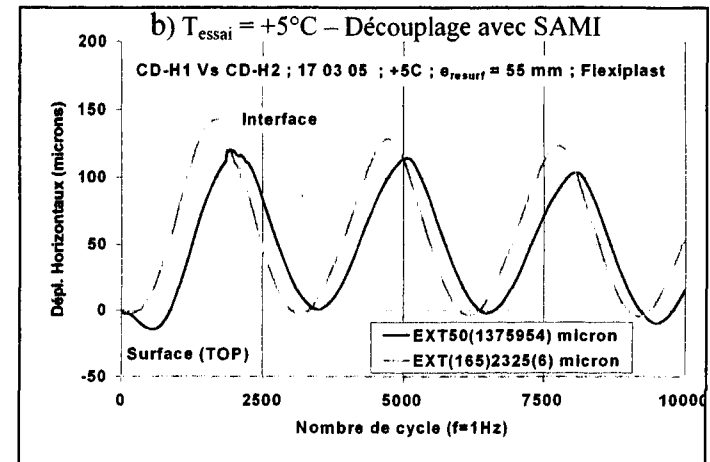
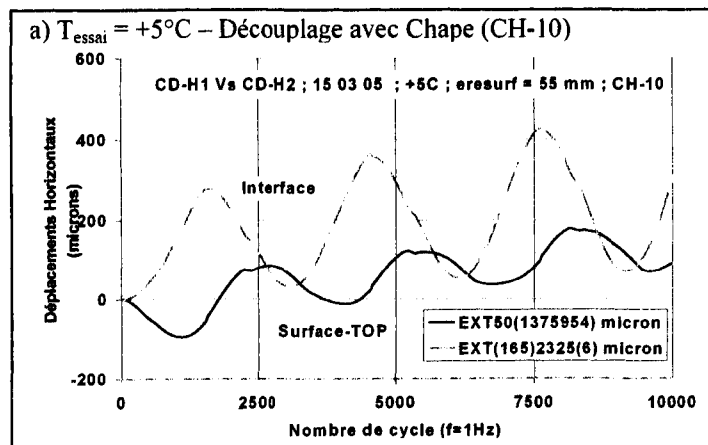


Figure 78 Relation entre les déplacements horizontaux mesurés à l'interface et à la surface du resurfaçage et le nombre de cycles verticaux pour les systèmes SAMI et avec Chape pour les deux températures d'essais étudiées (-5°C et $+5^{\circ}\text{C}$)

CHAPITRE 6

PROGRAMME DE RECHERCHE COMPLÉMENTAIRE

Le système SAMI a eu de nombreuses applications en Europe et dans le reste du monde. Les excellentes performances d'un tel système peuvent donc laisser supposer qu'il serait efficace contre les problèmes des chaussées au Québec. Néanmoins, son utilisation n'est pas encore très répandue. Le type de chaussées au Québec est différent de celui pour lequel le produit a été développé. De surcroît, les conditions de sollicitations au Canada, (climatiques) y sont nettement plus sévères. À la lueur des résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire, nous avons clairement mis en relief le potentiel remarquable du système SAMI pour contrôler la remontée des fissures. Dans la perspective de mieux cibler les limites d'utilisation du système SAMI dans un environnement semblable à celui du Québec, un programme d'essais complémentaire a été élaboré. L'objet du programme vise à déterminer les limites d'utilisation d'un tel système avec le montage présenté au chapitre 2.

La période de dégel est considérée comme la période critique pour les chaussées au Québec. En effet, au printemps, l'eau, provenant de la fonte de la neige en surface et de la fonte des lentilles de glace à l'intérieur du corps de chaussée, se retrouve en quantité importante dans la couche de sol dégelée. L'augmentation des températures n'étant pas encore suffisante pour dégeler tout le corps de chaussée, cette eau restera alors emprisonnée. En conséquence, la capacité portante de la chaussée sera très amoindrie. Un phénomène encore plus aggravant est alors les écarts de températures jour/nuit. En effet, la nuit, la température diminue mais pas suffisamment pour geler tout le corps de chaussée. Seule la partie supérieure sera affectée et il en résultera la présence d'une zone à capacité portante très faible emprisonnée entre deux zones à capacité portante plus élevée (zones gelées). Sous l'effet du trafic, la couche de surface, fragile, sera alors

sujette à des déflexions importantes pouvant aboutir à sa fissuration rapide et à grande échelle. Ceci peut être qualifié “d’effet porcelaine sur matelas”.

Bien que le système SAMI ait largement acquis ces lettres de noblesse en Europe, sa contre-performance sur certains chantiers réalisés au Québec, soulève un questionnement important. Les chaussées de ces planches d’essai réalisées étaient cependant très dégradées et certaines fissures atteignaient même 5 mm d’ouverture. Le recul nécessaire n’est pas suffisant pour établir si l’utilisation d’un système SAMI aux conditions de sollicitations du Québec et pour des applications sur chaussées souples est pertinente. Notons que le niveau de déflexion de chaussées souples et le battement au cas des chaussées fissurées sont nettement supérieurs à celui correspondant aux chaussées rigides pour lesquelles le système SAMI a été développé originalement. Également, bien que la très grande déformabilité de la membrane d’interface d’un système SAMI permet de bien désolidariser le substrat de la couche de resurfaçage, cette déformabilité est largement réduite aux basses températures. En somme, outre des températures de service nettement plus sévères, le système SAMI doit supporter des conditions de sollicitations beaucoup plus critiques.

Dans la perspective de mettre en relief l’effet de l’amplitude du battement sur la performance d’un système SAMI, une première série d’essais complémentaire a été réalisée en faisant varier l’amplitude du déplacement vertical. Dans un deuxième temps, l’effet de la température a été considéré en variant la température d’essai.

Les essais complémentaires à réaliser risquent d’engendrer des contraintes excessives au sein du substrat collé aux plaques d’acier servant au montage du corps d’épreuve sur l’appareil bi-axial (voir Annexe 8). L’utilisation de bases en mortier armé comme substrat a été préférée pour les essais du programme complémentaire. La membrane élastomère du système SAMI offre une excellente adhérence aussi bien sur enrobé que sur béton et mortier. Les plaquettes servant de substrat en mortier armé ont été

confectionnées à partir d'un mortier polymère prêt à l'emploi, le Sikatop 111. Ce mortier a la particularité d'avoir une prise et un mûrissement rapide. Sa rigidité optimale est ainsi atteinte rapidement. Les plaquettes en mortier armé présentent l'avantage d'éviter la pose d'enrobé mais elles nécessitent plus de manipulation quant à la préparation des corps d'épreuve (confection, nettoyage...).

6.1 Effet de l'amplitude du battement sur la performance d'un système SAMI

Dans l'objectif de trouver l'effet du battement sur la performance du système SAMI vis-à-vis de la remontée des fissures, une série d'essai conduite en condition isotherme en faisant varier l'amplitude du déplacement vertical a été effectuée. Il a été proposé de vérifier la performance du système SAMI suivant trois amplitudes de déplacement verticales : 40 μm , 55 μm et 70 μm . La température d'essai et l'amplitude du mouvement horizontal ont été fixées respectivement à -7,5°C et 3 mm.

Les résultats d'essai sont présentés aux figures 79 à 81 inclusivement et la synthèse est compilée au tableau XXVI. Les résultats indiquent clairement que la durée de vie du système SAMI décroît avec l'intensité de l'amplitude du mouvement vertical. Afin de compléter l'analyse, le résultat de l'essai effectué dans la première partie du mémoire à -5°C est pris en compte ($\Delta Y = 18,6 \mu\text{m}$; Tabl. XXII). Bien que ce dernier n'ait pas été réalisé à la même température (-5°C plutôt que -7,5°C) et que l'entaille du substrat et le substrat lui-même soient légèrement différents (5mm plutôt que 6mm et EB-14 plutôt que mortier armé), nous assumons a priori que ces différences ont un effet négligeable. Par ailleurs, étant donné qu'à l'arrêt de l'essai de l'échantillon #12, les paramètres servant à évaluer le degré d'endommagement (voir Fig. 61) ne présentaient aucun signe de variation, nous estimons que la durée de vie réelle du corps d'épreuve testé suivant ces conditions de sollicitation est essentiellement bornée par la résistance à la fatigue de l'enrobé de resurfaçage, laquelle est établie arbitrairement à 1 000 000 de cycles.

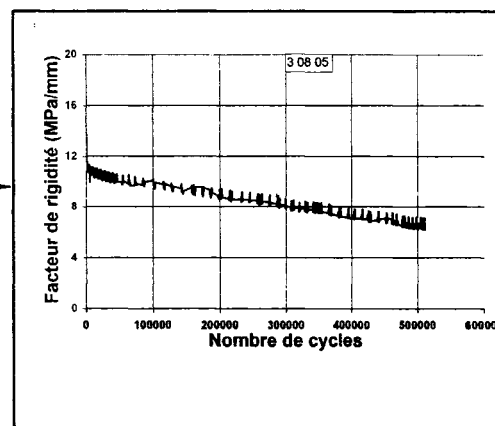
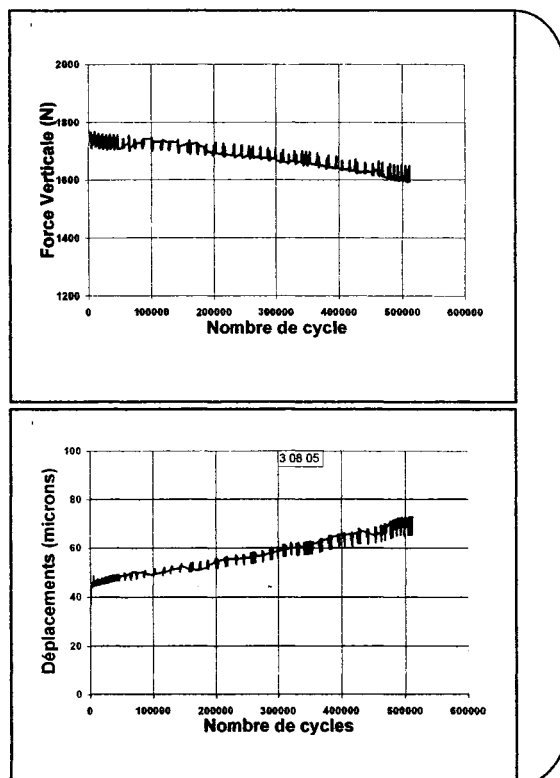
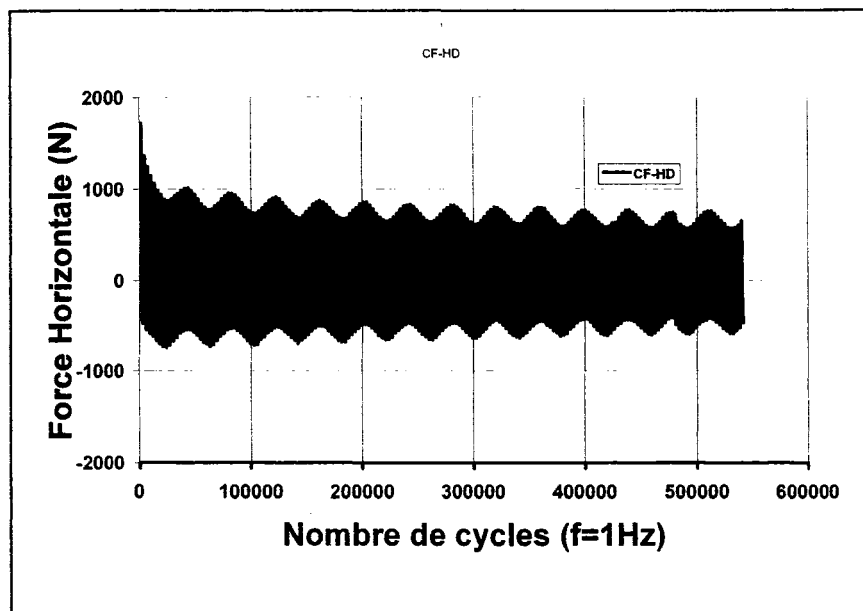


Figure 79 Résultats des essais de remontée de fissures de l'échantillon #13 pour un resurfaçage avec système SAMI : $e_{\text{resurf}} = 67 \text{ mm}$; $\Delta Y = 43,0 \text{ }\mu\text{m}$; $T_{\text{essai}} = -7,5^\circ\text{C}$; $\Delta X = 3 \text{ mm}$; $e_f = 6 \text{ mm}$; Substrat = mortier armé (Fichier : 43m7C)

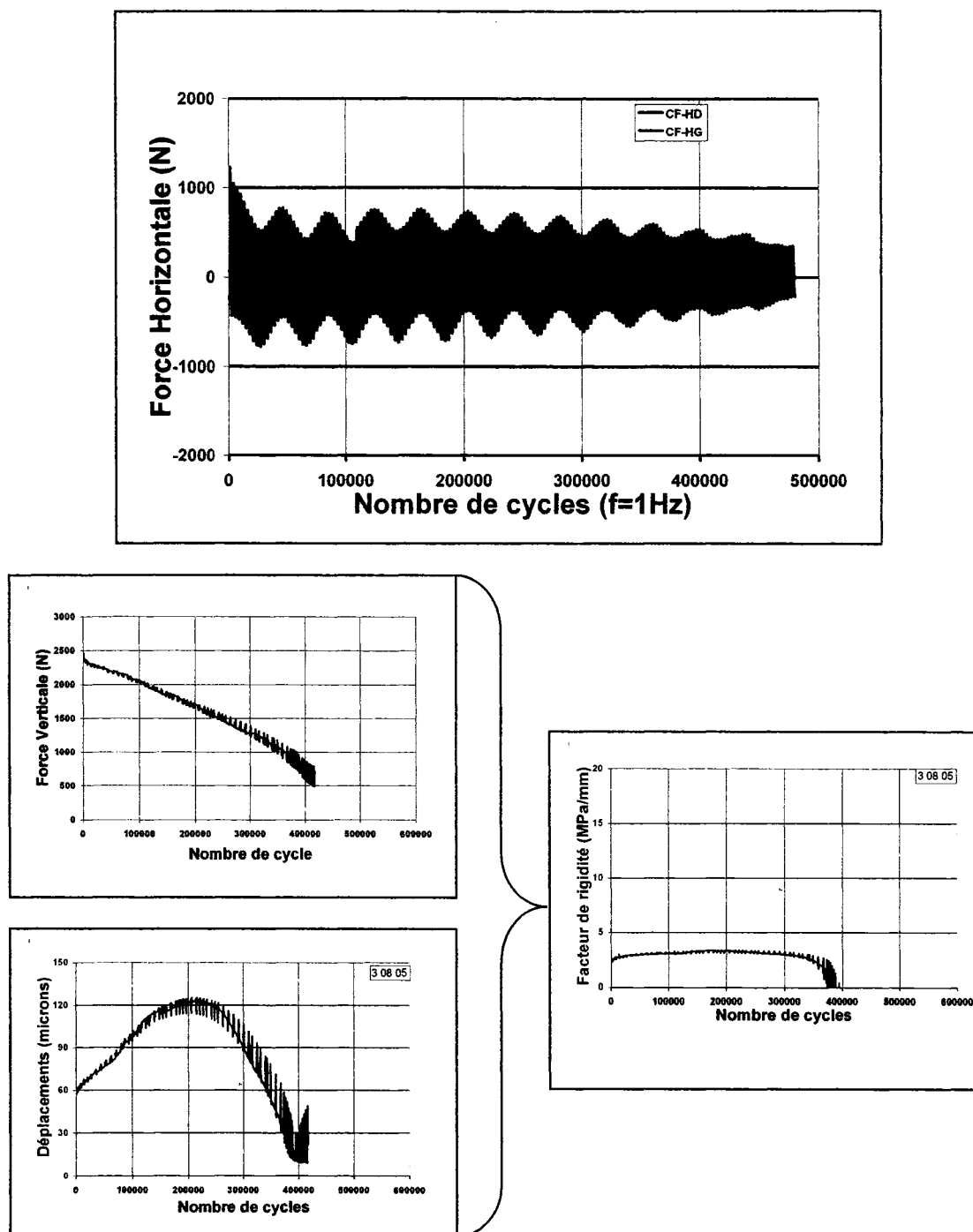


Figure 80

Résultats des essais de remontée de fissures de l'échantillon #14 pour un resurfaçage avec système SAMI : $e_{\text{resurf}} = 67 \text{ mm}$; $\Delta Y = 56,5 \text{ }\mu\text{m}$; $T_{\text{essai}} = -7,5^\circ\text{C}$; $\Delta X = 3 \text{ mm}$; $e_f = 6 \text{ mm}$; Substrat = mortier armé (Fichier : 57m7C)

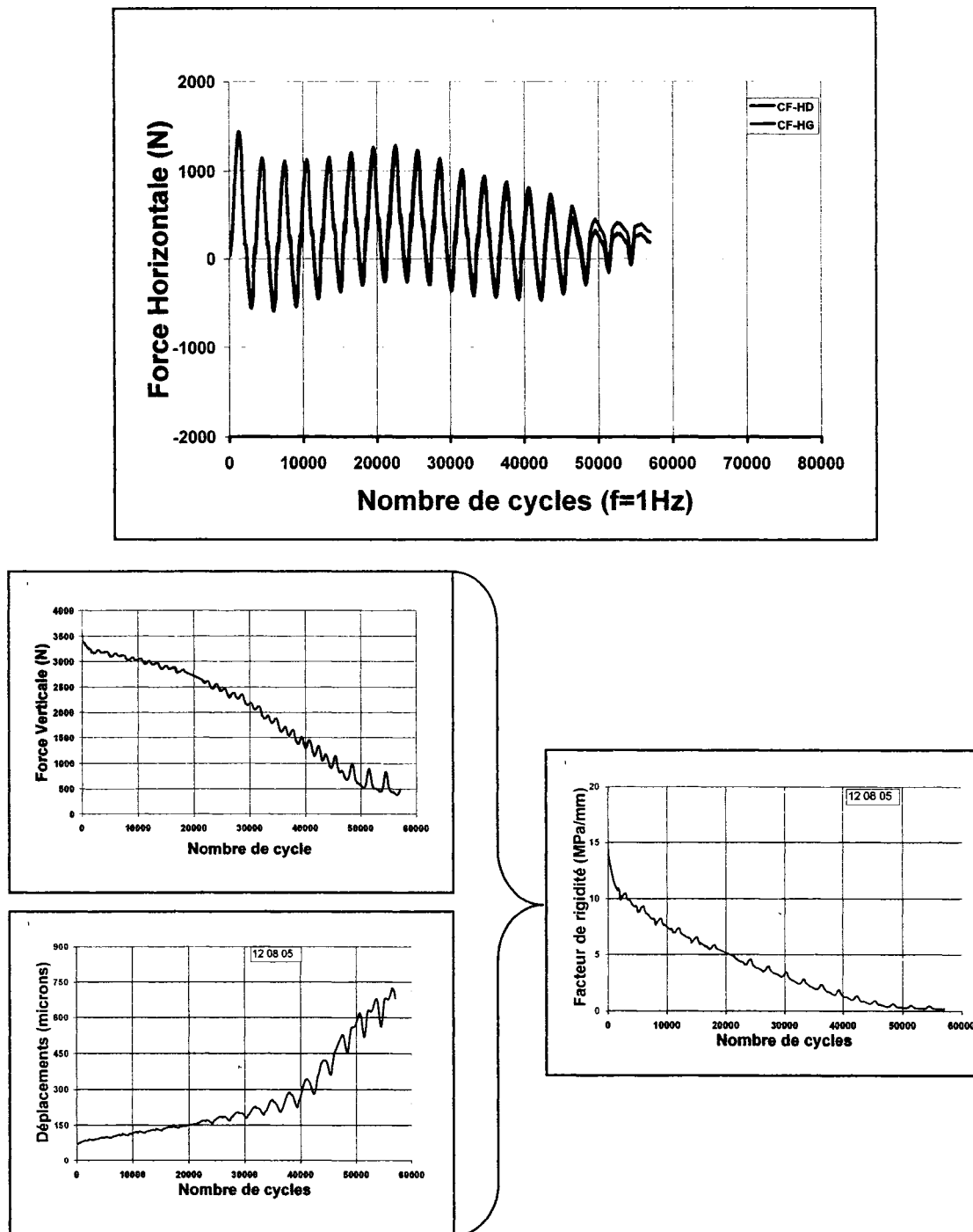


Figure 81 Résultats des essais de remontée de fissures de l'échantillon #15 pour un resurfaçage avec système SAMI : $e_{\text{resurf}} = 67 \text{ mm}$; $\Delta Y = 67,7 \text{ }\mu\text{m}$; $T_{\text{essai}} = -7,5^\circ\text{C}$; $\Delta X = 3 \text{ mm}$; $e_f = 6 \text{ mm}$; Substrat = mortier armé (Fichier : 68m7C)

Tableau XXVI

Synthèse des essais – Système SAMI de resurfaçage

Enrobé de resurfaçage ESG-10					Rupture		Déplacement (µm)					1 ^{er} cycle		Avant Rupture	
							Horizontal				Vertical				
No. Échantillon	T (°C)	e _r (mm)	e _f (mm)	Substrat	N _f		1 ^{er} cycle		Avant Rupture		1 ^{er} cycle	Δ(CF-HD)	Δ(CF-HG)	Δ(CF-HD)	Δ(CF-HG)
							Interface (2)	En surface (3)	Interface (2)	En surface (3)	En surface (4)				
12 Fig-61	-5	67	5	EB- 14	>32000 0	>32000 0	30(T)	32(C)	24	24	18,6	680 N	676 N	522 N	496 N
												K _s =11 MPa/mm		K _s =11 MPa/mm	
13 Fig-79	-7.5	67	6	Béton	510872	>541860	10,1(T)	115(C)	9,6	82,7	43,0	2200 N	1961 N	1179 N	1152 N
												K _s =13,7 MPa/mm		K _s =6,2 MPa/mm	
14 Fig-80	-7.5	67	6	Béton	86225	>480000	7,2(T)	80,5(C)	8,4	49,8	56,5	1666 N	1383 N	406 N	379 N
												K _s =12,3 MPa/mm		n/a	
15 Fig-81	-7.5	67	6	Béton	10200	53186	10,7(T)	126,5(C)	n/a	n/a	67,7	2010 N	1881 N	n/a	n/a
												K _s =14,72 MPa/mm		n/a	
16 Fig-85	-15	67	6	Béton	2881	5000	7,4(T)	145,0(C)	n/a	n/a	56,5	2015 N	1771 N	n/a	n/a
												K _s =19,0 MPa/mm		n/a	
17 Fig-86	-30	67	6	Béton	2700	500	4,0(T)	229,0(C)	n/a	n/a	47,3	246 N	227 N	n/a	n/a
												K _s =140,0 MPa/mm		n/a	
18 n/a	-7.5	55	6	Béton	0	0	n/m	n/m	n/m	n/m	≈ 45	Rupture à l'interface en réglant le ΔY pour la valeur ciblée de 62,5 µm (rupture à ΔY ~ 45 µm)			

C = Compression

T = Traction

(1) Emulsion Supercol 60 : taux résiduel de $0,25 \text{ kg} / \text{m}^2$

(2) Capteur de déplacement No. 2325

(3) Capteur de déplacement No. 5954

(4) Capteur de déplacement No. 5955

La Figure 82 présente la relation entre les durées de vie estimées quant à la remontée verticale d'une fissure ($N_f - FV$: Fig. 82-a) et la propagation de la fissure dans un plan horizontal ($N_f - FH$: Fig. 82-b) et le nombre de cycles de sollicitation. La Figure 82 montre clairement une nette amélioration quant aux durées de vie d'un système SAMI. Ces relations sont sensiblement linéaires entre la durée de vie du système SAMI et le déplacement vertical imposé. Il est intéressant de souligner que le montage permet de mettre en relief que l'augmentation de l'amplitude du battement (ΔY) se traduit notamment par un endommagement plus marqué dans un plan perpendiculaire à l'entaille (plan parallèle au resurfaçage). En effet, bien que les valeurs $N_f - FV$ et $N_f - FH$ soient semblables pour un battement imposé de $43,0 \mu\text{m}$ (essai #13), elles diffèrent considérablement lorsqu'on augmente ce battement à $56,5 \mu\text{m}$ ($N_f - FV \approx 6 \times N_f - FH$).

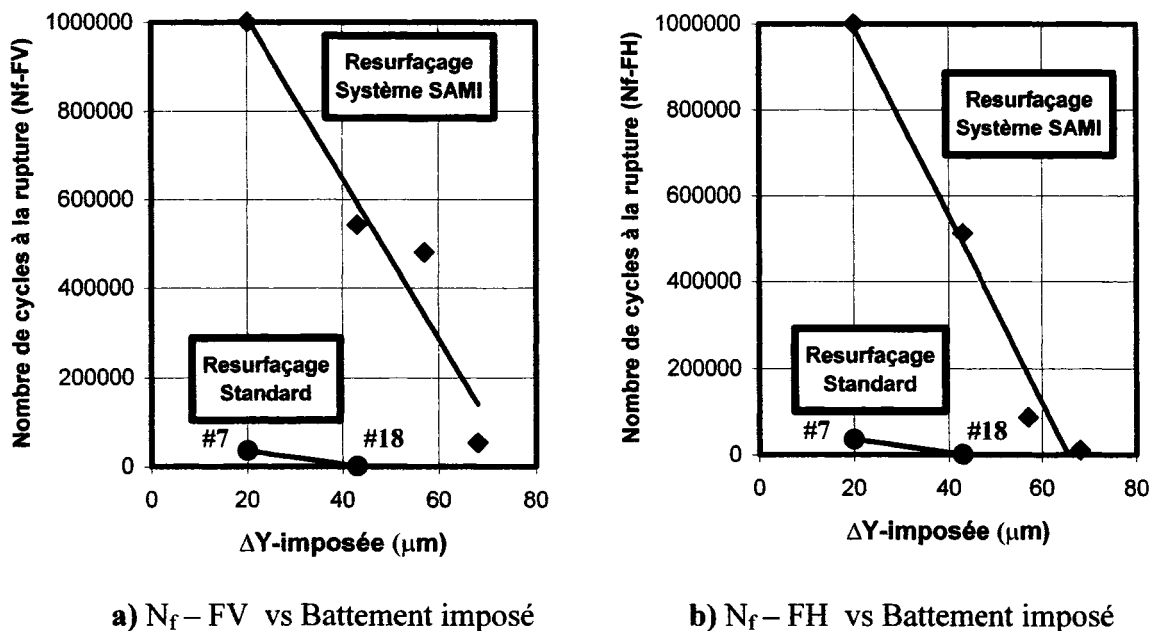


Figure 82 Relation entre la durée de vie et le battement imposé, évaluée sur un système SAMI ($T_{\text{essai}} = -7,5^\circ\text{C}$; $\Delta x = 3 \text{ mm}$) et un système de référence (#7 : $T = -5^\circ\text{C}$; $\Delta x = 2 \text{ mm}$; #18 : $T = -7,5^\circ\text{C}$; $\Delta x = 3 \text{ mm}$)

6.2 Effet de la température sur la performance d'un système SAMI

Dans la perspective de mettre en lumière les limites d'application d'un système SAMI quant aux températures extrêmes auquel il risque d'être soumis dans le resurfaçage de chaussées souples au Québec, une série d'essais a donc été conduite pour diverses températures. Les essais ont été réalisés suivant trois températures : une température avoisinante la température moyenne hivernale ($-7,5^{\circ}\text{C}$: Fig. 26), une température intermédiaire aux températures minimales (-15°C) et une température minimale (-30°C).

À ces températures, la membrane présentera divers degrés de déformabilité. Rappelons que la déformabilité de la membrane permet de pallier les mouvements horizontaux entre le substrat et le resurfaçage induit par les changements de température. Or, en abaissant la température d'essai, l'amplitude du mouvement d'ouverture-fermeture de l'entaille doit décroître puisque celle-ci simule l'effet du retrait thermique, transposé mécaniquement. En effet, le retrait thermique n'est évidemment pas le même entre deux intervalles de température différentes. Il est proposé de varier l'amplitude du mouvement horizontal suivant la température de l'essai en prenant en compte le coefficient de dilatation thermique du matériau de resurfaçage.

Pour évaluer l'importance du mouvement horizontal à imposer pour une température d'essai donnée, il convient de se référer à la variation du coefficient de dilatation thermique du matériau de resurfaçage et aux écarts de température. Au Québec, les enrobés de chaussées sont souvent en EB-14 et c'est donc habituellement des chaussées de ce type qui sont à resurfaçer. En ce sens, l'évaluation du déplacement horizontal Δx à appliquer pour chacune des températures d'essai se fera en fonction des valeurs de coefficient de dilatation thermique de l'enrobé EB-14 (Tableau XIX). La Figure 83 présente la variation du coefficient de dilatation thermique de l'enrobé EB-14 avec la température. En considérant en première approximation que cette variation est linéaire,

la déformation due au retrait thermique peut être déterminée par calcul incrémental, soit :

$$\varepsilon_{th}^{tot} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{th}^i = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta T_i \quad (6.1)$$

avec α_i le coefficient de dilatation thermique, ΔT_i l'intervalle de température donné et n le nombre d'intervalles de calcul.

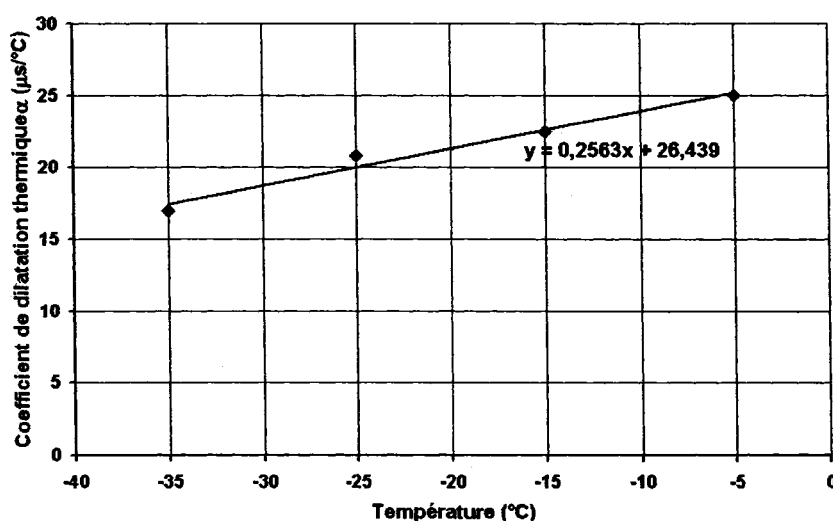


Figure 83 Variation du coefficient de dilatation thermique en fonction de la température pour l'enrobé EB-14 (Datas : Ref Tableau XIX)

Pour l'essai conduit à la température minimale (-30°C), nous avons considéré que les effets du retrait thermique ne sont plus actifs et, en conséquent, il est proposé de ne pas appliquer de déplacement horizontal. Pour les deux autres températures d'essai (-7,5°C et -15°C), le déplacement horizontal à appliquer va correspondre à la différence d'ouverture entre la température d'essai et la température minimale (-30°C). En considérant le rétrécissement du resurfaçage uniquement, on peut déterminer l'amplitude du mouvement horizontal à imposer. Pour des incréments de température de 5°C, les amplitudes des ouvertures à imposer pour les températures d'essai proposées sont présentées au tableau XXVII.

Tableau XXVII

Variation de l'amplitude du déplacement horizontal (Δx)
en fonction de la température

$T_{\text{essai}} (^{\circ}\text{C})$	-7,5	-15	-30
Δx (mm)	3	2 ¹	0

Les résultats de cette série d'essais sont présentés aux Figures 80 (essai #14), 84 (essai #16) et 85 (essai #17). La synthèse de ces résultats est compilée au tableau XXVI.

La rigidité du système augmente radicalement aux basses températures. La Figure 86 présente la relation entre le facteur de rigidité, K_s , et la température d'essai. À très basse température, la rigidité du système est très élevée. Aux températures basses, l'augmentation importante de la cohésion de la membrane fait en sorte que le système SAMI risque de se comporter comme un système de resurfaçage conventionnel (resurfaçage avec couche d'accrochage seulement).

Nous avons porté en graphique à la Figure 87 la relation entre les durées de vie estimées quant à la remontée verticale d'une fissure ($N_f - \text{FV}$: Figure 87-a) et la propagation de la fissure dans un plan horizontal ($N_f - \text{FH}$: Figure 87-b) et le nombre de cycles de sollicitation. La durée de vie est fortement réduite aux basses températures et il y a peu d'écart entre les résultats des températures de -15°C et -30°C . Il faut toutefois souligner l'importance du battement imposé lors de ces essais ($\Delta Y = 56,5 \mu\text{m}$ à -15°C et $\Delta Y = 47,3 \mu\text{m}$ à -30°C). Ces conditions sont extrêmement sévères si l'on considère que le corps d'épreuve de référence (essai #18), réalisé à $-7,5^{\circ}\text{C}$ sur un système de resurfaçage conventionnel, a cédé à un ΔY de $\approx 45 \mu\text{m}$ en cours de réglage (aucun cycle de sollicitation!).

¹ De -15°C à -30°C : $n = 3$; $\alpha_1 = 22 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$; $\alpha_2 = 21 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$; $\alpha_3 = 19 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$, avec $\varepsilon_{th}^{tot} = 5^{\circ}\text{C} \cdot (22 + 21 + 19)$ et $\Delta l = \varepsilon_{th}^{tot} \cdot 6000 \text{ mm} = 1,86 \text{ mm} \approx 2 \text{ mm}$

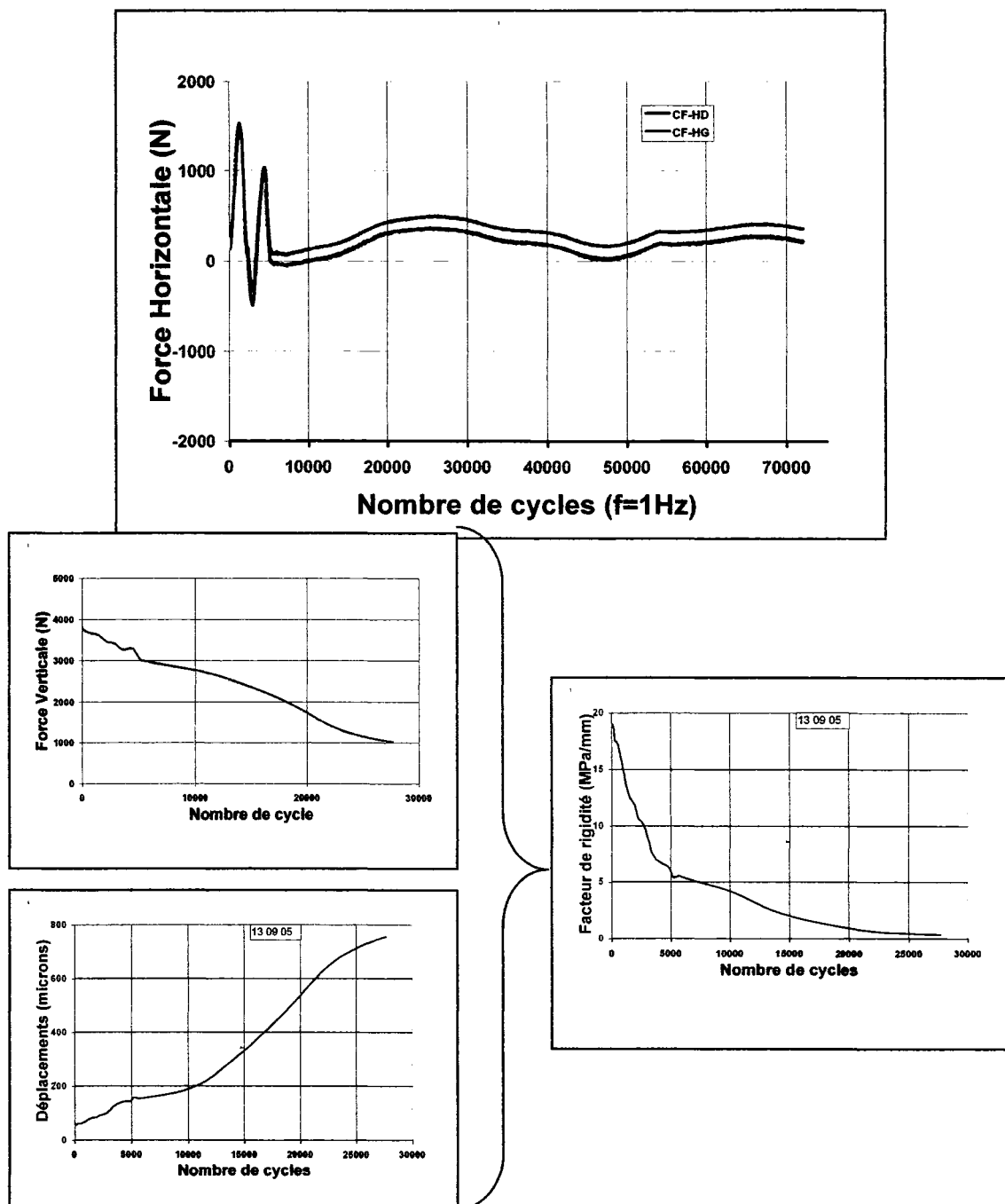


Figure 84

Résultats des essais de remontée de fissures de l'échantillon #16 pour un resurfaçage avec système SAMI : $e_{\text{resurf}} = 67 \text{ mm}$; $\Delta Y = 56,5 \text{ } \mu\text{m}$; $T_{\text{essai}} = -15^\circ\text{C}$; $\Delta X = 2 \text{ mm}$; $e_f = 6 \text{ mm}$; Substrat = mortier armé (Fichier : 13-09-05)

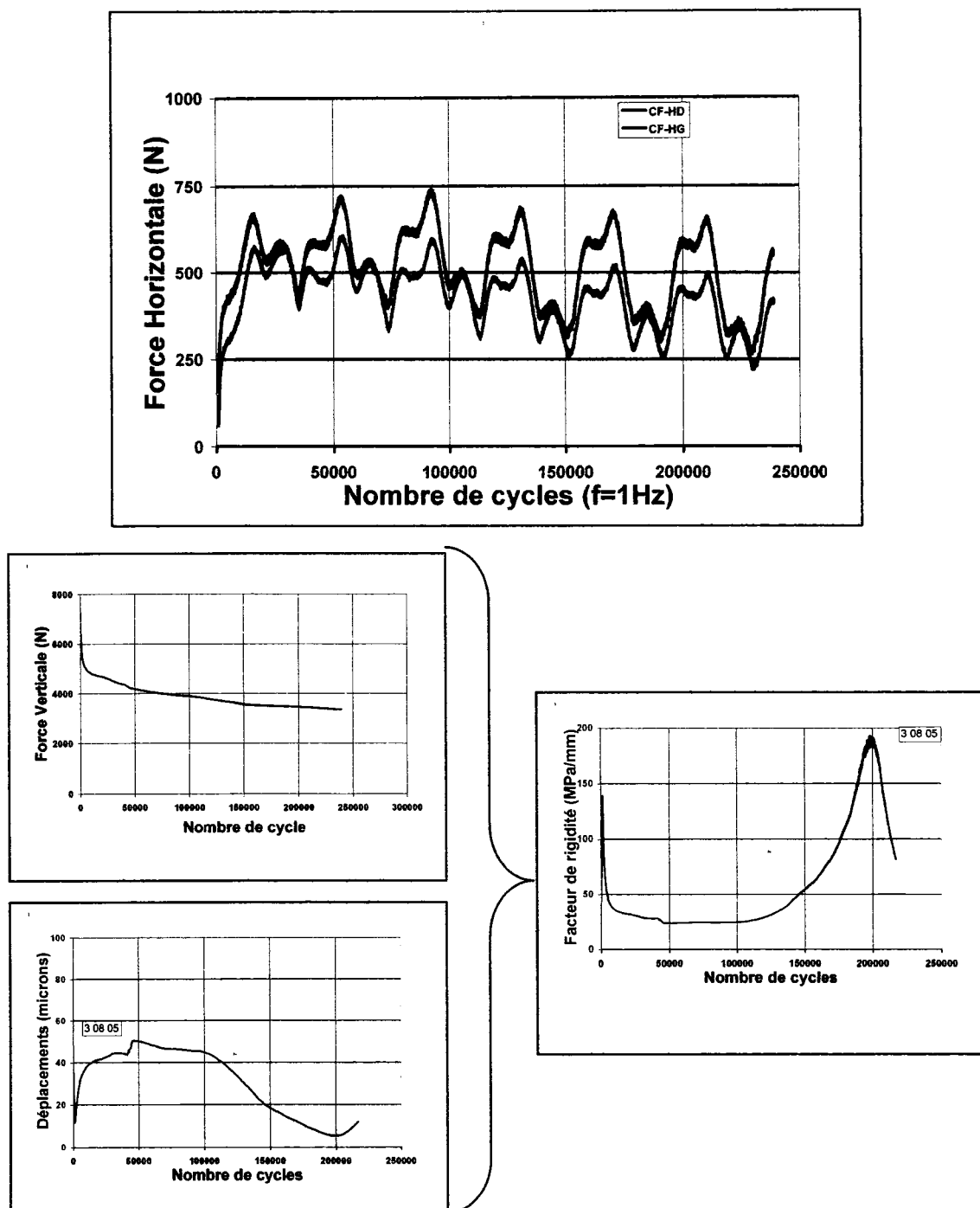


Figure 85 Résultats des essais de remontée de fissures de l'échantillon #17 pour un resurfaçage avec système SAMI : $e_{\text{resurf}} = 67 \text{ mm}$; $\Delta Y = 47,3 \text{ }\mu\text{m}$; $T_{\text{essai}} = -30^{\circ}\text{C}$; $\Delta X = 0 \text{ mm}$; $e_f = 6 \text{ mm}$; Substrat = mortier armé (Fichier : 03-08-05)

Aux basses températures, le battement permissible semble être du même ordre que celui que peut supporter un resurfaçage de référence. Or, aux basses températures, la structure de chaussée présente une rigidité telle que les déflexions sont faibles, voire négligeables. Par contre, la situation peut s'avérer critique si on se retrouve dans le cas de "l'effet porcelaine sur matelas" (infiltration d'eau et/ou mauvais drainage : dégel le jour avec gel la nuit).

En définitive, bien qu'un système SAMI puisse permettre de dissiper efficacement les contraintes dans le resurfaçage dues aux effets thermiques, il est peu probable qu'il puisse jouer un rôle de premier plan pour limiter l'endommagement du resurfaçage lié à des déflexions importantes. A priori, il est réaliste de penser contrer cette problématique en augmentant l'épaisseur du resurfaçage suivant un dimensionnement adéquat, basé sur la capacité résiduelle de la chaussée à resurfaçer (voir section 1.2.3.1). Une épaisseur de resurfaçage plus importante est susceptible de diminuer la déflexion et assurer la durabilité du resurfaçage. En effet, il est bien admis qu'une augmentation de l'épaisseur du resurfaçage conduit à une augmentation de la durée de vie en ce qui a trait à la remontée d'une fissure dans le resurfaçage conventionnel (si $e_r \uparrow \Rightarrow N_r\text{-}FV \uparrow$). Colombier (1988) estime que le temps de remontée d'une fissure est doublé si l'on augmente l'épaisseur de resurfaçage de 30 mm à 80 mm.

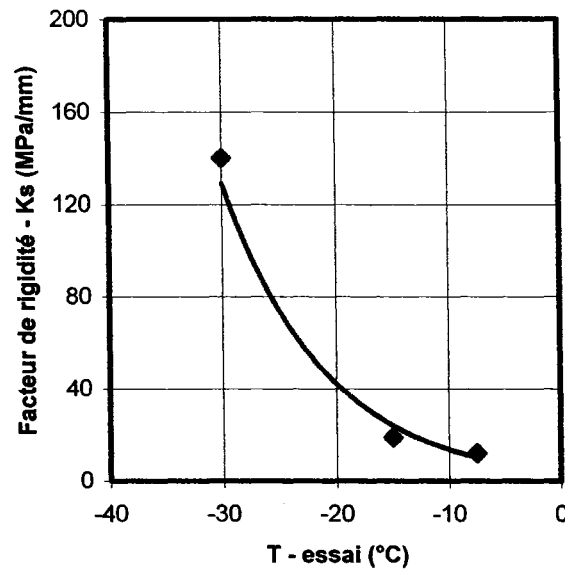


Figure 86 Relation entre le facteur de rigidité (K_s) et la température d'essai pour un système SAMI (à $-7,5^\circ\text{C}$: $\Delta x = 3 \text{ mm}$; à -15°C : $\Delta x = 2 \text{ mm}$; à -30°C : $\Delta x = 0$; resurfaçage : ESG-10 à 55mm d'épaisseur)

À cet égard, nous avons voulu vérifier pour une température donnée, l'équivalence de performance en testant deux corps d'épreuve d'épaisseur différente et, bien évidemment, soumis à des amplitudes verticales distinctes. Comme nous l'avons souligné à la section 2.2.2.2, par simulation numérique (Annexe 3) nous avons montré qu'un déplacement vertical imposé de $20 \mu\text{m}$ (ΔY) entre les repères de mesure positionnés en surface du resurfaçage donnait lieu à un déplacement différentiel de l'ordre de $2,5 \mu\text{m}$ (ΔY_f) au droit de l'entaille. En se plaçant sous l'hypothèse élastique, on peut calculer le déplacement à la fissure provoqué par les déplacements imposés pour une même épaisseur de resurfaçage donnée².

² Si $\Delta Y = 70 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta Y_f = 70 \times 2,5/20 = 8,75 \mu\text{m}$; $\Delta Y = 50 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta Y_f = 50 \times 2,5/20 = 6,25 \mu\text{m}$

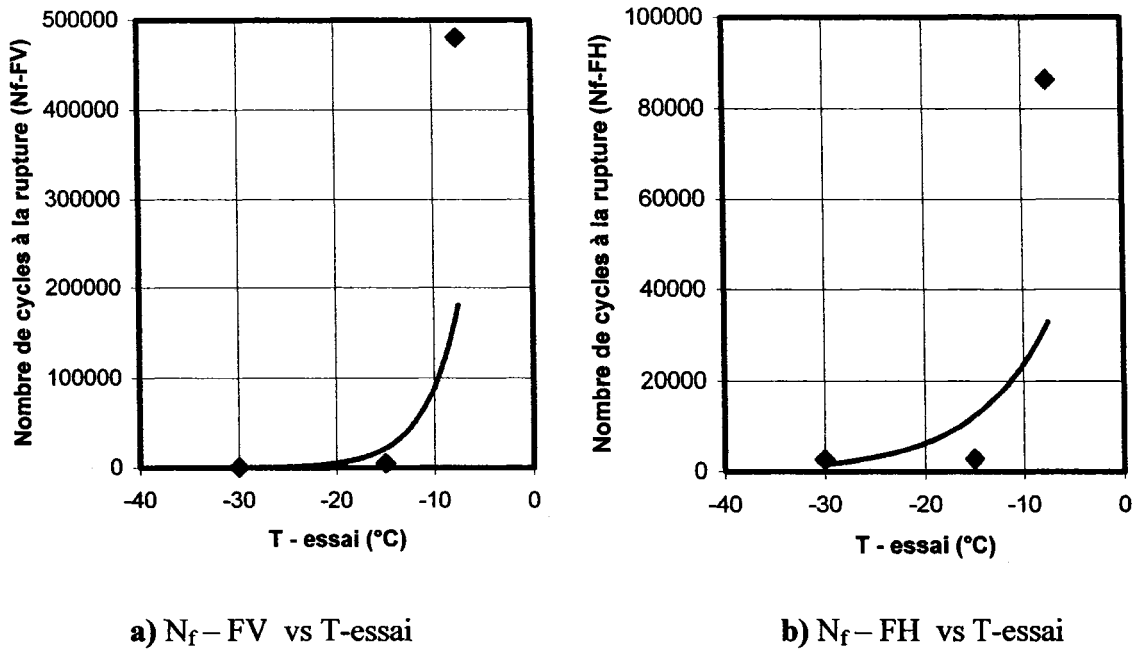


Figure 87 Relation entre les durées de vie estimées quant à la remontée verticale d'une fissure et la propagation de la fissure dans un plan horizontal et la température d'essai évaluée sur un système SAMI (à $-7,5^{\circ}\text{C}$: $\Delta x = 3$ mm ; à -15°C : $\Delta x = 2$ mm ; à -30°C : $\Delta x = 0$; resurf. : ESG-10 et $e_r = 55$)

Il s'avère donc pensable de gérer la problématique de resurfacement de structure de chaussée à plus ou moins faible capacité structurale résiduelle en augmentant l'épaisseur de resurfacement dans le cas d'un système SAMI. Dans ce cas, il est attendu que la performance d'un corps d'épreuve d'épaisseur plus significative (ex. : 80 mm) et soumise à un battement plus fort (ex. : $\Delta Y = 70 \mu\text{m}$) demeure tout à fait comparable à celle obtenue pour une épaisseur réduite (ex. : 55 mm) et soumise à un battement plus faible (ex. : $\Delta Y = 50 \mu\text{m}$). La Figure 88 schématise cet énoncé. Dans cette perspective, un dernier essai a été réalisé sur un corps d'épreuve à forte épaisseur ($e_r=80\text{mm}$) (échantillon #19). Malheureusement, tout comme nous l'avons observé précédemment, à forte épaisseur la compacité en bas de couche s'est avérée inadéquate et la rupture prématurée du corps d'épreuve en cours de réglage a été constatée.

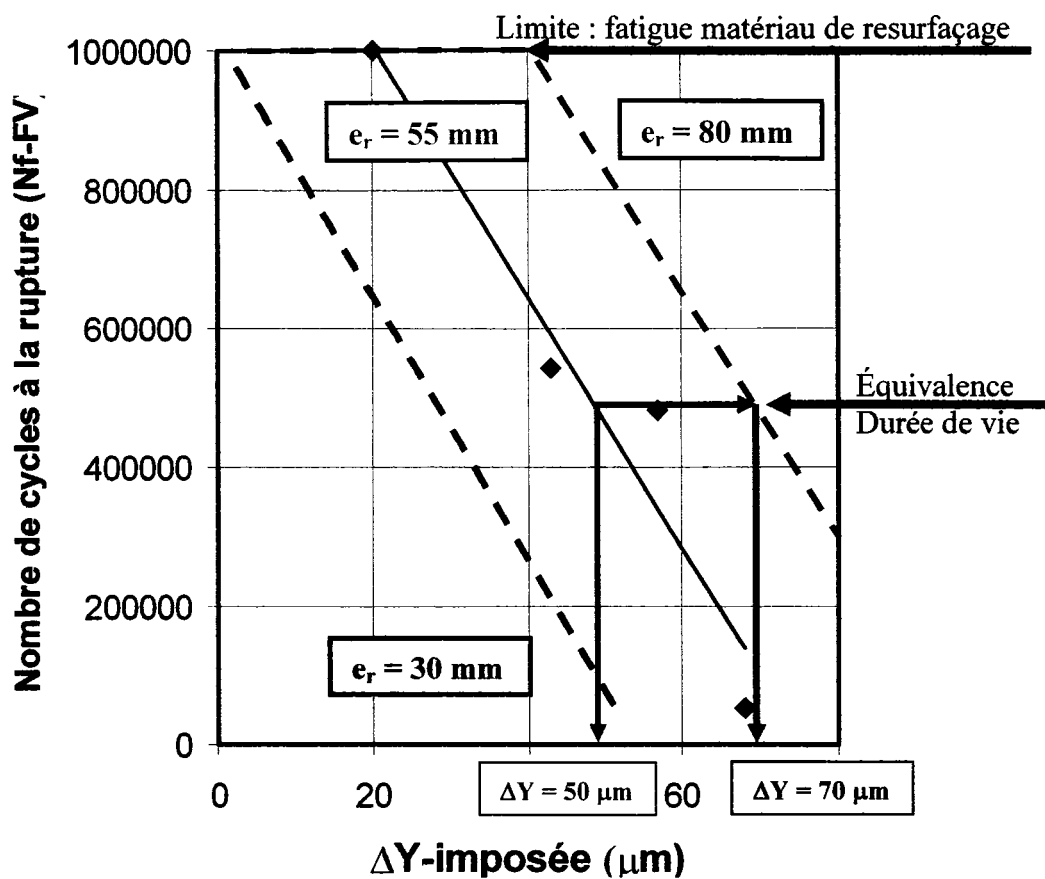


Figure 88 Relation attendue entre la durée de vie et le battement imposé, évaluée sur un système SAMI ($T_{essai} = -7,5^\circ C$; $\Delta x = 3$ mm) et un enrobé de référence ($T_{essai} = -5^\circ C$; $\Delta x = 3$ mm)

CONCLUSION

La revue de la littérature nous a permis d'identifier dans un premier temps l'origine des «causes» des fissures sur les chaussées en climat nordique et dans un deuxième temps la remontée des fissures dans un système de resurfaçage.

La propagation d'une fissure dans la couche de roulement d'une structure dont la couche de base est fissurée découle d'une alternative :

- soit décollement de l'interface (propagation horizontale),
- soit propagation verticale en prolongement de la fissure existante.

Les recherches sur le sujet ont toujours compris une simulation en laboratoire du processus de propagation de la fissure. Dans notre projet, un montage expérimental a été développé et mis au point. Ce montage original et novateur permet de simuler mécaniquement le mouvement d'ouverture d'une fissure sur des éprouvettes bi-couche constituées d'un resurfaçage adhérent sur un substrat pré-fissuré. L'essai consiste à suivre la vitesse de remontée d'une fissure au travers de ce système destiné à retarder la réapparition des fissures en surface.

Plusieurs essais en laboratoire ont permis de valider le montage pour la gamme de conditions d'essais retenues dans ce projet. Chaque éprouvette représentative du complexe est soumise, dans des conditions de température constante (+5° C et -5° C) à deux sollicitations simultanées :

- une traction longitudinale continue lente, simulant le retrait thermique de la structure,
- une flexion verticale cyclique, à la fréquence de 1Hz, simulant le trafic.

Des essais de caractérisation ont été réalisés afin de connaître les propriétés de tous les matériaux qui ont été utilisés dans ce projet. Dans tous les cas, les propriétés mesurées

sont semblables aux valeurs que l'on retrouve dans la documentation scientifique pour des matériaux comparables.

L'ensemble des résultats nous a permis de tirer quelques conclusions intéressantes :

La température occupe un rôle très important dans la remontée des fissures. Les durées de vie de l'ensemble des éprouvettes fabriquées avec différents systèmes de resurfaçage testées à +5°C sont nettement moindre que celles établies pour les essais à -5°C.

L'épaisseur du revêtement ne nous a pas donné des résultats concluants. Les revêtements de 100 mm ont diminué la qualité des mesures de nos essais et une compaction adéquate pour cette épaisseur a été difficile à atteindre.

Le substrat a influencé les résultats en fonction de sa rigidité. Le fait que le substrat soit plus rigide entraîne une diminution de la force de transfert. De plus, une rigidité plus grande amène une augmentation des déplacements de part et d'autre de l'entaille, qui favorise la remontée de la fissure sous l'application des charges cycliques.

Le système de resurfaçage joue un rôle très important. La présence d'une couche ou d'un produit déformable à l'interface entre le substrat et le resurfaçage réduit le niveau de contrainte dans le revêtement. La durée de vie d'un système de resurfaçage utilisant comme couche de découplage une chape d'étanchéité de type mortier bitumineux est environ 5 fois plus longue que celle d'un resurfaçage simple. *La durée de vie d'un système de resurfaçage utilisant comme couche de découplage une membrane élastomère est au moins 10 fois plus longue que celle d'un resurfaçage simple.*

ANNEXE 1

Matériaux routiers

LES GRANULATS ROUTIERS

Le terme “granulat” désigne un ensemble de particules de matière solide, de forme, de dimension ou de nature diverses.

Les granulats constituent l'élément principal des enrobés. Certaines propriétés des granulats sont directement liées à la nature et aux caractéristiques intrinsèques du matériau: la résistance à l'usure et à la fragmentation ainsi que la sensibilité aux agents atmosphériques, comme les cycles répétés de mouillage et de séchage, de même que les fréquents cycles de gel et de dégel.

D'autres propriétés vont plutôt dépendre des conditions d'exploitation et du processus d'élaboration des matériaux. Ce sont principalement les caractéristiques de forme (éléments plats, éléments allongés, angularité). Comme ces propriétés sont fonction de processus sur lesquels on peut exercer un certain contrôle, elles pourront être améliorées par des méthodes de traitement appropriées.

On peut voir la dimension d'ouverture de mailles carrées à travers laquelle passent 100% de la quantité du granulat (Figure A1.1).

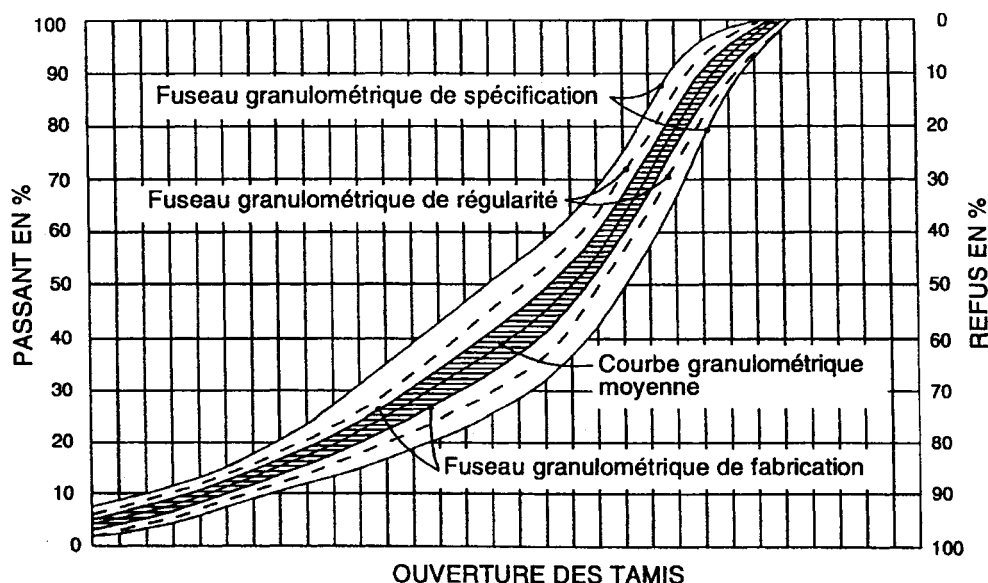


Figure A1.1 Analyse granulométrique (Langlois, 2004)

Les granulats constituent de loin la principale composante des couches de chaussée.

Les granulats utilisés dans les enrobés en couche de roulement jouent un rôle de première importance dans le phénomène d'adhérence pneus-chaussée. Sous l'effet de la circulation, les granulats en surface tendent à se polir plus ou moins rapidement selon leur nature et leur composition minéralogique. À court ou à moyen terme, selon la densité du trafic, la chaussée peut devenir glissante. Cet aspect fait l'objet de recherches en laboratoire et sur la route dans le but de déterminer les textures de surface et les compositions minéralogiques des matériaux granulaires et d'obtenir des mélanges bitumineux rugueux.

On distingue deux familles de granulats: les graves et les sables (Berthier, et coll).

On peut considérer dans ce qui suit que les sables sont des graves donc le diamètre maximal des grains ne dépasse pas 2 mm.

Les graves sont des mélanges de cailloux, de gravier, de sables (gros, fin, très fin) en proportions relatives variables. Elles peuvent être naturelles ou reconstituées.

Les graves naturelles proviennent des alluvions, sont arrondies suite à une érosion au cours du temps et sont les résidus de roches sédimentaires (calcaires), éruptives ou métamorphiques.

La dimension maximale des cailloux est souvent de l'ordre de 50 mm et leur granularité est rarement régulière. Elles sont donc souvent fractionnées et recomposées suivant une granulométrie adéquate.

Les particules de granulats sont constituées d'un ou plusieurs minéraux; par exemple, le calcaire est formé d'un seul, qui est la calcite, tandis que le granit en compte trois: le quartz, le feldspath et le mica. Ces minéraux sont retenus entre eux par une pâte liante ou par l'enchevêtrement de leurs cristaux.

Les granulats pour enrobé bitumineux peuvent provenir de deux sources: naturelle et artificielle ou synthétique. La source naturelle est constituée de deux genres de dépôts: les dépôts meubles et les dépôts consolidés. Les dépôts meubles regroupent tous les bancs de sables (dépôts éoliens, de dune, de rivière, etc.) et de gravier (dépôts glaciaires, fluvio-glaciaires: tills, eskers, kames). Les dépôts consolidés sont toutes les carrières de pierre. Ils constituent la première source de granulats pour bétons bitumineux.

Le granulat de source artificielle ou synthétique ne s'emploie pas encore au Québec dans les enrobés bitumineux. Il est fabriqué à partir de laitiers de hauts-fourneaux, de scories, de certains déchets comme les cendres, le mâchefer, les tessons de bouteille, de résidus de mines ou encore avec des minéraux transformés.

Granularité:

La granularité est la répartition dimensionnelle des particules d'un granulat. Pour avoir une bonne compacité, propriété nécessaire pour la bonne tenue d'une couche, il faut que les courbes granulométriques soient dans des fuseaux bien définis. Ce qui revient à mélanger des pourcentages adéquats de cailloux, de gravillons, de sables et d'éléments finis de façon à remplir le maximum de vides. La masse volumique apparente peut alors ainsi être optimisée.

Une classe granulaire est définie par d (calibre minimum du granulat) et D (calibre maximum du granulat), qui représentent la plus petite et la plus grande des dimensions de la classe. Les classes granulaires d/D , (Figure A1.2), ou $d \geq 2,5\text{mm}$ doivent satisfaire aux conditions de la Norme 2101 (Langlois, 2004).

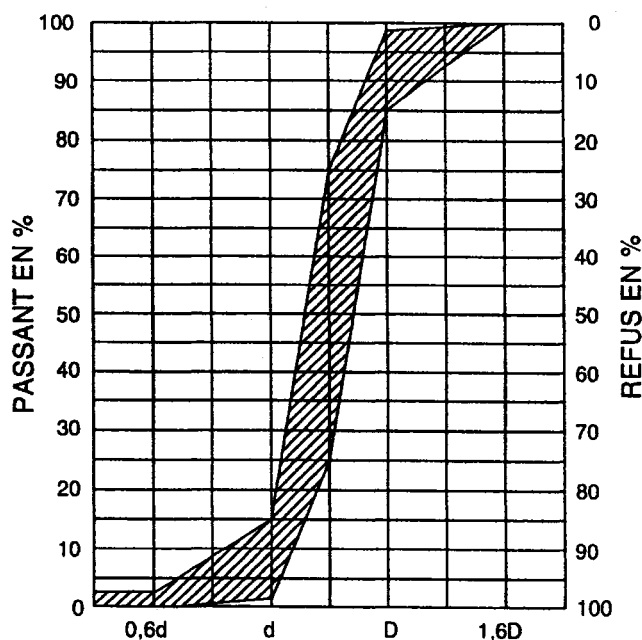


Figure A1.2 Classe granulaire d/D (Langlois, 2004)

Angularité et forme :

Le but est d'avoir un angle de frottement interne élevé.

Bonnot et Panet, 1971 ont montré qu'un milieu granulaire à éléments ronds a un angle de frottement interne variant de 28° à 35° selon la compacité alors que si les éléments étaient anguleux cet angle pourrait atteindre 34° à 46° .

Directive, 1984 a confirmé ce résultat en montrant par des essais triaxiaux que l'angle de frottement interne augmente avec le pourcentage des éléments concassés (anguleux).

Résistance mécanique :

Les graves doivent résister à la fragmentation (chocs), ceci est caractérisé par le coefficient Los Angeles, et doivent résister à l'attrition et à l'usure évaluée par l'essai Micro-Deval en présence de l'eau (Directive, 1984) : Tableau AI.

Tableau AI

Résistance à la fragmentation et à l'usure

Coefficient Los Angeles	Appréciation	Micro-Deval en présence d'eau	Appréciation
		M	
<15	Très bon à bon	<13 (6)	Très bon à bon
15 à 20	Bon à moyen	13 à 20 (4)	Bon à moyen
20 à 30	Moyen à faible	20 à 25 (3)	Moyen à faible
>30	Médiocre	>25 (3)	Médiocre

Les graves utilisées dans la construction routière doivent aussi:

- résister au polissage: propriété nécessaire pour lutter contre la glissance sur la chaussée. Cette propriété est évaluée par un essai dit de polissage.
- être le plus possible insensibles aux cycles de gel-dégel. L'essai Los Angeles après des cycles de gel-dégel permet d'apprécier cette propriété.
- être propres: absence de fines plastiques (hydrophiles) détectées par les limites d'Atterberg ou l'essai d'équivalent de sable, et de poussières (provenant du concassage ou du polissage).

Avec l'aide de l'appareil Micro-Deval, on peut déterminer la résistance à l'usure par attribution de certains matériaux absorbants sensibles à l'eau et vérifier la qualité de granulats particuliers comme les schistes métamorphiques, les schistes argileux, etc.

Le résultat donne le coefficient de perte à l'usure par attribution et il est inversement proportionnel à la résistance du granulat à l'usure par attribution en présence d'eau. Il provient de la différence entre la masse de la prise d'essais et celle retenue au tamis de 1,25mm après essai, exprimée en pourcentage de la masse initiale.

Avec l'appareil Los Angeles on détermine les pertes subies par un granulat sous l'effet d'abrasion. Le résultat indique le pourcentage de pertes subies à l'essai. Il est inversement proportionnel à la résistance à l'abrasion Los Angeles. En réalité, cet essai mesure plus que l'abrasion par attribution du granulat, car les chocs répétés des boulets tombant du haut du baril sur les granulats mettent à l'épreuve les granulats fragiles.

Les liants routiers

Les liants utilisés en technique routière sont de deux natures différentes:

- les liants hydrocarbonés, appelés ainsi parce qu'ils sont composés essentiellement d'hydrocarbures, qui appartiennent à la famille générale des liants organiques et dont le représentant principal est le *bitume*,
- les liants hydrauliques, qui doivent leur nom au rôle primordial joué par l'eau dans le processus de prise, et dont le représentant principal est le *ciment*.

On parle aussi de "liants noirs" pour les premiers et de "liants blanc" pour les seconds mais la différence essentielle entre ces deux familles tient dans le rôle et le comportement du liant dans le composite qu'il forme avec le squelette minéral. L'utilisateur sait parfaitement distinguer, au-delà de la couleur, une chaussée "souple" d'une chaussée "rigide", la première utilisant le bitume et la seconde le ciment.

Les liants hydrocarbonés:

Ce sont des liquides très visqueux, composés d'hydrocarbures et noirs. Les liants hydrocarbonés ou les liants noirs comprennent : le *bitume* et les *émulsions*.

Le bitume

Tous les bitumes sont des produits du pétrole brut. Les bitumes sont des liants hydrocarbonés et, en tant que tels, ils se composent de cinq éléments principaux, qui se combinent dans des proportions assez bien définies, à savoir: carbone, hydrogène, oxygène, soufre, azote, et autres éléments secondaires. Les bitumes sont utilisés en technique routière comme liants dans les graves-bitumes, les sables-bitumes, les bitumineux et les enduits bitumineux.

Les bitumes sont des ensembles très complexes d'hydrocarbures aliphatiques, naphténiques et aromatiques (Duriez M. et Arrambide J.). Très globalement on y rencontre des asphaltènes (solides) en solution dans des maltènes (liquides) et des résines (Figure A1.3).

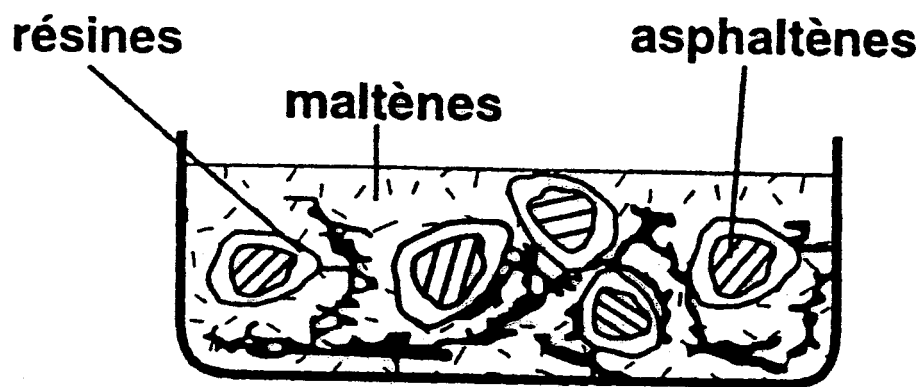


Figure A1.3 Composition des bitumes

Un bitume se présente comme un corps noir "solide" ou liquide visqueux à la température ordinaire. Il réagit soit de façon visqueuse, soit de façon élastique, soit de façon visco-élastique selon les conditions de sollicitation mécanique et la température.

L'émulsion de bitume :

Une émulsion bitumineuse est un mélange de deux constituants non miscibles : le bitume et l'eau. Les deux peuvent former un mélange stable et homogène grâce à l'ajout d'agents tensio-actifs. Au cours de la fabrication d'une émulsion, le bitume est dispersé en fines gouttelettes dans l'eau par une action mécanique. L'ajout d'un agent tensio-actif forme un film protecteur autour des gouttelettes, les empêchant de s'agglomérer et permettant ainsi de maintenir le mélange stable et de l'entreposer pendant un certain temps. La quantité et le type d'agent tensio-actif ajoutés au mélange déterminent la

stabilité de l'émulsion à l'entreposage et influent sur le temps de cure au moment de la pose. L'agent tensio-actif peut être chargé soit positivement soit négativement. C'est cette charge qui détermine si l'émulsion est de type cationique (charge positive) ou anionique (charge négative) (Langlois, 2004).

Au contact entre l'émulsion et les granulats, il y a une rupture de l'émulsion qui se manifeste par :

- l'évaporation d'eau et la coalescence des particules de bitume
- l'évaporation de l'eau restante et des fractions volatiles jusqu'à ce que le liant résiduel ne contienne plus que des hydrocarbures non volatils (mûrissement).

ANNEXE 2

Ensemble des composantes liées à l'instrumentation des corps d'épreuve

Système de régulation thermique

Les essais doivent être faits à température constante, car le comportement du béton bitumineux dépend largement de la température.

Deux thermocouples (les sondes thermiques– RTD (Resistance Temperature Detectors) Sensors), Figure A2.1, ont été placés sur l'échantillon, mesurant la température.

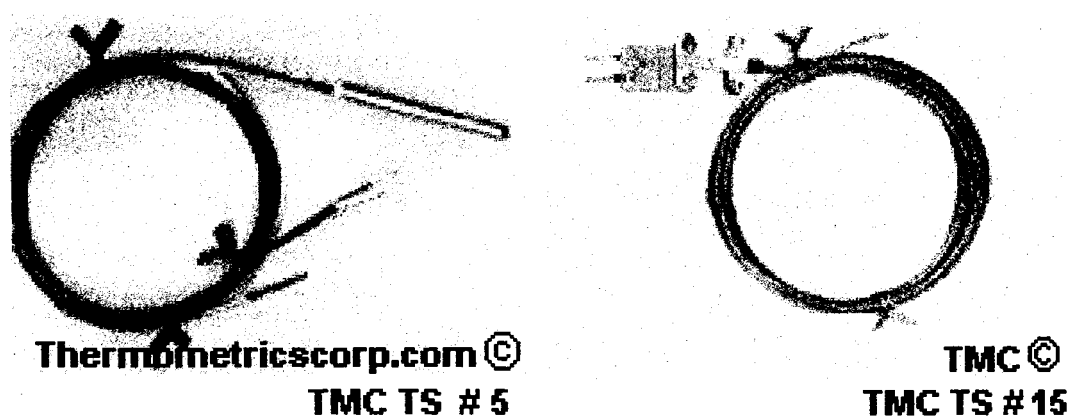


Figure A2.1 : Sondes thermiques– RTD (Resistance Temperature Detectors) Sensors

Une propriété physique fondamentale d'un métal est que sa résistivité électrique change avec la température. Les RTD sont basés sur ce principe. Le coeur du RTD est un élément de résistance.

Quelques métaux ont un changement très prévisible de résistance pour un changement donné de température ; ce sont les métaux qui sont le plus souvent choisis pour fabriquer un RTD. Une résistance de précision est faite d'un de ces métaux à une valeur nominale ohmique, à une température spécifiée. En mesurant sa résistance à quelques températures et en comparant ces valeurs à la valeur de la résistance nominale, le changement dans la résistance est déterminé. Parce que la température vis-à-vis des caractéristiques de résistance est aussi connue, le changement de température au point du

début spécifié peut être calculé. Nous avons maintenant un détecteur pratique de température, qui dans sa forme nue (la résistance) est référée comme un élément de résistance.

Le platine est le métal le plus utilisé à cause de la linéarité de son comportement avec la température, l'intervalle de température large et la stabilité à long terme supérieure. Les autres matériels sont des nickels, le cuivre, un alliage d'en fer-nickel, le tungstène, et l'iridium. La plupart de ceux-ci sont actuellement remplacés par des détecteurs de platine, qui deviennent plus compétitif.

Le coefficient de température (TC), ou l'alpha d'un RTD est une propriété physique et électrique de l'alliage du métal et la méthode spécifique de fabrication. La valeur de Alpha décrit le changement de résistance moyen par unité de température du point de glace au point d'ébullition de l'eau.

Nous devons considérer les limitations de température de tout le matériel utilisé, où chacun des constituants se retrouve dans la chaîne de mesure et les champs de températures auxquels sont exposé.

Les capteurs de force

Pour mesurer la force de déformation de l'enrobé soumis à ce test et le déplacement relatif de plateaux sur lesquels l'échantillon est placé, nous avons utilisé 2 capteurs de force horizontale, un capteur de force verticale et 4 capteurs de déplacements en vertical et en horizontal.

1. Capteurs de force horizontale

Ces capteurs sont fixés symétriquement de part et d'autre du plateau fixe en horizontale. Il s'agit d'un système qui permet de connaître l'effort transmis en compression à l'enrobé de resurfaçage.

Il se compose d'un "ressort" métallique qui reprend les efforts de compression transmis à la couche de resurfaçage, des jauges de déformation qui sont placées de façon à connaître la charge appliquée et d'un pont de Wheatstone. Le mécanisme est expliqué sur le schéma suivant.

Le capteur ayant été conçu par un technicien de l'ETS, il n'existe pas le certificat d'étalonnage, il sera donc nécessaire d'effectuer une calibration du système. La calibration du capteur permettra d'obtenir les équations donnant le signal de sortie du circuit en fonction du signal mécanique à l'entrée en considérant les paramètres suivants :

- Module élastique du ressort
 - Coefficient de Poisson
 - La tolérance du facteur de jauge
 - Les dimensions du ressort
 - L'atténuation du signal due aux résistances
- } 1 à 3 %

Le ressort du capteur est constitué d'un alliage d'aluminium de type 7075-T6 dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau AII.

Tableau AII

Caractéristiques du capteur de force

Module d'élasticité (Gpa)	Limite apparente d'élasticité avec une déformation permanente de 0.2%(Gpa)	Coefficient de dilatation thermique (ppm/°C)	Densité (g/cm ³)	Température maximale (°C)	Conductivité thermique (watt/m.°C)	Allongement (%)	Dureté
71.76	483	23.22	2.798	37.78	121	10	B 150

La documentation technique concernant la précision des jauges donne les renseignements suivants :

- La plage de variation de la température θ correspond à un intervalle compris entre -75°C et 175°C
- La valeur du facteur de jauge varie également avec la température
- La puissance thermique est également soumise à variation avec la température
- La résistance à la fatigue : on considère une durée de vie de 100000 cycles à +/- 1500 μ m/m.

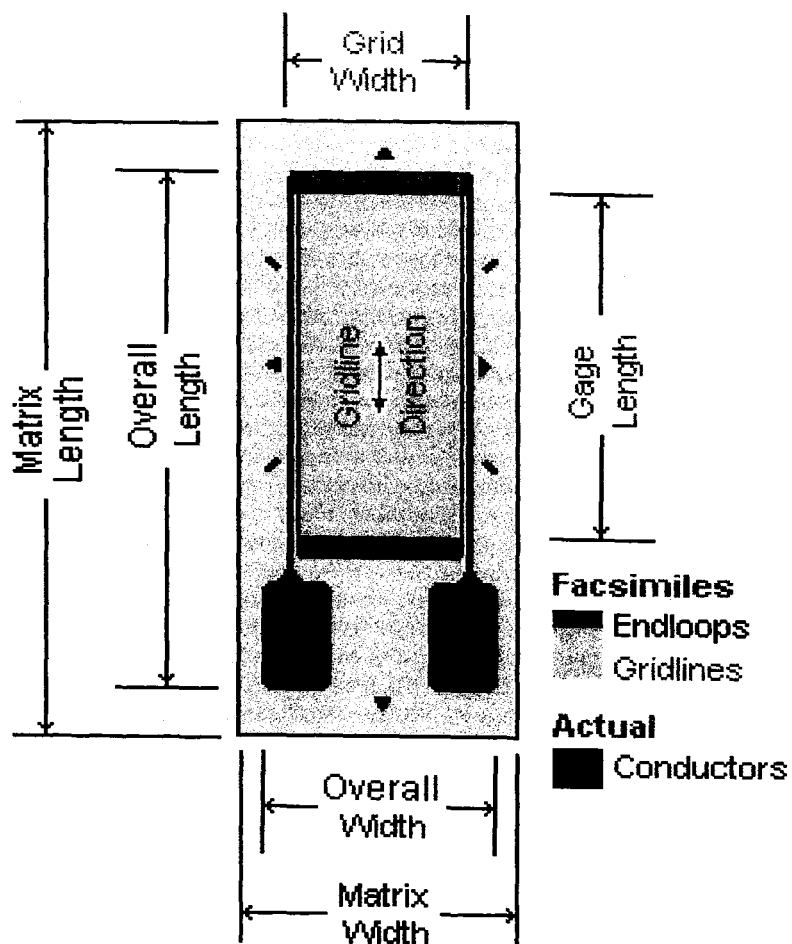


Figure A2.2 Jauge de déformations de type CEA-13-125UT-351

2. Capteurs de force verticale

La force induite en verticale est enregistrée par une cellule de charge située en bas de la machine.

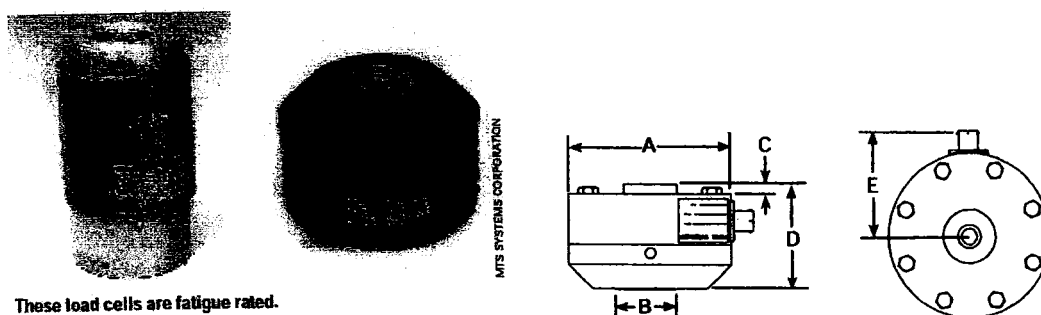


Figure A2.3 Les cellules de charge

Les cellules de charge ont beaucoup des caractéristiques importantes et uniques. La conception axiale minimise les erreurs de transmissibilité. Les cellules sont fabriquées pour être insensible aux chargements et aux mouvements latéraux générés par la géométrie de spécimen.

Une technique appropriée d'installation réduit le bruit électrique. Également, un compensateur thermique assure une stabilité à long terme de la cellule de mesure.

La fiabilité de la cellule est assurée en utilisant une pièce de construction monolithique et du matériel de qualité très élevée (matériaux pour les avions), traité à haute température pour minimiser la déformation.

Le calibrage, les cartes de gamme, les câbles et les rondelles en spirale sont séparément évalués. Tous les capteurs de force MTS utilisent le connecteur Bendix (PT02E-10-6P).

Les cellules de charge MTS pour les systèmes de test électromécaniques sont conçues pour être extrêmement précises et offre une bonne stabilité et linéarité. Ils fournissent la protection de surcharge jusqu'à 150% de la capacité et sont conçus avec des résistances incorporées pour permettre une vérification de routine de précision. Les cellules sont des cellules de chargements de tension/compressions et le montage se fait à l'aide d'un boulon d'encrage permettant un usage simplifié (Figure A2.3).

3. Les capteurs de déplacement

Pour connaître les déplacements relatifs entre les différents plateaux mobiles, des capteurs de déplacement sont placés à différents endroits sur le corps d'éprouve (Figure A2.4). Les capteurs de déplacement sont situés près de la fissure et permettent de mesurer les mouvements directement sur l'éprouvette. Un quatrième capteur de déplacement, placé sous les plateaux mobiles, assure un contrôle précis du déplacement vertical à partir d'un référentiel stable. Cet extensomètre est en fait placé entre la base du plateau mobile vertical, qui supporte le système de rail et de patins à roulement à billes, et le boulon d'attache de l'appareil à la cellule de charge à la base de la presse MTS, lequel peut être considéré comme un repère indéformable.

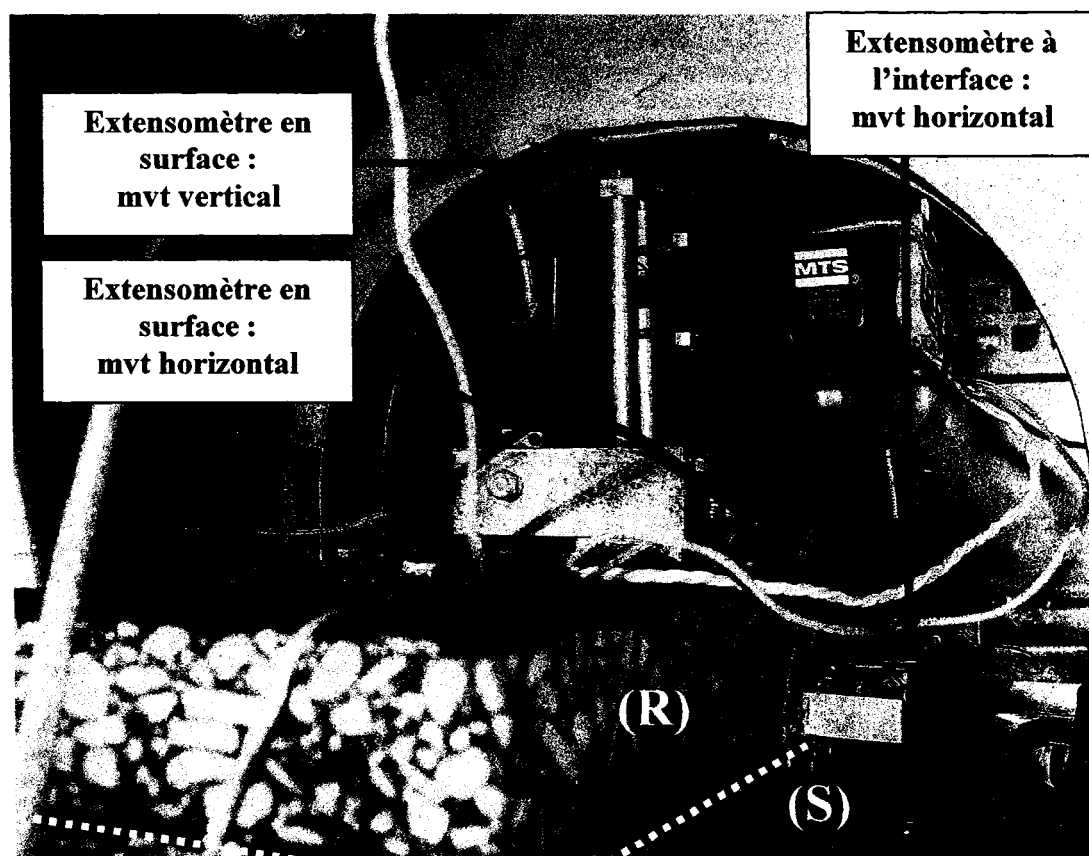
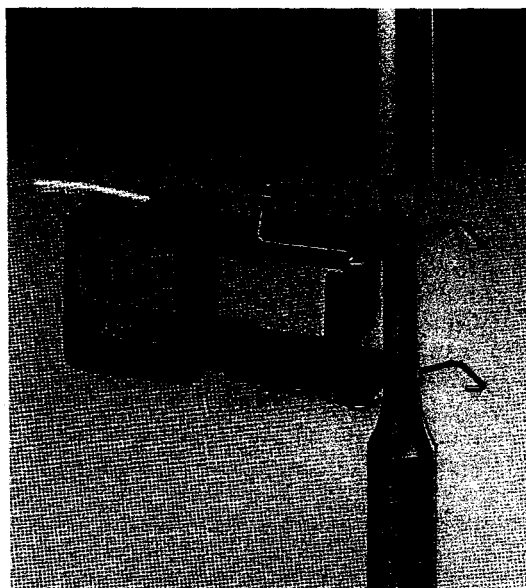


Figure A2.4 Position des capteurs de déplacement

La Figure A2.4 montre les deux capteurs de déplacement placés directement sur la surface de la couche de resurfaçage et celui placé latéralement au niveau de l'interface substrat (S) –resurfaçage (R).

Les capteurs de déplacement sont de type extensomètre à jauge résistive. Deux capteurs pour le déplacement horizontal (un placé directement à la surface du resurfaçage et l'autre placé à l'interface) et un extensomètre pour le déplacement vertical (placé à la surface du resurfaçage) ont été utilisés.



Modèle 632.11

Cet extensomètre a une base de mesure de 25mm (1 pouce). La plage de déformation est de $\pm 15\%$.

Figure A2.5 Extensomètres MTS modèle 632.11

Les extensomètres 632.11 ont, en exécution standard, une base de mesure de 25 mm (ou 1 pouce) et une course de $\pm 3,75$ mm (ou $\pm 0,15$ pouce). Ceci permet de faire des essais dans une plage de déformation de $\pm 15\%$. Il s'agit du modèle d'extensomètre

MTS le plus employé. Ils conviennent aux essais statistiques et dynamiques ainsi qu'à nombre de formes, tailles et matériaux différents d'éprouvette. Cet extensomètre peut être également utilisé pour mesurer les variations de circonférence.

ANNEXE 3

Calcul des amplitudes des déformations imposées en verticale

Simulation du comportement d'une chaussée

Pais et Pereira (2000) proposent une relation entre l'activité d'une fissure mesurée In Situ et l'activité de cette fissure après resurfaçage. Il est intéressant de noter que les paramètres déterminants sont reliés aux caractéristiques de l'enrobé de resurfaçage et à celles du substrat (réponse sous charge et ouverture moyenne des fissures).

$$AV = (a * \ln(h_r) + b * \ln(E_t) + c * \ln(a_f) + d) * (e * AV) + f \quad (A3.1)$$

AV	Vertical crack activity after overlay (10^{-6} m)... Δy_{ReSurf}
AV ⁻	Vertical crack activity before overlay (10^{-6} m)... Δy_{ReSurf}
a _f	Crack width (mm)
h _r	Overlay thickness (cm)
E _t	Overlay stiffness (MPa)

Les coefficients ont été établis à partir de relevés effectués sur 14 sections au Portugal à l'aide d'un CAM (Crack Activity Meter) et sont présentés dans le Tableau AIII. Le paramètre AV est associé au Δy_{ReSurf} que l'on pourra imposer dans le cadre du programme d'essai sur corps d'épreuve pré-fissurés testés en mode bi-axial.

Tableau AIII

Valeurs des paramètres de l'équation de Pais et Pereira (2000)
pour évaluer les mouvements en «x» et en «y» après une action de resurfacement

Crack Type	Break point	a	b	c	d	e	f	R ²
Transversal	Before	-0,694	-2,588	0,2911	22,694	0,642	-3,595	0,8519
	After	-2,662	-7,496	2,4637	67,578	0,452	-19,98	0,9649
Longitudinal	Before	-0,974	-2,688	0,3924	22,394	0,439	-1,293	0,4999
	After	-0,951	-3,148	0,5609	25,975	1,155	-1,992	0,9271

Bien que les valeurs calculées de AV ne soient pas directement représentatives des conditions spécifiques au Québec, elles permettent de cibler un ordre de grandeur important pour le cadre des essais en laboratoire. Elles témoignent également d'une approche permettant de faire le lien entre les caractéristiques de la structure à resurfacer (mesure avant resurfacement : AV) et les conditions de sollicitation à imposer en laboratoire (après resurfacement : AV). Par le fait même, elles mettent en relief la possibilité d'évaluer des conditions d'essais extrêmes en laboratoire (chargement spécifique, températures imposées, autres) et d'en mesurer les effets par l'amplitude des déplacements, lesquels peuvent être convertis en paramètres de chantier (valeurs In Situ).

Le code de calcul FLAC a également été utilisé comme outil de référence pour permettre de faire le lien entre les amplitudes relevées des mouvements au droit d'une fissure avant resurfacement (Δx_{InSitu} ; Δy_{InSitu}) et celles après resurfacement (Δx_{ReSurf} ; Δy_{ReSurf}). Par analyse numérique, le comportement d'une chaussée fissurée soumise à l'action d'une charge ponctuelle avant et après des opérations de resurfacement a été

simulé. Le but de cette analyse est de simuler les mesures réalisées à partir d'un essai In Situ au FWD ou par mesure à la CAM, permettant de mesurer la déflexion verticale (Δy) et horizontale (Δx) aux lèvres d'une fissure.

Un maillage de 5 x 1,045 mètre a été construit pour représenter la chaussée. Une fissure transversale de 10 mm d'ouverture est simulée sur toute l'épaisseur de la couche d'enrobé bitumineux. La section est composée de 5 couches de matériaux aux propriétés distinctes. La Figure A3.1 présente le maillage réalisé avant le resurfaçage. Les appuis sont fixes à la base et libres verticalement aux deux extrémités. La charge d'un ÉCAS (560kPa) est appliquée immédiatement du côté droit de la fissure sur une surface de 300 mm de diamètre. La Figure A3.2 présente un agrandissement de la région fissurée. Le Tableau XI présente les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés pour chaque couche.

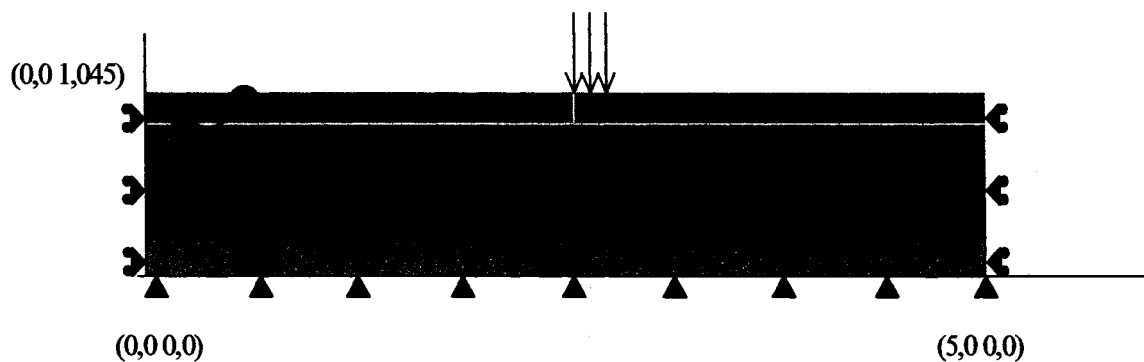


Figure A3.1 Maillage appliqué au tronçon de la chaussée fissurée

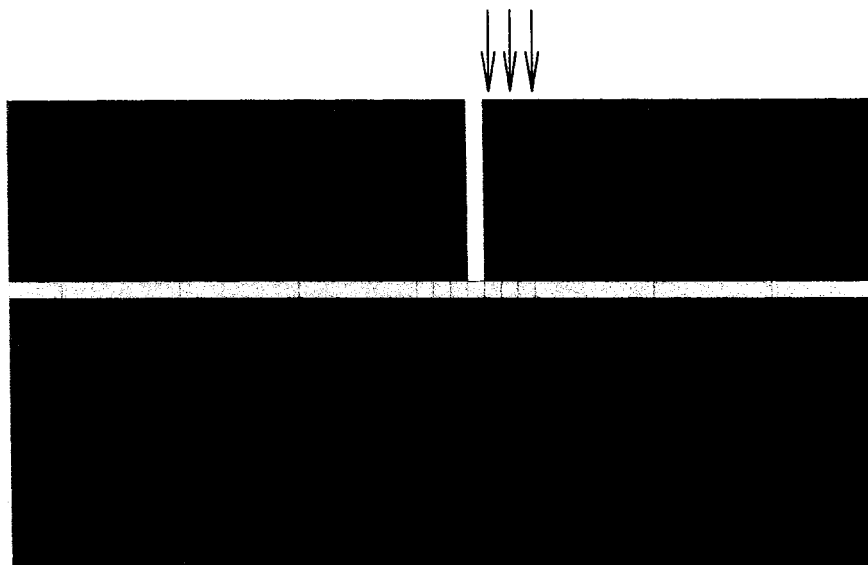


Figure A3.2 Agrandissement de la zone fissurée

Tableau AVI

Caractéristiques des couches

Couche	No	Modèle rhéologique	Module E (MPa)	Coefficient ν	Épaisseur h (m)
Infrastructure	1	Mohr-Coulomb	50	0,3	0,188
Sous- fondation	2	Mohr-Coulomb	150	0,3	0,310
Fondation	3	Mohr-Coulomb	400	0,3	0,300
Intermédiaire	4	Élastique	333 GPa(K) 11.1 kPa(G)		0,015
Enrobé	5	Élastique	2300	0,35	0,150

La couche 4 représente une couche à faible résistance en cisaillement pour simuler l'absence de cohésion entre l'enrobé et la fondation granulaire. Le module volumétrique est très grand pour représenter l'incompressibilité de la couche.

Quatre simulations ont été réalisées : la première considérant la chaussée fissurée avant resurfage et les trois suivantes représentant la chaussée après resurfage avec des épaisseurs d'enrobé de 20, 40 et 80 mm. Les propriétés de l'enrobé de resurfage sont les mêmes que l'enrobé original.

Le Tableau AV présente les résultats avant et après resurfage. Les résultats d'analyse sont présentés sous forme de déformations verticales et horizontales. La première colonne indique l'essai, les colonnes 2, 3 et 4 correspondent aux résultats des déformations verticales et les colonnes 4, 5 et 6 présentent les résultats des déformations horizontales.

Tableau AV

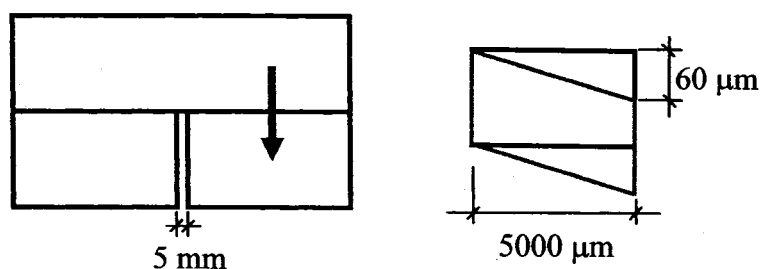
Résultats des simulations numériques

Essais	$\epsilon_{yGauche}$ ϵ_{yG} ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_{yDroite}$ ϵ_{yD} ($\times 10^{-6}$)	$\Delta \epsilon_y$ ($\times 10^{-6}$)	ϵ_{xG} ($\times 10^{-6}$)	ϵ_{xD} ($\times 10^{-6}$)	$\Delta \epsilon_x$ ($\times 10^{-6}$)
Avant ReSurf	8,277	442,8	435,4	0.4203	84,69	84,27
ReSurf : 20 mm	142,4	150,5	8,1	1,639	0,916	0,723
ReSurf : 40 mm	131,5	135,2	3,7	1,997	0,133	1,864
ReSurf : 80 mm	108,2	109,7	1,5	1,907	-0,334	2,24

Les résultats obtenus en termes de déformations verticales (Tableau XII) sont très comparables à ceux présentés par Pais et Pereira (2000). Par contre, les déplacements horizontaux semblent aller dans le sens contraire. Ceci peut s'expliquer par le fait que

Pais et Pereira (2000) simulent la présence de la fissure par des éléments dont la rigidité est nettement plus faible que ceux des matériaux constituant la structure de la chaussée. Dans les essais de simulation réalisés, la fissure dans le maillage est représentée par un modèle nul, dont les propriétés des éléments sont fixées à zéro. Sous charge, après resurfaçage il y aura déplacement des frontières de la fissure par un effet d'écrasement, avec une tendance à l'ouverture horizontale des lèvres de la fissure initiale.

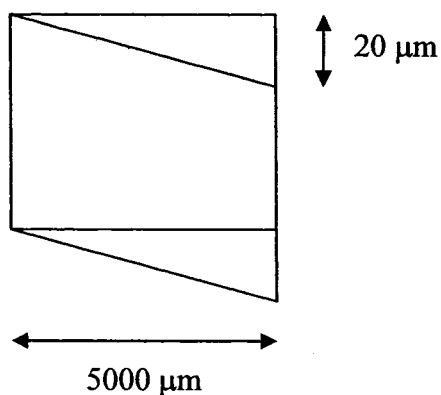
Amplitude imposée



Taux de déformation imposé : $\gamma = \frac{60 \mu m}{5000 \mu m} = 1,2\% !$

Taux calculé pour $\gamma = 1,2\%$:

$$\frac{1,2\%}{0,5s} = 8640\% / hre = 86\,400\,000 \times 10^{-6} \varepsilon / hre$$



$$\gamma = \frac{20 \mu m}{5000 \mu m} = 0,4\% = 28,8 \varepsilon / hre$$

$$\gamma = 28\,800\,000 \times 10^{-6} \varepsilon / hre$$

ANNEXE 4

Calcul des amplitudes des déformations imposées en horizontale

Mouvement horizontal :

Amplitude imposée

On part avec l'hypothèse que la capacité de relaxation de l'enrobé fait en sorte qu'en cours de refroidissement les contraintes induites dans l'enrobé de resurfacement sont négligeables pour les baisses de température au-dessus de -5°C . En effet, l'essai de retrait thermique empêché TSRST montre que l'augmentation de la contrainte au sein de l'éprouvette lorsque la température passe de $+5^{\circ}\text{C}$ à -5°C est très faible et ce, malgré l'application d'un taux de gel rapide 10°C/h . Soulignons qu'en conditions réelles le taux de gel ne dépasse pas 3°C/h dans la masse (Pierre et coll, 2005). Bien évidemment, en surface il peut en être autrement dû notamment aux passages nuageux, à l'exposition au soleil, etc. Par ailleurs, les conditions de retenue sur l'éprouvette de l'essai TSRST sont également extrêmement sévères : aucun retrait permis. En réalité, aux températures au tours de -5°C , la fondation granulaire supérieure, en contact direct avec l'enrobé, est déformable. Pour de plus basses températures (-20°C), la situation est tout autre : la masse granulaire se rigidifie due à la formation de glace entre les particules figeant ainsi la fondation supérieure qui devient dès lors très peu déformable (Pierre et coll, 2005). Les contraintes induites jusqu'aux températures de -5°C peuvent être admises comme étant négligeables d'autant plus que l'enrobé à ces températures possède un pouvoir de relaxation important.

Au Québec, la classe PG la plus souvent utilisée par le MTQ est le PG 58-34 (bilan de 2003). Toutefois, depuis 2 ans dans la région de Montréal, on utilise des bitumes de classe PG 70-28 sur autoroutes et en couche de surface. Mécaniquement, en première approximation, on peut admettre que l'effet thermique se fait sentir pour une plage de -5°C à environ -30°C , soit pour un différentiel de température de 25°C ($\Delta T = 25^{\circ}\text{C}$).

Le coefficient de dilatation thermique d'un enrobé varie avec la température : plus le matériau est froid, meilleur est sa cohésion et, par conséquent, sa dilatation/contraction

thermique en est réduite. Le Tableau AVI présente les coefficients de dilatation thermique pour les enrobés testés dans le programme expérimental.

Tableau AVI

Coefficients de dilatation thermique
pour les enrobés testés dans le programme expérimental

α $\mu\text{s}/^\circ\text{C}$		EB-14	ESG-10
	-5°C	25,0	23,0
	-15°C	22,5	20,7
	-25°C	20,8	19,2
	-35°C	17,0	15,8

En considérant un taux de refroidissement constant, comparable à celui spécifié dans le cadre de l'essai TSRST, on peut estimer le niveau de déformation restreint en cours de refroidissement (Figure A4.1) (Rapport GTC, 2005).

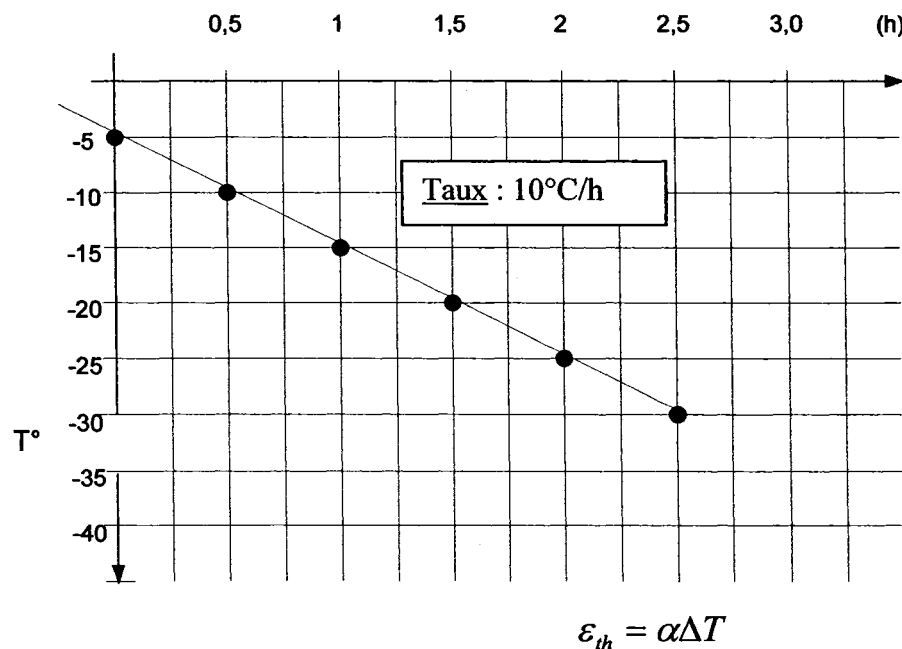


Figure A4.1 Cas des matériaux élastiques

En prenant un « α » constant pour des paliers de température, on peut intégrer au calcul la variation du coefficient de dilatation thermique du matériau, soit :

$$\begin{matrix} (1) & (2) & (3) \\ -5 \text{ à } -15, & -15 \text{ à } -25 & \text{et } -25 \text{ à } -30^\circ\text{C} \end{matrix}$$

La déformation totale peut s'écrire :

$$\varepsilon_{th}^{tot} = \varepsilon_{th}^{(1)} + \varepsilon_{th}^{(2)} + \varepsilon_{th}^{(3)} = \alpha^{(1)} \Delta T^{(1)} + \alpha^{(2)} \Delta T^{(2)} + \alpha^{(3)} \Delta T^{(3)} \quad (\text{A4.1})$$

Or,

$$\Delta T^{(1)} = \Delta T^{(2)} = \Delta T = cte = 10^\circ\text{C} \quad (\text{A4.2})$$

et,

$$\Delta T^{(3)} = 5^\circ\text{C}$$

Par conséquent,

$$\varepsilon_{th}^{tot} = \Delta T (\alpha^{(1)} + \alpha^{(2)}) + \Delta T^{(3)} \alpha^{(3)} \quad (\text{A4.3})$$

pour l'enrobé EB-14, on a donc :

$$\varepsilon_{th}^{tot} = 10^\circ\text{C} \left[\left(\frac{25,0 + 22,5}{2} \right) + \left(\frac{22,5 + 20,8}{2} \right) \right] + 5^\circ\text{C} \left(\frac{20,8 + 17,0}{2} \right)$$

$$\varepsilon_{th}^{tot} = 10^\circ\text{C} [(23,75 \mu\text{s}/^\circ\text{C}) + (21,65 \mu\text{s}/^\circ\text{C})] + 5^\circ\text{C} (18,9 \mu\text{s}/^\circ\text{C})$$

$$\varepsilon_{th}^{tot} = 548 \mu\text{strain}$$

$$\varepsilon^{tot} = \frac{\Delta l}{L} \Rightarrow \Delta l = 3000\text{mm} \times 548 \times 10^{-6} \quad (\text{A4.4})$$

$$\Delta l \text{ varie de } 1,6 \text{ mm} \rightarrow 2,2 \text{ mm}$$

$$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow \\ (\text{pas de fissure} & (\text{pas de fissure} \\ 3\text{m}) & 4\text{m}) \end{matrix}$$

Fréquence de chargement

Pour permettre une comparaison avec les résultats obtenus des essais au TSRST, la période associée à chaque cycle de sollicitation devrait être :

$$\frac{25^{\circ}\text{C}}{1/2\text{cycle}} \cdot \frac{\text{hre}}{10^{\circ}\text{C}} = 5\text{hres/cycle}$$

En visant un cycle de sollicitation d'une période comparable à celle de l'essai TSRST, la fréquence correspondante peut s'écrire:

$$f_r = 1/18000\text{s} = 0,0000555\text{ Hz} = 5,5 \times 10^{-5}\text{ Hz}$$

ANNEXE 5

Certificat de conformité du bitume

Émulsion

				Numéro Attestation		03080		
				N° de billet de livraison				
Informations générales				Expédition				
Lieu de fabrication :		Usine St-Hyacinthe		Transporteur				
Lieu d'entreposage et d'expédition:		Usine St-Hyacinthe		N° citerne		Date	Quantité	
Réservoir d'entreposage :		EC-2						
Type :		Cationique						
Classe :		Supercol		Entrepreneur				
Numéro de lot d'émulsion :		04023		Notes :				
Date de fabrication :								
Date de vérification :								
Essais de caractérisation		E-114-03	Exigences					
		Résultats	min					max
Distillation 205°C								
Résidu (%)			62.0	-				
Huile (%)			1.0	4.0				
Eau (%)			-	-				
Désémulsionnement (%)			60.0	-				
Essai au flotteur à 60°C (sec)			1200	-				
Gâchage au ciment (g)								
Pénétration à 25°C (d _{mm})			150	250				
Recouvrance d'élasticité (%)			55.0	-				
Teneur en eau (%)								
Viscosité SFs 50°			30.0	150.0				
Préparé par		Data						
Approuvé par		Data						
Espace réservé au client								
N° du contrat				Soumis par (organisme de control) :				
Prélevé par :		Date :		A l'usage du laboratoire				
N° de réservoir		Température :						
				Date reçu :				

(SOURCE : S.T.E.B. Div. de Sintra)

**BITUME PG
(AASHTOM 320)**

		N° de prevue	
INFORMATIONS GÉNÉRALES		RECOMMANDATIONS – TEMPERATURE D'UTILISATION	
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Bitumar Inc. 3000 Broadway, Montréal, Qué., H1B5B4			Minimale Maximale
Fabrication et lieu de fabrication Bitumar Inc. 3000 Broadway, Montréal, Qué., H1B5B4		Entreposage	156 175
Classe de bitume PG 70-28	Nom commercial Bitume PG 70-28		
N° de lot 037028-11	Date de Fabrication 2003, 09,28	Malaxage	156 170
ESSAIS DE CARACTERISATION		EXPEDITION	
Date des essais de caractérisation	2003.09.30	Numéro et nom de la centrale d'enrobage	
Masse volumique (g/cm³) à 25°C, AASHTO T228	1.015		
Masse volumique (g/cm³) à 25°C, AASHTO T228	1.021		
Stabilité au stockage (°C), LC25-003	0.5	Transporteur	
TBA moyenne (°C)	54.6		
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	70		
Viscosité Brookfield (Pa*s), à 135°C, AASHTO T 316	0.893	N° de la citerne	Date du chargement
Viscosité Brookfield (Pa*s), à 165°C, AASHTO T 316	0.259		Quantité livrée kg
Température élevée de caractérisation T _e (°C)	70.96	NOTES Ce produit doit être entreposé dans un réservoir vide ou contenant le même grade fournis par Bitumar Inc. Si ce n'est pas le cas il est de votre responsabilité de prendre les mesures nécessaires pour confirmer la caractérisation du produit. Peu importe les recommandations du fournisseur, l'entrepreneur doit respecter les documents contractuels.	
Température base de caractérisation T _b (°C)	29.71		
Module de rigidité. S _o (60) (mPa)	48.3		
Pente de m ₀ (60)	0.439		
ESSAIS DE CONTROLE			
Date des essais de contrôle	2003.10.07		
Température élevée de caractérisation T _e (°C)	71.9		
Module de rigidité. S _o (60) (mPa)	47.85		
Pente de m ₀ (60)	0.438		
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	72.5		
REMARQUES			
Préparé par : Hua 2003.10.07		Date Liu 2003.10.07	Approuvé par :

FPSQ-10.11 RO(REF. ALL/PDC)

(SOURCE BITUMAR INC.)

BITUMES – Attestation de conformité

			N° de l'attestation de conformité 242873		
INFORMATIONS GÉNÉRALES			RECOMMANDATIONS – TEMPERATURE D'UTILISATION		
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Les Industries McAsphalt Ltée. - Valleyfield				Minimale	Maximale
Fabrication et lieu de fabrication Les Industries McAsphalt Ltée. - Valleyfield			Entreposage	140	165
			Malaxage	143	157
Classe de bitume PG 58-34(P)	Nom commercial	T206	Compactage	100	-
Date de Fabrication 22-Aug-1998	N° de lot 9808-22-01				
ESSAIS DE CARACTERISATION			EXPEDITION		
Date des essais de caractérisation	22-Aug-98		Numéro et nom de la centrale d'enrobage		
Masse volumique (g/cm³) à 25°C, AASHTO T228	1.022		DJL		
Stabilité au stockage (°C), LC25-003	0.3		Transporteur		
Recouvrance d'élasticité (%), à 10°C, LC 25-005	31.3		RMT		
Viscosité Brookfield (Pa*s), à 135°C, AASHTO T 316	0.300		N° de la citerne 19757	Date du chargement 08/29/98	Quantité livrée 37990kg
Viscosité Brookfield (Pa*s), à 165°C, AASHTO T 316	0.093		NOTES RL 81820 Heure d'arrive= 15 :15 Temp. =163°C Peu importe les recommandations du fournisseur, l'entrepreneur doit respecter les documents contractuels.		
Température élevée de caractérisation T _e (°C)	59.6				
Température base de caractérisation T _b (°C)	36.8				
Module de rigidité. S _o (60) (mPa)	104.0				
Pente de m ₀ (60)	0.45				
ESSAIS DE CONTROLE					
Date des essais de contrôle	22-Aug-98				
Température élevée de caractérisation T _e (°C)	59.6				
Module de rigidité. S _o (60) (mPa)	104.0				
Pente de m ₀ (60)	0.450				
REMARQUES					
Préparé par :		Date 08/29/98	Approuvé par :		Date 08/29/98

(SOURCE McAsphalt Ltée.)

LIANT BITUMINEUX

		No. ID LOT	No. attestation 03125 - 2	
INFORMATIONS GÉNÉRALES		RECOMMANDATIONS—		
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Raffinerie de Montréal		Température d'utilisation(1)		
Fabricant et lieu de fabrication Péto-Canada, Raffinerie de Montréal		Entreposage (°C)	138	170
Classe de bitume PG58-28	Nom commercial	Malaxage (°C)	138	152
Date de fabrication 2003/07/13	No. de lot 03125 - 2			
ESSAIS CONVENTIONNELS		EXPÉDITION		
Date de la caractérisation	2003/07/26	Numéro et nom de la centrale d'enrobage		
Masse volumique @ 25°C (g/cm³)	1.0249	Transporteur		
Stabilité au stockage (°C)	0.5			
Recouvrance d'élasticité @ 10°C (%)	n/a	No. de la citerne	Date chargement	Quantité livrée kg
Viscosité Brookfield @ 135°C (Pa.s)	0.273	Notes (1) : Températures calculées selon LC 25-007		
Viscosité Brookfield @ 165°C (Pa.s)	0.079			
T _e (°C)	59.7			
T _b (°C)	-30.1			
Module de rigidité S ₀ (MPa)	76			
Pente m ₀	0.440			
TBA moy.	46.1			
ESSAIS DE CONTRÔLE				
Date du contrôle	2003/07/26			
Recouvrance d'élasticité @ 10°C (%)				
T _e (°C)	60.0			
Module de rigidité S ₀ (MPa)	71			
Pente m ₀	0.453			
G* / sin (δ) (kPa)	1.30			
Point éclair (°C)	306			
REMARQUES				
Préparé et approuvé par : M.J. Larouche Technicien		Date : 2003/07/26		
ESPACE RÉSERVÉ AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS				
No. du contrat		Soumis par (organisme de contrôle)		
Prélevé par	Date			
No. du réservoir à la centrale d'enrobage	Température	À l'usage du laboratoire		Date reçu

(Source Péto-Canada – Laboratoire PÉTROCANADA)

	FICHE TECHNIQUE
	EMULPLAST EC

Définition

Émulsion cationique
pour enrobés coulés à froid

Domaine d'emploi

- GRIPFIBRE
- GRIPSEAL

Caractéristiques générales

	SPECIFICATIONS			
	Bitume résiduel		EMULPLAST EC	
	MIN	MAX	MIN	MAX
Densité à 25°C	1,0	1,1	1,0	1,1
Charge des particules	-	-	positive	
Viscosité Saybolt Furol à 25 °C (s)	-	-	15	
Stabilité au stockage 24h (%)	-	-	-	1
Retenu au tamis 630 µm (% en masse)	-	-	-	0,10
Retenu au tamis 160 µm (% en masse)	-	-	-	0,25
Résidu par distillation (% en masse)	-	-	58	61
Indice de rupture			150	
Pénétration à 25°C, 100g, 5sec, (0,1mm)	50	150		
Température Bille et Anneau (°C)	55			
Solubilité dans le trichloroéthylène (% en masse)	99	-	-	-

Conditions d'utilisation

Température d'entreposage :	entre 10°C	et 60°C	
Température d'application :	entre 20°C	et 40°C	
Taux d'application :	entre 1 l/m ²	et 2 l/m ²	selon l'application (correction ou finition)

Avantages

- Adhésivité fortement accrue.
- Utilisation et procédures de malaxage conventionnelles
- utilisation d'équipement à liant d'accrochage traditionnelle
- Bitume de base de l'émulsion présentant une très bonne cohésivité par modification avec des copolymères EVA.

ANNEXE 6

**Calculs effectués pour l'obtention des facteurs de correction à
induit par le four à ignition**

**Calculs effectués pour l'obtention des facteurs de correction
induit par le four à ignition**

Facteur de correction induit par le four à ignition sur l'enrobé

Données Initiales		
	Essais	
	1	2
No. de la briquettes	1	2
% bitume initial	5.1	5.1
Poids Panier	2632.3	2634.5
Poids Échantillon initial	1136.8	1162.2
Poids Panier + Échantillon	3769.1	3796.7
Poids Panier + Échantillon à t°C	3709.1	3734.6
Poids Échantillon final	1076.8	1100.1
% de bitume à t°C (calcul)	5.28	5.34
Calcul du Facteur de correction		
% bitume à t°C - % bitume initial	0.18	0.24
Moyenne	0.211	
Facteur de correction	0.211	

Facteur de correction induit par les granulats

Mélange Granulats 2005		
	% P_{avant}	% P_{après}
10	10.0	98.2
5	5.0	59.1
2.5	2.5	37.9
1.25	1.3	22.8
0.630	0.6	13.5
0.315	0.3	7.4
0.160	0.2	3.5
0.080	0.1	0.8

Il a été noté que la perte induite par le granulat était presque entièrement observée au tamis 80 μm pour une valeur moyenne de 1,5%. C'est-à-dire que la valeur observée sur la granulométrie après lavage des granulats surestimait la valeur au tamis 80 μm de 1,5%. Ce facteur est donc appliqué à tous les essais au four à ignition pour ce type de granulat.

Facteur de correction

Facteur de correction BITUME sans tenir compte des granulats	=	0,211
Facteur de correction GRANULATS sans bitume	=	0,185
Facteur de correction TOTAL	=	0,211
Facteur de correction pour BITUME SEULEMENT	=	0,026

ANNEXE 7

Mesure de la rugosité à l'aide d'un pendule de frottement

La mesure de la rugosité

Les surfaces des chaussées exigent deux types de rugosité pour assurer les niveaux de friction nécessaires pour permettre un freinage sécuritaire. La *micro-rugosité* réfère à la petite échelle des particules individuelles d'agrégats dans la surface de la chaussée, et la *macro-rugosité* réfère aux dépressions plus grandes de la surface qui se produisent entre les particules individuelles d'agrégats.

L'efficacité de la micro-rugosité de la surface peut être réduite avec le temps par l'action de polissage causée par les passages répétés (usure), les effets des intempéries et l'action des balais à chaussée. Les contaminants de la surface peuvent également agir pour réduire les effets positifs de la micro-rugosité et de la macro-rugosité de la chaussée. Par exemple, les épaisseurs d'eau excessives observées pendant les orages violents peuvent, à certaines vitesses, occasionner le phénomène d'aquaplanage avec la possibilité de perdre le contrôle de direction. Les chaussées peuvent avoir leur rugosité de surface complètement détruite par le caoutchouc des pneus des véhicules lourds en freinage. De telles zones d'accumulation de caoutchouc peuvent devenir très glissantes et très dangereuses.

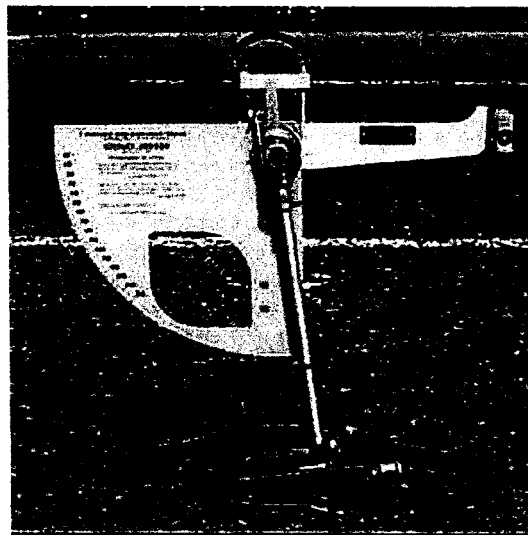


Figure A7.1 Pendule de Frottement

Ceci est un équipement d'essai pour mesurer le SRV (Skid Resistance Value) - Valeur de Résistance au Polissage (Frottement).

Le principe de l'essai est de fournir une mesure relative caractérisant l'état limite de polissage des granulats sous le trafic routier (la résistance au polissage d'un matériau est quantifiée par son coefficient de polissage par projection, appelé aussi sa valeur CPP).

Le procédé est tout à fait simple, le pendule est relâché de la position horizontale par un bouton de relâchement rapide et le patin de caoutchouc au fond du pendule contacte la surface de route pour une longueur fixe que nous avons réglée précédemment abaissant la hauteur du pivot du pendule. Avec le testeur de pendule, nous obtenons un très bon regard sur la surface de route. L'équipement est utilisé pour déterminer la résistance d'erreur/dérapiage d'une surface.

Cette contribution remarquable à la sûreté de route est le résultat de plus de 10 ans de développements intensifs par le Laboratoire de Recherche de Route de Transport (TRRL) du Département de Recherche Scientifique et Industrielle - une organisation de Gouvernement britannique. La nouvelle version, le modèle «B», de l'instrument a été spécialement développée pour répondre à la demande de pays comme l'Allemagne, qui préfère une conception plus robuste. Le modèle «B» inclut aussi une échelle supplémentaire pour l'usage en laboratoire à aucun coût supplémentaire. L'instrument, qui permet une lecture directe, donne une mesure de la friction entre le dérapage d'un pneu et la surface de route mouillée.

Mesure du coefficient de frottement

- Mouiller abondamment la surface et le patin avec de l'eau;
- Mettre le pendule en position de départ, en position horizontale, retenu et amener l'aiguille contre le bras du pendule;

- Libérer le pendule en pressant le bouton de déclenchement; arrêter avec la main le mouvement “retour” du pendule avant que le patin reffrappe la surface;
- Noter la graduation indiquée par l’aiguille, qui est la valeur BPN (British Pendulum Number);
- Effectue 5 (cinq) lâchers successifs, en remouillant la surface juste avant de lâcher.
- Si l’écart entre les valeurs indiquées dépasse trois unités, répéter l’essai jusqu’à obtention de trois valeurs successives constantes, puis mesurer à nouveau la longueur de frottement. Si elle ne répond plus à la tolérance prescrite, l’essai est annulé.

ANNEXE 8

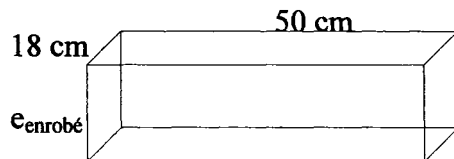
Confection des corps d'épreuve et la mise en place

1. Compactage et sciage des plaques utilisés comme substrat (Procédure P4.10-202)

Premièrement, nous établissons le type d'enrobé de la couche de base désirée, le substrat, et nous calculons la masse nécessaire pour la confection d'une plaque à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Volume de la plaque} \times D_{mm} \times \% \text{ compaction visé (95\%)}$$

Étant donné que les plaques de base en enrobé EB-14 sont compactées en laboratoire, l'épaisseur de ces plaques a été fixée à l'épaisseur minimale de mise en œuvre de l'enrobé EB-14 sur route, soit une épaisseur de 55 mm.



$E_{\text{enrobé}}$ - couche de base: 55mm
 - couche de resurfacement:
 - 55mm
 - 100mm

$$V_{\text{enrobé}}(\text{cm}^3) = e_{\text{enrobé}} * 18 * 50$$

Après que l'enrobé est choisi et la masse nécessaire est établi, nous suivrons la norme LC26-400 de compactage.

Procédure de compactage:

- ✚ Placer la base du moule sur le compacteur;
- ✚ Placer le moule de 100 mm du compacteur;
- ✚ Insérer les deux renforts latéraux;
- ✚ Descendre le plateau mobile en position basse avant d'introduire l'enrobé;
- ✚ Mettre les morceaux de bois servant de cales pour assurer l'épaisseur de la plaque d'enrobé du substrat à 55 mm pour le EB-14;
- ✚ Monter le plateau mobile jusqu'à la hauteur désirée;
- ✚ Introduire la masse d'enrobé;
- ✚ Suivre le tableau des hauteurs pour le compactage.

Après le compactage, l'enrobé doit refroidir, 12 à 24 heures à température de la pièce.

Pour effectuer la détermination de la densité brute, nous suivrons la norme **LC 25-040**.

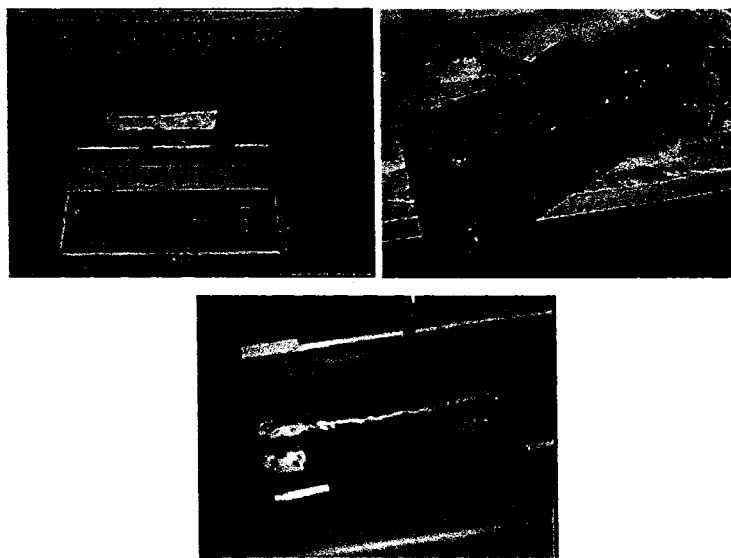


Figure A8.1 Détermination de la densité brute

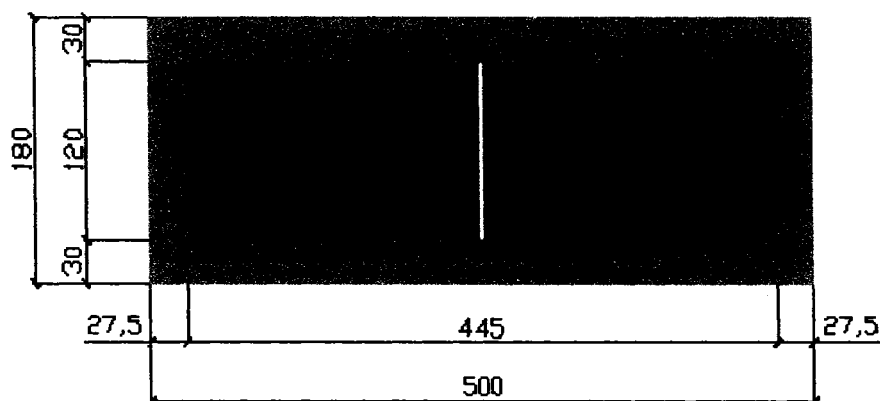


Figure A8.2 Schéma des dimensions

Après le compactage, la plaque est coupée en deux plaquettes de $220 \times 120 \times 55 \text{ mm}^3$ en éliminant le matériel au pourtour de la plaque, lequel est assujéti aux effets de paroi (Figures A8.3 et A8.4). Les plaquettes vont servir de substrat dans le montage.

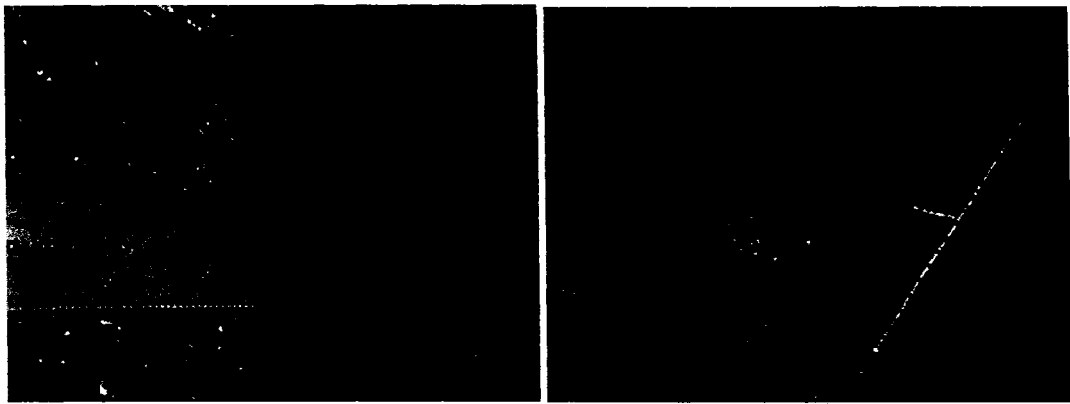


Figure A8.3 Sciage de la plaque d'enrobé (plaque de base)

Note : Bien identifier sur les deux plaquettes la position centrale de la plaque!

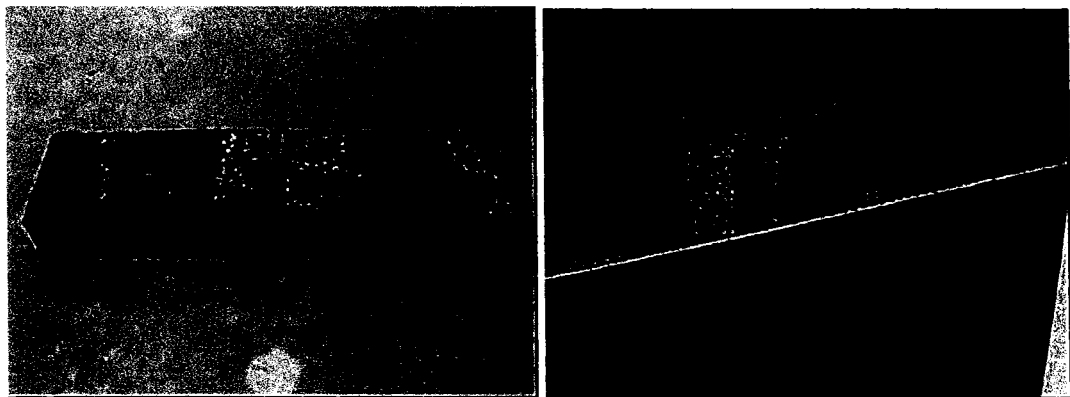


Figure A8.4 Sciage de la plaque d'enrobé (plaque de base)

La surface de plaquettes de EB-14 est nettoyée au jet de sable pour enlever le film de graisse sur le dessus et le dessous et pour assurer une adhérence comparable aux surfaces usées en chantier.

2. Collage des plaquettes d'enrobé servant de substrat pré-fissuré sur les plaques d'acier (procédure P4.10-203)

Premièrement, nous nettoyons bien la surface où l'on va travailler ainsi que les composantes d'acier nécessaire : dans un premier temps, au jet de sable, et ensuite, avec un produit comme l'acétone ou tout autre produit semblable (Figure A8.5).

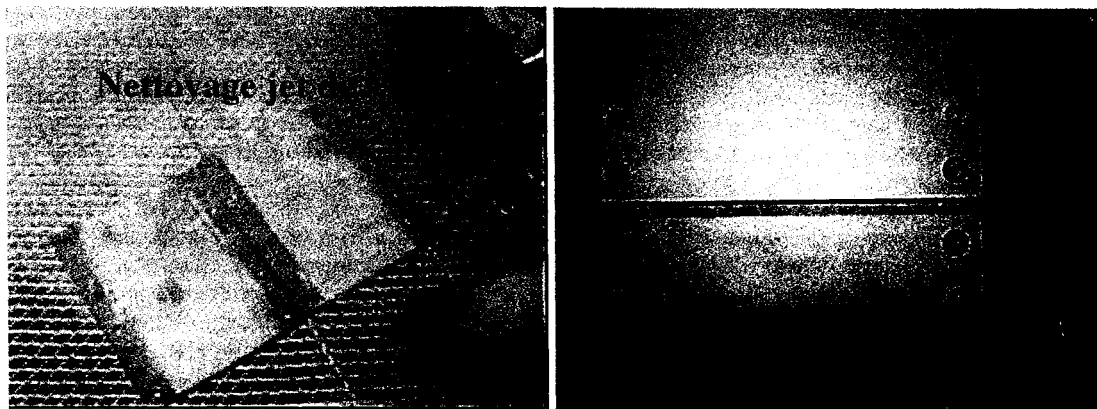


Figure A8.5 Nettoyage au jet de sable

Dans un deuxième temps, nous assemblons les plaques d'assise en acier: l'assemblage consiste à solidariser 2 plaques d'assise en acier à l'aide de 2 poutres de renfort. Pour l'assemblage il est impératif de jumeler ensemble les bonnes pièces, lesquelles sont identifiées sur chacune d'elle.

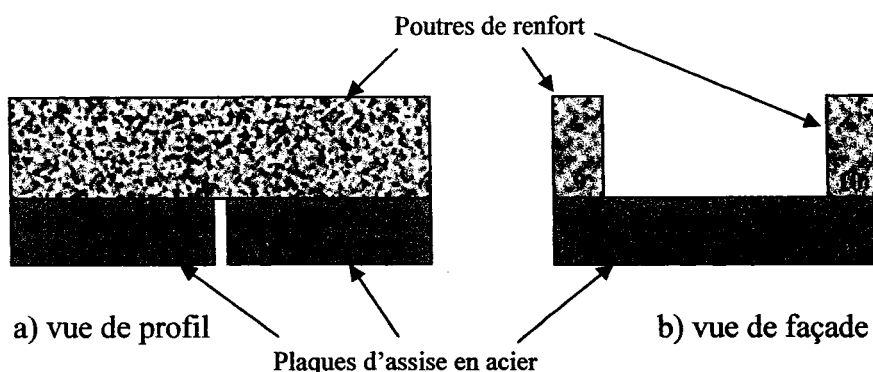


Figure A8.6 Croquis de l'assemblage des plaques d'assise

Après assemblage (8 boulons ϕ 8x13mm sont requis) les plaques d'assise laissent un joint central de 5 mm. L'espacement de 5mm, pré-établi à partir de renforts en acier permettant de solidariser les deux plaquettes pendant le temps de la confection du corps d'épreuve, représente en fait la largeur de la fissure du substrat.

Pour éviter la pénétration du collage à l'interface : poutre de renfort en acier vs plaques d'assise en acier, nous plaçons un ruban adhésif sur les joints latéraux du moule.

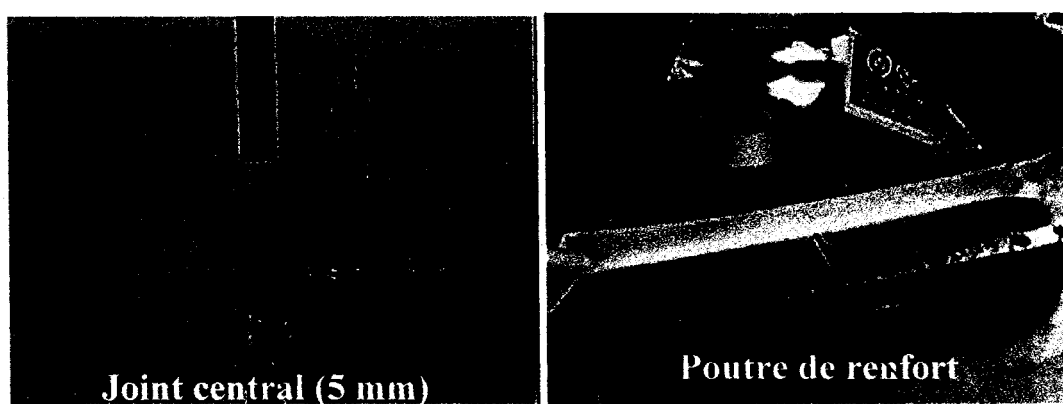


Figure A8.7 Joint central et protection avec le ruban adhésif

Les plaquettes d'enrobé devant servir de substrat ont été préalablement taillées à: 120x220x55 mm³ suivant la procédure P4.10-202.

Par la suite nous préparons la colle époxy SikaDur 31 HiMode selon les proportions indiquées par le manufacturier. Pour une plaquette de $120 \times 220 \text{ mm}^2$: Mélange A = 80 gr. et mélange B = 94 gr. La colle époxy permet le collage du substrat (plaquette d'enrobé) aux plaques d'assise en acier.

Note : ne jamais contaminé le A avec le B!

Nous étendons uniformément l'époxy sur l'entière surface des plaquettes d'enrobé et sur les plaques d'assise en acier (Figure A8.8).

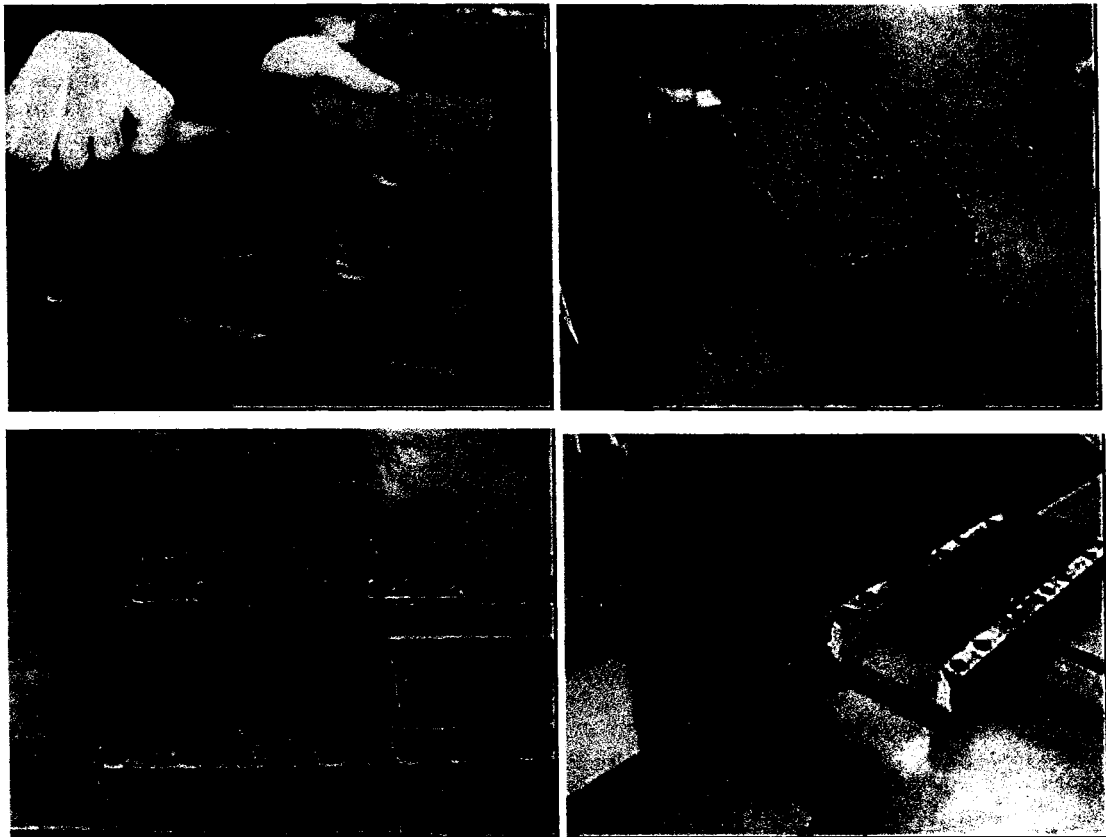


Figure A8.8 Ensemble des photos avec le collage des plaquettes de EB-14

Par la suite, nous placions l'ensemble, entre deux tables espacées pour avoir accès au joint, après nous déposons chacune des plaquettes sur chacune des plaques d'assise assemblées et nous mettons la pression sur les plaques pour étendre le plus finement

possible la colle époxy. Un “*spacer*” de 5mm entre les 2 plaquettes d’enrobé, assure une largeur contrôlée de la pré-fissure.



Figure A8.9 Mise en place d’un “*spacer*”

Il est important d’enlever le surplus de colle sur les côtés ainsi que dans la fissure au bas des plaques d’assise: tout excès de colle au joint va nuire au mouvement horizontal imposé à l’essai.

Pour assurer un bon collage du substrat, nous appliquons un poids de 10 kg sur chacune des plaquettes et on laisse un temps de 12 à 24 heures de repos.

Attention de bien s’assurer que le “*spacer*” demeure toujours en place entre les deux plaquettes!

3. Application de l’agent de liaison sur le SUBSTRAT (procédure P4.10-204)

Il est important d’insérer une bande de calfeutrant extensible dans la fissure pour empêcher l’enrobé de s’y introduire lors du compactage.

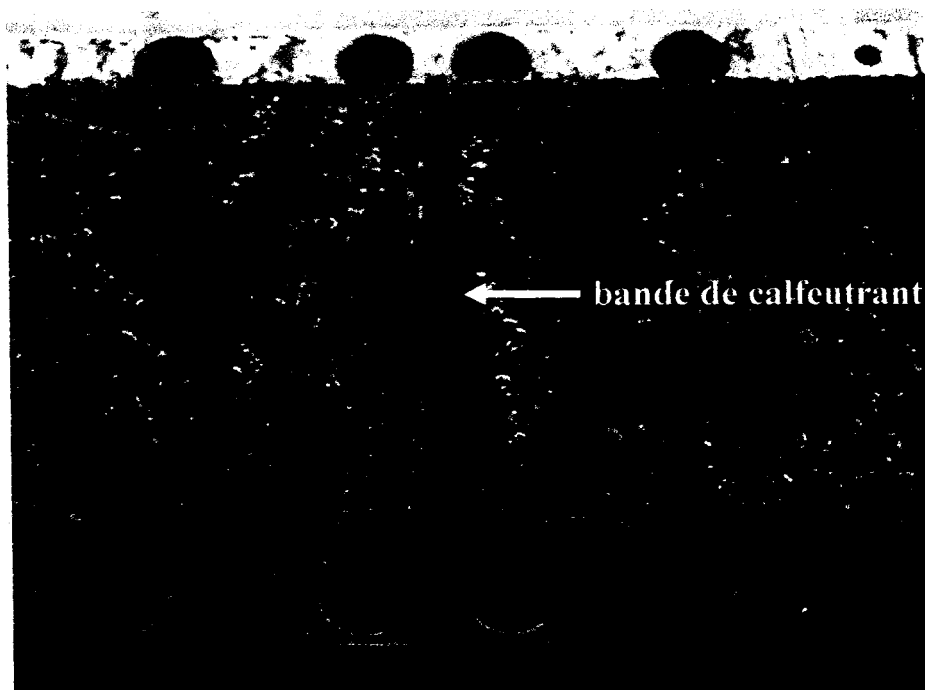


Figure A8.10 Mise en place d'une bande de calfeutrant

Pour reproduire les conditions de chantier, la liaison du resurfaçage au substrat (plaquettes d'enrobé), est assurée par l'application d'un agent d'émulsion. Selon les exigences du **CCDG 2003 section 13**, on doit considérer un taux de pose de $0,25 \text{ g/m}^2$ de bitume résiduel pour assurer le collage du resurfaçage à un pavage neuf. Pour la surface des plaquettes de notre montage, soit $120 \times 440 \text{ mm}^2$, la surface totale est de $0,0528 \text{ m}^2$.

Nous déposons la plaque sur une balance avec comme précision 0,1 gramme et nous appliquons le dosage requis à l'aide d'un pinceau uniformément réparti sur les plaques. Dans le cas du Supercol60 – 38% d'eau et 61% résidu (% en masse) – il faut 10,9 gr. d'émulsion par plaque de $120 \times 220 \text{ mm}^2$ pour avoir $0,10 \text{ l/m}^2$ de bitume résiduel (Figure A8.10).

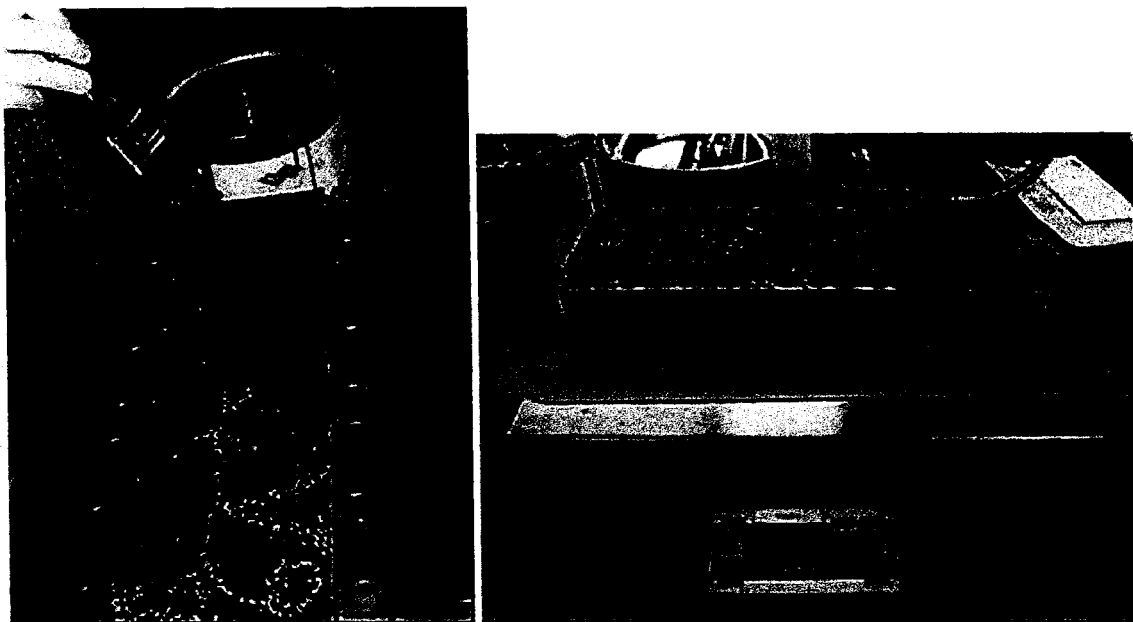


Figure A8.11 Application d'un agent de liaison sur le substrat

Entre l'application d'un agent de liaison et la mise en œuvre de la couche de resurfaçage existe une période de repos d'approximative 24 heures.

4. **Compactage de la couche de resurfaçage sur la base d'assise en acier avec les plaquettes en enrobé servant de substrat (procédure P4.10-205)**

Le resurfaçage est compacté normalement sur le substrat.

Premièrement, nous déposons la plaque d'assise avec le substrat dans le moule de compactage du compacteur de plaques MLPC et nous suivrons les étapes suivantes :

- Descendre en position basse le plateau mobile du compacteur de plaques.
- Déposer la plaque d'assise avec le substrat dans le fond du moule, sur le plateau mobile et installer le moule de compactage de (100x180x500 mm³).

Pour éviter que de l'enrobé ne s'insère dans les obturations de boulonnage nous plaçons des lanières de bois (500x180x10mm³) sur les poutres de renfort sur tout le périmètre.

Donc, se fier aux hauteurs de la norme en ajoutant toujours 70 mm à chacune.

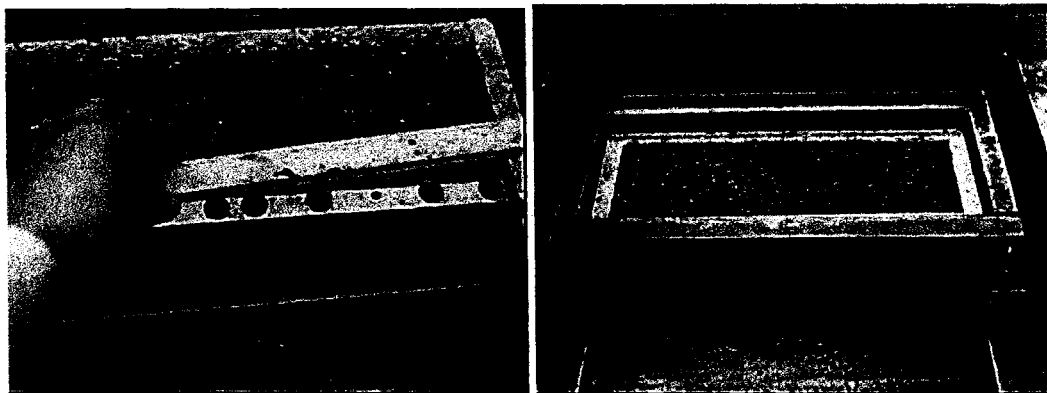
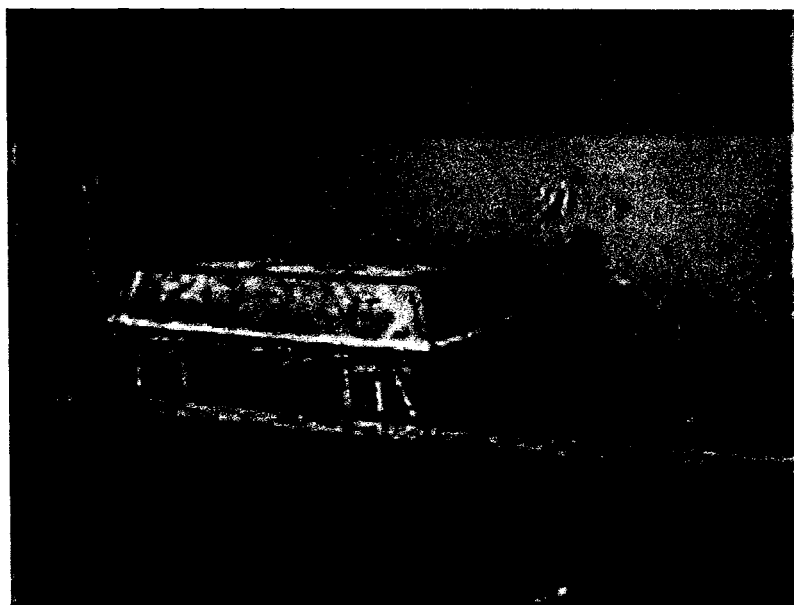


Figure A8.12 Mise en place des lanières de bois pour protéger les obturations de boulonnage

L'enrobé sera pré-chauffer jusqu'à ce qu'il atteigne la température de chauffage pour le compactage selon la méthode d'essai LC 26-400. Une fois la température atteinte, la durée de chauffage ne doit jamais excéder 2 heures.



Note : Dans l'étuve, il est impératif que l'enrobé soit recouvert d'une plaque d'acier ou tout autre matériel pour empêcher l'oxydation du bitume (Figure A8.13).

Figure A8.13 Pré-chauffage d'enrobé

Avec le plateau mobile à la position de 165 mm nous introduisons l'enrobé à la température requise dans le moule $100 \times 180 \times 500 \text{ mm}^3$, répartissant uniformément le matériel dans le moule (Figure A8.14).

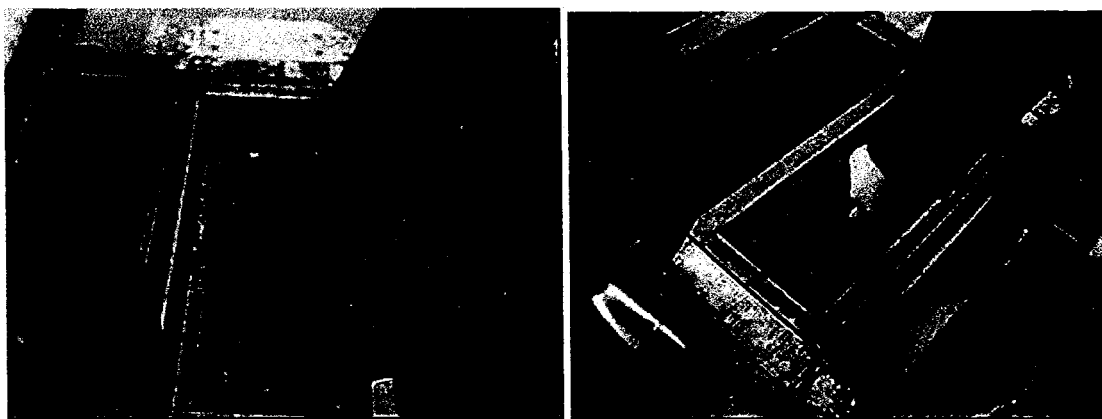


Figure A8.14 Mise en place d'enrobé pour compactage

Par la suite la procédure de compactage commence avec le plateau mobile à la position de 135mm, suivant les dispositions de la méthode d'essai LC 26-400. Compte tenu du fait que la plaque d'assise avec plaquettes d'enrobé a une épaisseur de 70mm, et attendue que l'épaisseur de resurfaçage ciblée est conventuellement de 55mm, la hauteur finale du plateau mobile doit être de 120mm en fin de compactage (habituellement cette hauteur est de 100mm pour un moule de 100mm).



Figure A8.15 Compaction d'enrobé

Après compactage de la couche de resurfaçage, la dimension de l'éprouvette est celle correspondante à une plaque d'ornièreur : $180 \times 500 \text{ mm}^2$ et dont l'épaisseur sera différent suivant le plan d'expérience mis en œuvre (resurfaçage de 55mm et/ou 100mm). L'éprouvette compactée est alors sujet à refroidissement en laboratoire ($T = 20^\circ\text{C}$) pour une période d'au moins 24 heures.

5. Taille du corps d'épreuve après compaction du système de resurfaçage (procédure P4.10-206)

Le sciage de la plaque compacté vise à enlever les bords de la plaque pour se soustraire à la variation de compacité liée aux effets de bords des zones périphériques. Cette séquence de sciage est extrêmement délicate puisque tout juste l'épaisseur du système de resurfaçage doit être taillée. Le croquis suivant illustre la manœuvre:

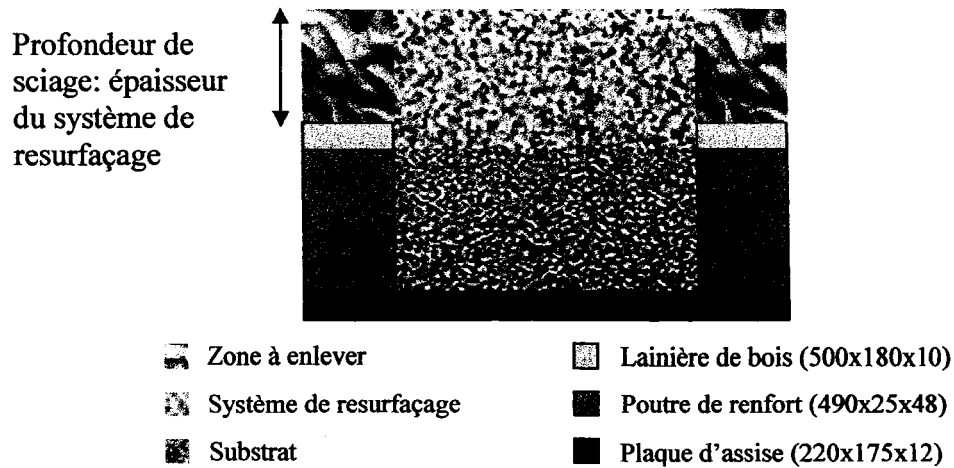


Figure A8.16 Croquis sur le sciage de la plaque compacté

Nous suivrons les étapes suivantes :

- Retirer la plaque compactée (plaques d'assise+substrat +système de resurfaçage) du moule et bien identifier l'échantillon.
- Mesurer et marquer les endroits où la coupe doit être faite. Se référer aux morceaux de bois placés auparavant ainsi qu'au croquis ci-dessus.
- Régler le mouvement vertical de la scie mécanique pour qu'elle ne puisse pas descendre au-delà des lanières de bois.
- Scier de 27,5 mm du côté court et de 30 mm du côté long.

À la fin, la dimension du corps d'épreuve est alors réduite à une surface de 120x445 mm² par sciage des bords.

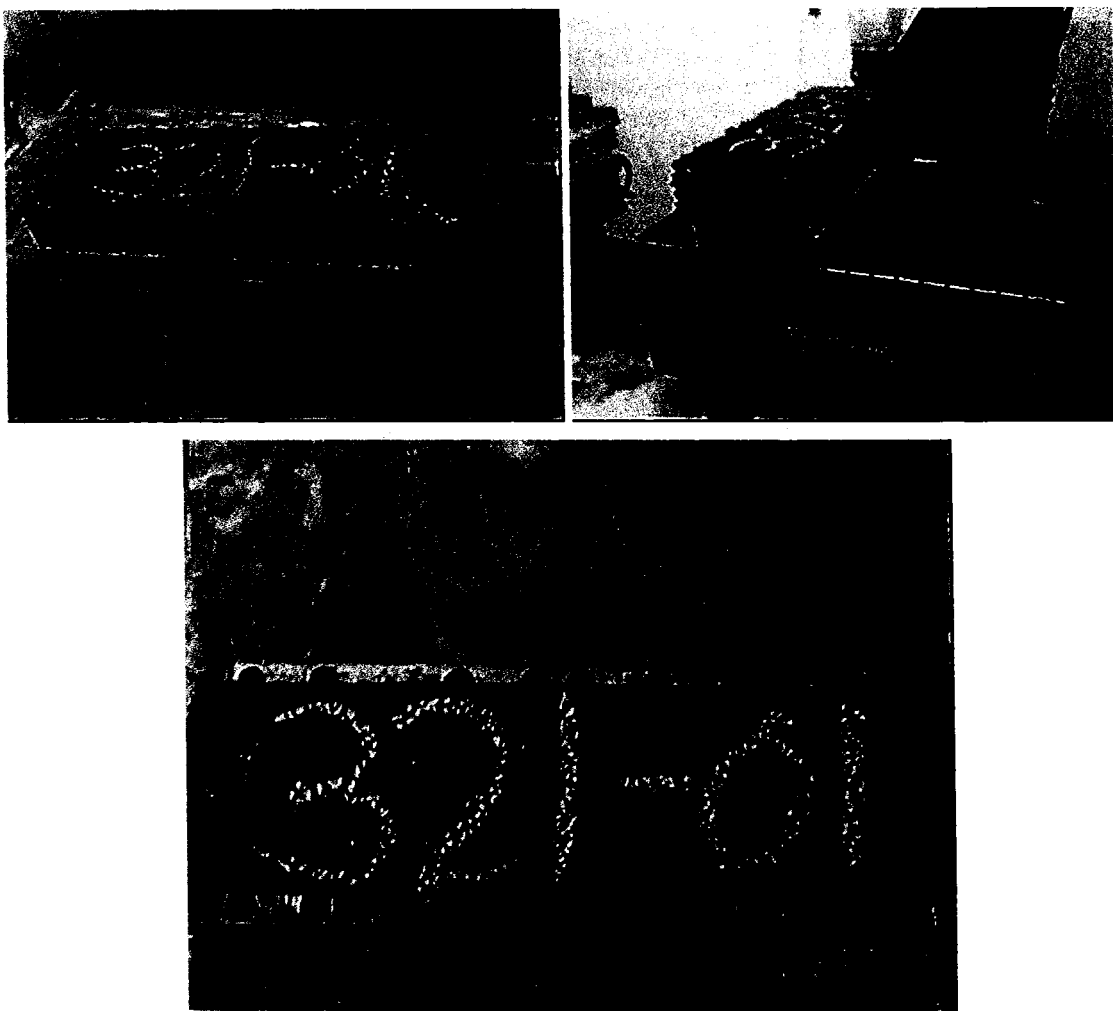


Figure A8.17 Ensemble des photos avec le sciage de finition

Suivant la période de séchage d'approximativement 8-12 heures nous procédons à la mise en place du corps d'épreuve sur la presse hydraulique MTS.

6. Mise en place du corps d'épreuve sur la presse MTS (procédure P4.10-208)

Avant de mettre le corps d'épreuve sur la presse MTS, nous suivons quelques étapes préparatifs :

- Appliquer le ruban adhésif de protection sur les poutres de renfort;

- Marquer la position des repères à coller en surface sur la face latérale du corps d'épreuve;
- Identifier la position avant du corps d'épreuve pour la mise en place sur la machine bi-axiale : inscrire la lettre "D" sur le devant du corps d'épreuve;
- Nettoyer au jet de sable la surface du resurfaçage pour enlever les graisses et assurer un bon collage des repères;
- Nettoyer ensuite au jet d'air;
- Retirer les rubans de protection.

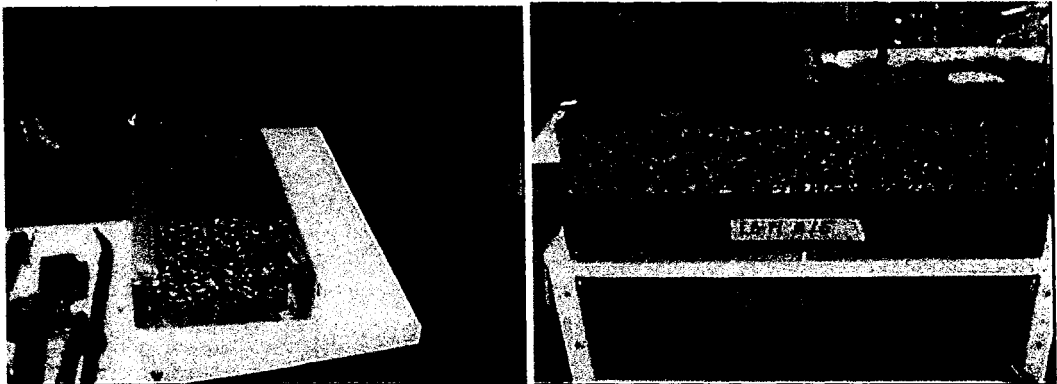


Figure A8.18 Ensemble des photos avec le nettoyage au jet de sable d'enrobé de resurfaçage

L'ensemble de ces étapes est très important dans le processus de collage du système support des capteurs de déplacement.

Pour démarrer un essai avec le montage ETS - LUCREB, il faut suivre plusieurs étapes:

- Remettre le plateau II au même niveau que le plateau I (en contrôle de déplacement);

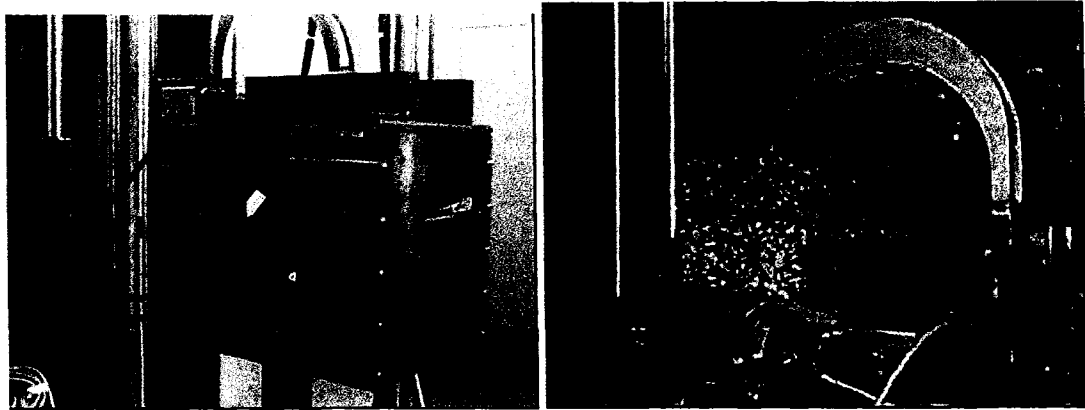


Figure A8.19 Montage ETS – LUCREB et le corps d'épreuve

- Noter la position "Displacement" du vérin, notre "zéro", la position de référence initiale;
- Vérifier que le plateau I est au minimum de l'amplitude;

Attention! Vérifier la vitesse de déplacement du plateau I!

Après toutes ces étapes nous mettons l'échantillon sur le plateau du montage, nous enlevons les "barres" et procédons à coller le système support pour les capteurs de déplacement et les renforts latéraux.

7. Collage de systèmes support des capteurs de déplacement en surface et les renforts latéraux lien additionnel au système (procédure P4.10-207)

Premièrement, pour assembler le système support pour les capteurs de déplacement, il faut utiliser la tige support pour le collage des repères, laquelle permet de solidariser les poutrelles longitudinales et transversales pour la fixation des capteurs de déplacement.

Assurer vous de bien rigidifier l'ensemble...bien boulonner!

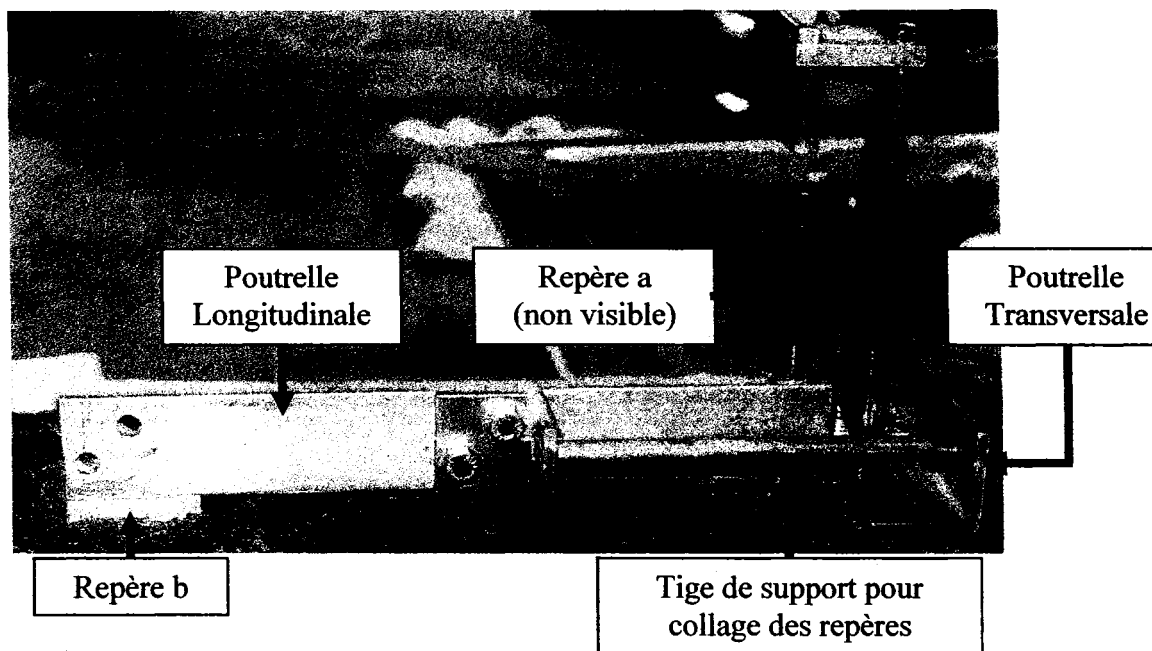


Figure A8.20 Système support pour les capteurs de déplacement

Note: s'assurer de rester parfaitement plan

La préparation d'époxy Syka Dur 31 Hi Mode, avec les deux composantes (A et B), se fait dans la même manière que pour le collage de plaquettes d'enrobés.

Note: Ne jamais contaminé le A avec le B

À la fin nous collons les systèmes supports pour les capteurs de déplacement sur l'échantillon et, à mi-hauteur, les 4 renforts additionnels au système.

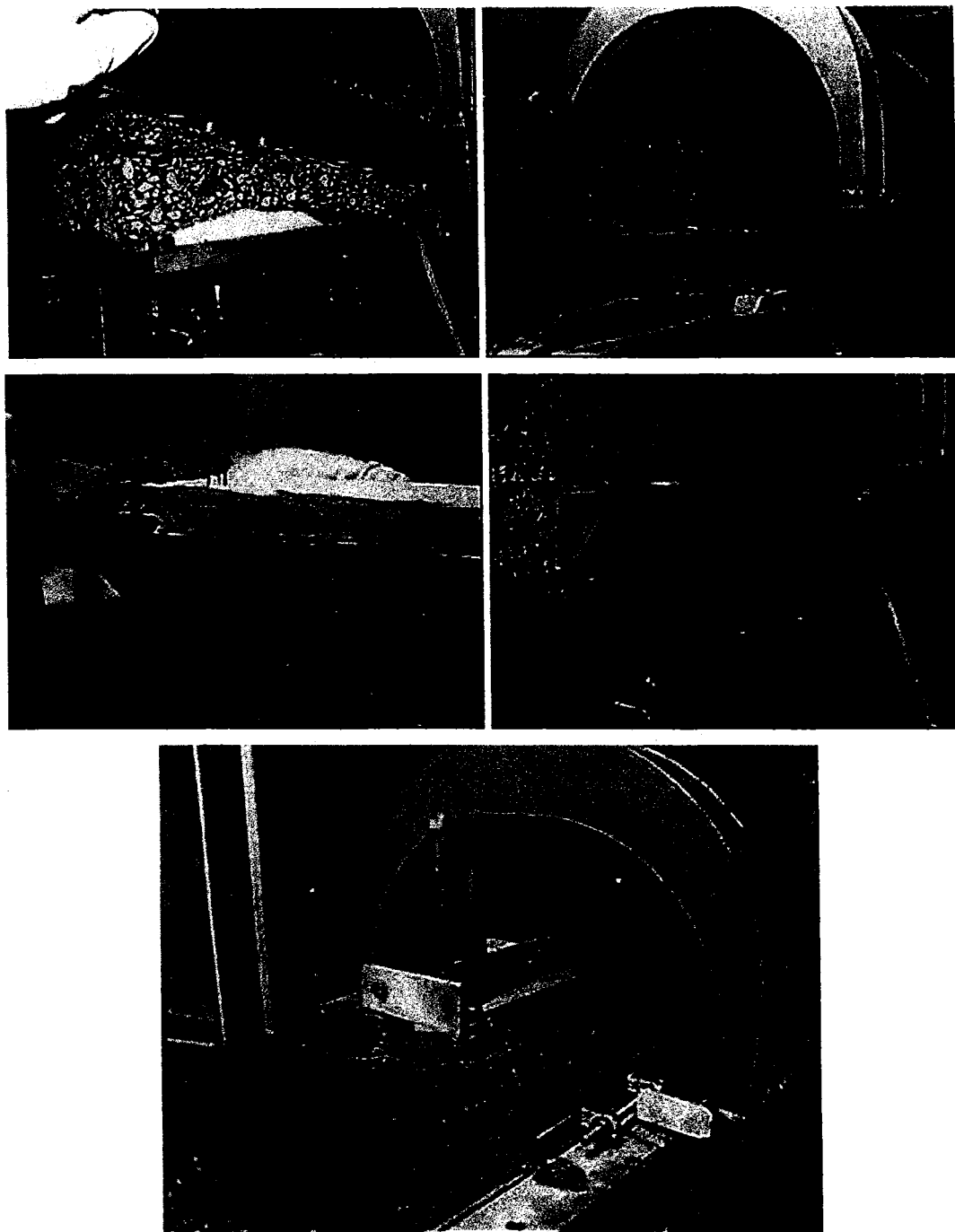


Figure A8.21 Ensemble des photos avec le collage des systèmes support pour les capteurs de déplacement et les 4 renforts lien additionnel au système.

Il est nécessaire d'attendre de 5-8 heures en contrôle de déplacement.

8. Mise en place des capteurs de déplacement et des sondes de températures (procédure P4.10-209)

Nous mettons en place les capteurs de déplacement suivant le croquis de montage (Figure 30, Chapitre 2) et nous installons les sondes de températures en surface sur l'échantillon et fermons la chambre environnementale;

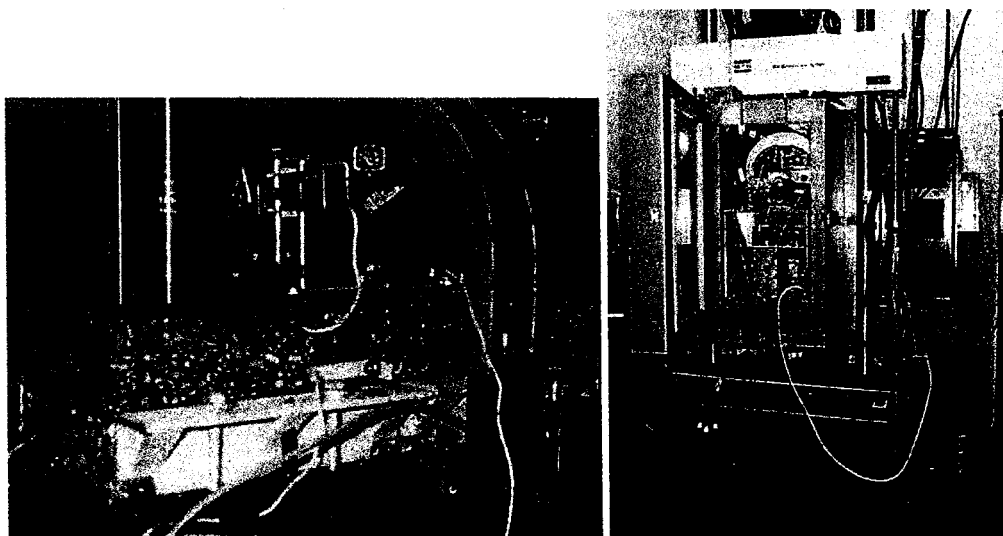


Figure A8.22 Mise en place des capteurs de déplacement

- Avec le système informatique, faire le "zéro" des capteurs;
- Le système HSM de la chambre doit être à la position "High";
- Démarrer le conditionnement en température à l'aide d'un système "Fonction Generator" avec un taux de refroidissement de 8 °C par heure;

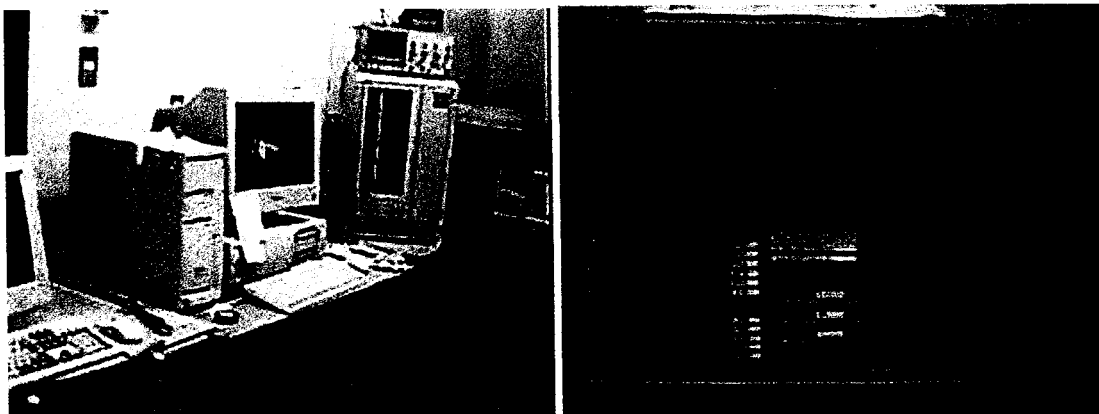


Figure A8.23 Système informatique pour démarrer la presse MTS

Après 5 à 8 heures:

- Enlever les goupilles et faire le "zéro" des capteurs;
- Changer le mode de contrôle axiale à l'aide du "Fonction Generator" en extensomètre monté sur le plateau II;
- Viser une amplitude de 20 microns;
- Démarrer le programme d'acquisition des données;
- Démarrer le moteur du plateau I;
- Partir le "RUN"!

ANNEXE 9

Fiche technique d'ECF (Enrobé coulé à froid)

DESCRIPTION TECHNIQUE

ENROBÉS SPÉCIAUX DE TYPE
ENROBÉS COULÉS À FROID
(E.C.F.)

GRIPFIBRE®

Le GRIPFIBRE® (procédé breveté) est un enrobé coulé à froid (E.C.F.) ultra mince à granulométrie continue ou discontinue (0/5 mm – 0/8mm - 0/10 mm) à base d'émulsion de bitume modifié, de granulats intégralement concassés de haute performance et des fibres souples synthétiques.

Utilisés en couche de roulement d'épaisseur moyenne comprise entre 7 mm et 15 mm, ils sont employés en travaux neufs ou en entretien de couche de surface ayant de bonnes caractéristiques structurelles.

Le GRIPFIBRE® est utilisé depuis 1986 sous tous trafics. Il offre une bonne rugosité et une adhérence durable.

SOMMAIRE

1. Définition - Domaines et limites d'emploi
2. Constituants
3. Formulation
4. Particularités de fabrication et de mise en œuvre
5. Caractéristiques du revêtement
6. Dispositions prises pour assurer la qualité
7. Développement et références

PRÉSENTATION DU PRODUIT**1. DÉFINITION - DOMAINES ET LIMITES D'EMPLOI****a) Définition**

Le GRIPFIBRE® est un ECF (enrobé coulé à froid) ultra mince - 7 à 15 mm d'épaisseur - à granulométrie continue ou discontinue (0/5 mm - 0/8mm - 0/10 mm) à base d'émulsion de bitume modifié, de granulats intégralement concassés de haute performance et des fibres souples synthétiques.

L'apport de fibres modifie la rhéologie et les caractéristiques de l'enrobé coulé à froid, il procure respectivement :

- A court terme, une exceptionnelle homogénéité à l'ECF ce qui permet :
 - De mettre en place des formulations à granulométrie discontinue, sans craindre la ségrégation ;
 - d'augmenter la largeur d'épandage sans risque d'hétérogénéité.
- A long terme, une très grande souplesse à l'ECF car les fibres sont elles-mêmes très déformables. Parallèlement, les fibres en très grand nombre, "arment" l'enrobé coulé à froid. La résistance à l'usure ainsi que la résistance au cisaillement s'en trouvent considérablement accrues.

Le GRIPFIBRE® ne présente pas de rejet à la remise en circulation contrairement aux traitements de surface (enduits superficiels) ; il peut être mis en œuvre en grande largeur, autorise des granularités discontinues facilitant dans ce cas l'obtention de revêtements durablement rugueux (antidérapants).

b) Domaines d'emploi

On utilise le GRIPFIBRE® pour tous les trafics (incluant les autoroutes fortement sollicitées) :

- En entretien de chaussées pour la régénération des caractéristiques de surface :
 - Voirie urbaine ;
 - Routes rurales ;
 - Autoroutes ;
 - Dalle de béton : amélioration des caractéristiques de surface (réduction de la glissance et du bruit) ;
 - Recouvrement d'enrobés présentant des problèmes de rugosité ou de désenrobage ;
 - Pistes cyclables ;
 - Tous stationnements, aires de jeux, etc.
- En entretien de chaussée pour l'amélioration de l'étanchéité :
 - Les ponts ou viaducs à ne pas surcharger ou bien tunnels où l'on est limité à cause de la hauteur maximum permise ;
- En travaux neufs :
 - Couche de surface, sous réserve que le support soit suffisamment résistant.

Le calibre maximal, 5, 8 ou 10 mm, sera défini selon la plus ou moins forte macrorugosité souhaitée, selon l'importance du trafic et selon le bruit au roulement admissible. Par exemple, on choisira un 0/10 mm en milieu rural pour un trafic lourd élevé ou pour un trafic très rapide, et un 0/5 mm en zone urbanisée.

c) Limites d'emploi

Le support d'application du GRIPFIBRE® doit présenter un bon uni de surface :

- Dans le cas de déformations inférieures à 5 mm (règle de 3 m), on applique le GRIPFIBRE® directement en monocouche ou en bicouche (0/5 mm, 0/8mm ou 0/10 mm).

GRIPFIBRE®**Description technique**

- Entre 5 et 20 mm un reprofilage à l'E.C.F. doit précéder l'application de la première couche. Cette opération de reprofilage est réalisée à l'aide d'une règle d'acier.
- Entre 20 et 40 mm, le support sera préalablement reprofilé par fraisage ou par apport d'enrobé à chaud.
- Le support doit avoir une bonne capacité structurale.

La mise en œuvre nécessite des conditions météorologiques convenables :

- Pas de risque de pluie dans les 4 heures suivant la mise en œuvre.
- Pas de risque de gel dans les 24 heures suivant la mise en œuvre.
- Plus de 10°C et moins de 80% d'humidité : pour ces conditions limites, une couche d'accrochage à l'émulsion est recommandée.

N.B. : L'application du GRIPFIBRE® sur une surface humide est possible lorsqu'il est appliqué sans couche d'accrochage.

2. CONSTITUANTS**a) Granulats**

- Ils sont conformes à la classe 1a pour les gros granulats et classe 1 pour les granulats fins selon la norme 2101 du MTQ.

La courbe granulométrique du mélange obtenu doit être située dans les fuseaux ci-après :

Type de l'ECF % passants	Continu		Discontinu		
	0-5 mm	0-10 mm	0-5 mm	0-8 mm	0-10 mm
12.5 mm	-	100	-	-	100
10 mm	-	85-99	-	100	85-99
8 mm	-	-	-	85-99	-
6.3 mm	100	70-85	100	55-85	55-85
5 mm	85-99	50-70	85-99	35-50	35-50
2.5 mm	50-70	30-50	35-50	35-50	35-50
630 µm	25-45	-	35-50	15-25	15-25
80 µm	5-11	5-11	5-11	5-11	5-11

b) Liant

- L'ÉMULPLAST EC est une émulsion cationique de bitume modifié par l'addition de polymère, à rupture lente et contrôlée
- Le polymère utilisé est du type plastomère E.V.A. (éthylène, acétate de vinyle).

c) Régulateurs de rupture de l'émulsion

- Chaux hydratée ou ciment.
- Tensioactif en solution aqueuse selon les conditions climatiques.

GRIPFIBRE®**Description technique****d) Fibres**

- Les fibres sont des fibres organiques de synthèse.

3. PARTICULARITÉS DE FABRICATION ET DE MISE EN OEUVRE**a) Fabrication**

- On utilise une centrale mobile de type discontinu, montée sur châssis automoteur et équipée d'un traineau extensible, à largeur d'épandage variable.
- Le dosage de l'émulsion, de l'eau d'apport et des régulateurs est volumétrique et est asservi au dosage des granulats (compte-tours du tapis d'alimentation des granulats et débitmètres).
- Le dosage des fibres est volumétrique. Il est asservi au dosage des granulats au moyen d'un doseur breveté.
- Le malaxeur à double arbre horizontal à palettes est inclinable.

b) Mise en œuvre

- Le traineau est extensible jusqu'à 4,2m, articulé en son centre, réglable en altimétrie.
- Les dosages d'ECF sont de l'ordre de 8 à 17 kg/m², suivant la granulométrie 0/5 mm, 0/8mm ou 0/10mm. (Il s'agit des quantités moyennes d'enrobé résiduel sur support présentant un bon uni de surface.)
- Le support doit être balayé et reprofilé si nécessaire (voir paragraphe 1c précédent).
- La remise en circulation sera faite après compactage, dans un délai qui dépend essentiellement des conditions climatiques, qui influencent le temps de cure du GRIPFIBRE® (15 à 30 minutes).
- Le compactage permet d'accélérer la cure de l'ECF et de réduire les risques de rejet. Le compactage est donc généralement utilisé et est particulièrement recommandé pour des trafics lents (stationnements). On utilise alors un compacteur à pneus lisses.
- Éventuellement, sur support excessivement poreux, on peut être amené à prévoir une couche d'accrochage à l'émulsion sur le support propre et sec. La couche d'accrochage est fortement recommandée pour recouvrir une dalle de béton et dans ce cas, les joints sévèrement détériorés doivent être préalablement réparés à l'enrobé.

4. CARACTÉRISTIQUES DU REVÊTEMENT

- Le GRIPFIBRE® procure un bon confort de roulement et un excellent guidage optique car les lignes de marquage de la chaussée contrastent sur sa couleur noire.
- Le GRIPFIBRE® est le plus mince des enrobés. Bien que très déformable, le GRIPFIBRE® n'est pas omiétable en raison de sa faible épaisseur d'application. On pourra donc l'utiliser sur tous types de supports ayant une bonne capacité structurale.
- Le GRIPFIBRE® réduit fortement la perméabilité des chaussées sur lesquelles on l'applique, ce qui prolonge en conséquence la durée de service de celles-ci.
- Le GRIPFIBRE® permet d'atteindre des niveaux d'adhérence et de durabilité grâce à sa granularité discontinue et à la présence de fibres.
- À long terme, le GRIPFIBRE® est "rigidifié" par l'armature que constitue le réseau de fibres à tel point que leur résistance en cisaillement s'en trouve très augmentée. Leur résistance à l'usure est améliorée. Leur texture très grenue est avantageuse par temps de pluie : éblouissement réduit, évacuation de l'eau facilitée, niveau d'adhérence très élevé même à grande vitesse.

GRIPFIBRE®**Description technique****5. DISPOSITIONS PRISES POUR ASSURER LA QUALITÉ**

La qualité du GRIPFIBRE® est assurée par l'entreprise au niveau d'une part du choix des constituants et d'autre part, de la fabrication et de la mise en œuvre.

a) Matériaux

Les matériaux entrant dans la fabrication du GRIPFIBRE® font l'objet de contrôles sévères de la part du service technique de Construction DJL inc.

b) Fabrication et mise en œuvre

DJL met en œuvre les moyens en hommes et en matériels pour que les caractéristiques du produit soient conformes à celles retenues lors de l'étude de formulation qui tient compte par ailleurs des conditions locales de réalisation. Elle s'assure par des contrôles internes et externes aux chantiers du respect des prescriptions selon son système Qualité certifié ISO 9001(2000).

6. DÉVELOPPEMENT ET RÉFÉRENCES

Le GRIPFIBRE® a fait ses débuts en 1986 en France et plus de 10 millions de mètres carrés ont été mis en œuvre dans plusieurs pays (Italie, Espagne, France, Danemark, RépubliqueTchèque et au Canada).

Plusieurs projets de GRIPFIBRE® ont été réalisés par DJL depuis 1992, totalisant plus de 450 000 m².

Une liste de projets de référence est disponible.

ANNEXE 10

Caractéristiques des granulats pour les enrobés, EB-14, ESG-10, EB-10S, CH-10

(SOURCE LACBEC Inc.)

nom du distributeur LACBEC	No de formule 424	Code produit 324
location Wickham	Type de mélange EB-14	No d'usine 146

Granulats froids			Granularité (pourcentage passant)											Utilisé	Densité des granulats		Absorption en eau des granulats
Classe granulaire	P-Pierre C-Crible S-Sable F-Fine		Tamis en mm							Tamis en µm					Brute (sec)	Apparente	
	Type	Provenance (Code produit)	28.0	20.0	14.0	10.0	5.0	2.5	1.25	630	315	160	80				
0-5 mm	S	Ec. Cobdington, Durham Sud (109)	100	100	100	100	97	90	80	65	39	14	3.8	29.0%	2.656	2.730	1.02
0-5 mm	C	Carrière Bluteau, Wickham (69)	100	100	100	100	90	59	39	28	21	15	10.4	29.0%	2.635	2.700	0.92
5-10 mm	P	Carrière Bluteau, Wickham (74)	100	100	100	88	7	2	2	2	2	2	1.3	30.0%	2.645	2.687	0.59
10-14 mm	P	Carrière Bluteau, Wickham (77)	100	100	89	12	2	2	2	2	2	2	1	12.0%	2.649	2.686	0.52
Granularité du combiné			100	100	99	86	57	44	35	28	18	9	4.7	100%	2.646	2.703	0.80

Formule	Tamis en mm							Tamis en µm				TG	Bitume %	F.B.E µm	Vides %	V.C.B. %	Stabilité N	Fluage mm	Densité		Bit. absorb. %
	28.0	20.0	14.0	10.0	5.0	2.5	1.25	630	315	160	90								Brute (60)	Maximale	
	100	100	99	86	57	44	35	28	18	9	4.5	481	4.80	10.7	3.4	74.5	13900	2.8	2.397	2.481	0.41
Spécifications	Max. Min.			90 75	65 50	47 29	40 20	34 14	26 10	17 5	8.0 3.0		4.7 Min		5.0 2.0	85.0 Max	90000 Min	4.0 2.0			

Zone de restriction recommandée

Caractéristiques supplémentaires				Granulat bitumineux recyclé			Résistance à l'orniérage (%)		Spéc.
Classe de performance de bitume	PG 58-34	Surface spécifique totale (m²/kg)	6.07	Pourcentage de bitume	-		1000 cycles	-	
Classe de bitume utilisée en formulation	PG 58-28	Feuil de bitume effectif (µm)	7.50	Vides à la P.C.G. (%)	Spéc.		3000 cycles	-	
Vides dans l'agrégat minéral (%)	13.8	Rapport bitume/total granulométrique	1.00	10 grations	-		10 000 cycles	-	
Densité effective des granulats	2.674	Compacité anticipée	1.07	80 grations	-		30 000 cycles	-	
Pourcentage de bitume effectif (%)	4.41	Facteur de correction pour le bitume (%)	0.14	100 grations	-		Ressuage	-	
				200 grations	-		Tenue à l'eau (%)		Spéc.
Remarque				Ressuage à 200	Aucun	Aucun	Stabilité retenue		70

(SOURCE DJL Inc.)

Nom du distributeur Construction DJL Inc.	No de formule 405	Code produit 405
Location 6230, rue St-Patrick Montréal	Type de mélange ESG-10	No d'usine 078

Granulats froids					Granularité (pourcentage passant)										Utilisé	Densité des granulats		Absorption en eau des granulats	
Classe granulaire	P-Pierre	C-Criblure	S-Sable	F-Fine	Tamis en mm						Tamis en µm					Brute (sec)	Apparent		
	Type	Provenance (Code produit)			28.0	20.0	14.0	10.0	5.0	2.5	1.25	630	315	160					80
5-0 mm	P	Construction DJL, Saint-Bruno			100	100	100	88	11	1	1	1	1	1	0.7	43.0%	2.813	2.647	0.42
0-5 mm	C	Construction DJL, Saint-Philippe			100	100	100	100	94	88	47	35	26	19	14.6	37.0%	2.691	2.752	0.83
0-5 mm	C	Recmix, Tracy			100	100	100	100	96	74	43	23	12	4	1.2	20.0%	2.839	2.954	1.37
Granularité du combiné					100	100	100	95	59	48	26	18	12	8	5.9	100%	2.772	2.832	0.76

Formule	Tamis en mm								Tamis en µm				Bitume	F.B.E.	Vides	V.A.M.	V.C.B.	Stabilité	Fluage	Densité		Bit absorb.
	28.0	20.0	14.0	10.0	5.0	2.5	1.25	630	315	160	80	%	µm	%	%	%	%	H	mm	Brute (60)	Maximale	%
	100	100	100	95	59	40	26	18	12	8	6.3	5.10	12.30	4.3			73.1	14581	2.8	2.451	2.562	0.22
Spécifications	Max.			100	65	46	36.7	26.8	18.1		10.0	5.20										
	Min.			92	50	46	30.7	22.8	18.1		4.0	5.00										

Zone de restriction recommandée

Caractéristiques supplémentaires				Granulat bitumineux recyclé		Résistance à l'orniérage (%)		Spéc.
Classe de performance de bitume	PG 70-28	Surface spécifique totale (m²/kg)	5.71	Pourcentage de bitume	-	1 000 cycles	2.50	≤ 10
Classe de bitume utilisée en formulation	PG 70-28	Feuille de bitume effectif (µm)	8.86	Vides à la P.C.G. (%)	Spéc.	3 000 cycles	3.20	≤ 20
Vides dans l'agrégat minéral (%)	16.1	Rapport bitume / total granulométrique	1.10	10 girations	13.7	≥ 11.0	10 000 cycles	3.80
Densité effective des granulats	2.769	Compacité antidép	0.80	80 girations	5.7	4.7	30 000 cycles	-
Pourcentage de bitume effectif (%)	4.89	Facteur de correction pour le bitume (%)	0.23	100 girations	4.4	-	Ressuage	non
				200 girations	2.3	≥ 2.0	Tenue à l'eau (%)	Spéc.
Remarque:				Ressuage à 200	non		Stabilité retenue	≥ 70

BÉTON BITUMINEUX RAPPORT PAR LOT

Code de produit (Solartronix): MB-208 Type de b.b : **EB-10S** Numero de lot : 10-6
 Numéro de contact : 6100-98-0653 Type de bitume : PG 58-34 Dg.b. : 2,704
 Localisation : Autoroute 55 No de formule : MTQ 98-2b Fact.corr. : 0,11

Échant no.	1998 année	tonnage	heure	Granulométrie (passant)												T.G.	Bit. %	Bit. T.G.	Fbe µm	VCB %	Densité		Vide %
	date			Tamis en mm								Tamis en µm									brute	Max.	
				28	20	14	12,5	10	5	2,5	1,25	630	315	160	80								
288	31 août	13664	16h13	100	100	100		97	60	48	35	27	17	8	3,7	494	4,81	0,97	8,49	68,8	2,394	2,517	4,9
289	01 sept	14016	7h03	Non analysé																			
292	01 sept	14366	10h00	100	100	100		96	62	47	37	27	17	8	3,6	498	4,83	0,97	8,11	74,6	2,438	2,529	3,6
293	01 sept	14540	11h03	Non analysé																			
294	01 sept	14808	13h03	Non analysé																			
MOYENNE				100	100	100		97	61	47	38	27	17	8	3,7	498	4,82	0,97	8,3	71,7	2,416	2,523	4,3
FORMULE				100	100	100		96	62	47	35	25	14	5	4,3	489	4,85	0,98	8,4	76,8	2,452	2,534	3,2
Écart mesuré				0	0	0		1	-1	0	1	2	3	3	-0,6	7	-0,03	-0,02	-0,1	-4,9	-0,036	-0,011	1,1
Écart tolérable n=2															1,2	22	0,38						
Écart critique															1,7	30	0,50						
Autre (s) critère (s) d'acceptation						100 min.		89 min										6,76 min.	85 max.			5,0 2,0	

(SOURCE DJL Inc.)

La Chape CH-10

L'enrobé CH-10 est un enrobé grenu utiliser pour un couche de surface. Il est fait en laboratoire universitaire sur les chaussées, routes et enrobés bitumineux – LUCREB conforme aux exigences de la norme NQ 4202.

Tableau AVII

Caractéristiques de granulats de CH-10

Granulometrie CH-10

10-5 st bruno; 5-0 st bruno; 5-0 st-philippe; sable naturel

Tamis	(10-5)mm	(5-0)mm	(5-0)mm	sable	Combiné	Visé
10	95	100	100	100	99.25	<u>96-100</u>
5	9	98	96	95	83.3	<u>75-85</u>
2.5	1	57	68	89	61.45	<u>57-75</u>
1.3	1	31	46	78	45.2	
630	1	19	35	59	32.7	<u>25-50</u>
315	1	12	26	32	19.45	<u>15-40</u>
160	1	8	20	12	10.15	<u>07-25.</u>
80	0.9	5.9	15.7	4.2	6.025	<u>04-13.</u>
	15%	35%	15%	35%		

Melange Total: 5000g

Bitume: 6% =300g

Granulats: 4700g

<u>Granulats:</u>	<u>Separé</u>	<u>Cumul</u>
10-5 St-B	15%=705g	705
5-0 St-B	35%=1645g	2350
5-0 St-Phil.	15%=705g	3055
Sable nat.	35%=1645g	4700

ANNEXE 11

Exigences du MTQ aux enrobés bitumineux à chaud et à froid

Caractéristiques des enrobés à chaud (source : Norme 4201 MTQ)

Types d'enrobé	EB-14	EB-10S	CH-10	ESG-10	Méthodes d'essai
Usages	Couche de base	Couche de base	Chape d'étanchéité	Couche de surface	
Nombre minimal de classes granulaires	2	2	2	2	
Tamis	(% passant)				
28 mm					
20 mm	100				
14 mm	95-100	100	100	100	
10 mm	75-90	94-100	96-100	92-100	
5 mm	50-65	66-78	75-85	50-65	
2,5 mm	29-47	45-65	57-75	46.1	
1,25 mm	20-40	30-50	-	30.7-36.7	
630 µm	14-34	20-40	25-50	22.8-26.8	
315 µm	10-26	14-29	15-40	18.1	
160 µm	5-17	7-18	7-25	-	
80 µm	3-8	4-10	4-13	4-10	
Liant (%min.)	4.7	4.8	5.5		LC 26-100 LC 26-110
Fluage (mm)	2-4	2-4	2-4		LC 26-060
Stabilité (N) (min)	9000	9000	9000	>	LC 26-060
Vides (%)	2.0-5.0	2.0-5.0	2.0-5.0		LC 26-320
VAM comblé (% max)	85	85	85	>	LC 26-900
Compacité (% min)	92	92	92	92	LC 26-320
Résistance à l'orniérage sur plaques de 100 mm à 60°C, à 30000 cycles (% max. de déformation)	10	-	-	-	
Résistance à l'orniérage sur plaques de 50 mm à 60°C, à 1000 cycles, à 3000 cycles (% max. de déformation)	-	10 20	-	10 20	
Teneur à l'eau (% min)	70	70	-	70	LC 26-001

Caractéristiques des enrobés à froid (source : Norme 4501 MTQ)

Caractéristiques	Exigences	Méthodes d'essai
Maniabilité	- minimum 5,0 Joules - maximum 9,0 Joules	LC 26-016
Cohésion	- minimum 90% - pas d'affaissement	LC 26-015
Tamis	(% passant)	LC 21-040
14 mm	100	
10 mm	95-100	
5 mm	45-65	
2,5 mm	-	
1,25 mm	15-25	
630 µm	-	
315 µm	-	
160 µm	-	
80 µm	Maximum 5,0	

ANNEXE 12

Système SAMI

DESCRIPTION TECHNIQUE

**SYSTÈME ANTI - REMONTÉE DE
FISSURES**

Système SAMI

Description technique du Flexiplast

Le procédé FLEXIPLAST® est un système anti-remontée de fissures, constitué d'une membrane au bitume polymère et d'un enrobé coulé à froid (ECF).

Adapté au climat québécois, le liant utilisé servant à la réalisation de la membrane présente un intervalle thermique remarquable pouvant rencontrer des températures extrêmes (hiver – été).

Le FLEXIPLAST® est compatible avec tous types de supports fissurés exception faite des fissures de fatigue, quel que soit le trafic. Le FLEXIPLAST® est essentiellement employé en entretien curatif de chaussées fissurées ou en entretien préventif en chaussée neuve.

SOMMAIRE

1. Définition - Domaines et limites d'emploi
2. Constituants
3. Formulation
4. Particularités de fabrication et de mise en œuvre
5. Caractéristiques du procédé
6. Dispositions prises pour assurer la qualité
7. Développement et références

PRÉSENTATION DU PRODUIT

1. DÉFINITION - DOMAINES ET LIMITES D'EMPLOI

a) Définition

Le FLEXIPLAST® est un système destiné à lutter contre la remontée des fissures à travers les couches d'enrobés qui le recouvrent. Son principe est basé sur le découplage des efforts de retrait thermique entre la chaussée fissurée et la nouvelle couche de roulement, tout en maintenant une parfaite adhérence entre les deux couches.

Il est constitué de bas en haut d'une membrane au bitume polymère, l'ÉLASTOPLAST, directement appliquée sur la surface fissurée, surmontée d'une couche en enrobé coulé à froid (ECF) comportant des fibres synthétiques, le GRIPFIBRE®. Ce dernier constitue un écran qui garantit l'intégrité de la membrane vis à vis des risques de poinçonnement et de percolation inverse du liant dans l'enrobé de la couche de roulement lors de la mise en œuvre de cette couche.

b) Domaines d'emploi

Le FLEXIPLAST® est compatible avec tous types de supports fissurés, exception faite des fissures de fatigue par faiblesse structurale, quel que soit le trafic. Bien entendu pour des chaussées présentant des fissures de fatigue, leur renforcement (défaut structural) devient plus adéquat.

Le traitement au FLEXIPLAST® est destiné aux fissurations de type : - retraits thermiques - transversales - longitudinales - polygonales - lézardes. Dans le cas où il y a présence de carrelage sévère, ceci indique une problématique structurale de la chaussée et pour ces cas typiques, il vaudra mieux avoir recours à une technique de réfection plus importante.

c) Limites d'emploi

Le procédé n'a pas directement un effet de renforcement mais il permet de prolonger la durée de vie de la chaussée en réduisant les effets dommageables de la fissuration.

La couche de roulement (type et épaisseur) doit être adaptée aux sollicitations liées au trafic de manière à bien protéger la membrane et à pouvoir résister elle-même à ces sollicitations.

La surface devant recevoir le procédé FLEXIPLAST® doit présenter un bon uni, de façon à pouvoir appliquer l'enrobé coulé à froid dans de bonnes conditions :

- Dans le cas de déformations inférieures à 20 mm (règle de 3 mètres), on applique le procédé FLEXIPLAST® directement sur la surface fissurée.
- Entre 20 et 40 mm, le support sera reprofilé au préalable avec des enrobés à chaud ou des enrobés coulés à froid.
- Dans le cas de fissures inférieures à 5 mm de largeur, aucun traitement n'est nécessaire avant la pose du procédé FLEXIPLAST®.
- Pour des fissures plus larges que 5 mm, un scellement approprié sera nécessaire ou, dans le cas de fissures très importantes (> 15mm), une réparation de type pontage (planage sur 1,5 m de largeur x environ 100 mm de profondeur, pose d'enrobé en fond de coupe, pose du procédé FLEXIPLAST et pose à nouveau d'enrobé à chaud pour combler la profondeur de la coupe) sera nécessaire avant la pose du procédé FLEXIPLAST®. La surface doit être propre et parfaitement sèche avant l'application de la membrane au bitume polymère.

2. CONSTITUANTS

a) Membrane

Le liant de la membrane est un bitume modifié par des élastomères de type SBS (Styrène-Butadiène-Styrène), l'ÉLASTOPLAST, présentant une excellente élasticité même à basse température, avec un intervalle thermique supérieur à 122°C. La performance en traction-allongement explique l'excellent comportement face au retrait

thermique qui provoque la fissuration. L'allongement dépasse 400% à -10°C (et à 100mm/min) et est supérieur à 1300% à $+20^{\circ}\text{C}$ (et à 500 mm/min).

b) **GRIPFIBRE[®]**

La protection de la membrane est assurée par un enrobé coulé à froid GRIPFIBRE[®], de granularité 0/5 continue ou discontinue. L'enrobé coulé à froid, GRIPFIBRE[®], est constitué de granulats et de fibres, enrobés à froid avec une émulsion de bitume polymère - les granulats, intégralement concassés, répondent aux exigences de la classe 1 pour les granulats fins (référence norme 2101 - Granulats).

Le liant du GRIPFIBRE[®] est une émulsion cationique à rupture contrôlée, l'Émulplast EC. Le bitume de base de l'émulsion est l'EVATECH Gp, bitume modifié aux copolymères EVA (Éthylène, Vinyle Acétate).

3. **FORMULATION**

a) **Membrane**

L'Élastoplast présente d'excellentes caractéristiques d'élasticité même à basse température ainsi qu'une faible susceptibilité thermique.

Se reporter aux caractéristiques de la fiche technique correspondante.

b) **GRIPFIBRE[®]**

Les compositions généralement employées sont les suivantes :

• Granulats secs	100 %
• Régulateur	0,5 à 2 %
• Fibres (sèches)	moins de 1 %, 12 à 15 millions de fibres/m ² .
• Émulsion	10 à 13 % en fonction de la granulométrie et de la perméabilité du support
• Teneur en eau d'apport (eau de prémouillage)	variable en fonction de la teneur en eau des granulats
• Dosage en tensioactifs	variable selon les conditions climatiques

4. **PARTICULARITÉS DE FABRICATION ET DE MISE EN ŒUVRE**

a) **Fabrication de la membrane et du GRIPFIBRE[®]**

Les bitumes modifiés utilisés pour la membrane et pour l'émulsion ÉMULPLAST EC du GRIPFIBRE[®] sont préparés en usine.

La fabrication et la mise en œuvre du GRIPFIBRE[®] sont assurées par un seul équipement mobile automoteur qui assure le transport et le stockage des constituants (granulats, émulsion, eau d'apport, régulateur et fibres), leur dosage et leur mélange. La machine est également équipée d'un doseur à fibres breveté, de doseurs à pulvérisants et à granulats et de débitmètres pour les fluides, assurant un dosage précis.

b) **Mise en œuvre de la membrane**

On utilise pour le transport et l'épandage de la membrane, une répandeuse thermofluide moderne équipée d'un système de réchauffage à l'huile thermique, capable de chauffer également la rampe d'épandage qui doit être calorifugée. La répandeuse est également équipée d'un système d'agitation permettant d'éviter toute décantation de la membrane. Comme il a été dit, le liant de la membrane étant très visqueux, la température de pose d'un tel bitume modifié est d'environ 175°C , température permettant une bonne pompabilité sans pour autant amener des dégradations thermiques aux polymères SBS.

L'épaisseur de la membrane est comprise entre 2 et 3 mm (soit 2 à 3 kg/m²). On détermine cette épaisseur en fonction de plusieurs paramètres :

- Densité de la fissuration;
- Nature du support fissuré ;
- Porosité du support fissuré ;
- Épaisseur possible de recouvrement en enrobé chaud.

c) Mise en œuvre de GRIPFIBRE[®]

La centrale mobile, équipée d'un traîneau réglable en altimétrie et extensible, assure le répannage du GRIPFIBRE[®] en roulant sur la membrane ELASTOPLAST. Des dispositifs d'arrosage des pneumatiques évitent tout collage à la membrane.

L'épaisseur moyenne de la couche de GRIPFIBRE[®] sera, selon le cas, de 5 à 10 mm pour le 0/5 mm soit un taux de pose moyen de 10 kg/m².

Ces dosages sont quelque peu inférieurs à ceux utilisés normalement lors d'épandage de GRIPFIBRE[®] conventionnel.

5. CARACTÉRISTIQUES DU PROCÉDÉ

- Le FLEXIPLAST[®], en plus de constituer un système efficace contre la remontée de fissure, permet de maintenir l'étanchéité du support car la membrane ne se rompt pas, même après apparition de la fissure à la base de la couche de roulement.
- Il assure la conservation du collage entre le support fissuré et la nouvelle couche de roulement, ce qui évite la fatigue prématurée du support.
- Les cadences de réalisation sont élevées avec l'utilisation d'équipements performants tels que la répandeuse thermofluide et l'usine mobile d'ECF.
- On peut ouvrir la circulation sur la couche de GRIPFIBRE[®] et compléter la couche de roulement plus tard (2 à 3 jours), ce qui facilite le déroulement des travaux envers la circulation.

6. DISPOSITIONS PRISES POUR ASSURER LA QUALITÉ

La qualité du FLEXIPLAST[®] est assurée par l'entreprise au niveau d'une part, du choix des constituants et d'autre part, de la fabrication et de la mise en œuvre.

a) Matériaux

Les matériaux entrant dans la fabrication du FLEXIPLAST[®] font l'objet de contrôles sévères de la part du service technique de Construction DJL inc.

b) Fabrication et mise en œuvre

DJL met en œuvre les moyens en hommes et en matériels pour que les caractéristiques du produit soient conformes à celles retenues lors de l'étude de formulation qui tient compte par ailleurs des conditions locales de réalisation. Elle s'assure par des contrôles internes et externes aux chantiers du respect des prescriptions.

7. DÉVELOPPEMENT ET RÉFÉRENCES

Le FLEXIPLAST[®] a fait ses débuts en 1990 en France et plus de 2,5 millions de mètres carrés ont été mis en œuvre dans le monde dont plus de 60 000 m² au Canada, réalisés par DJL.

Une liste de projets de référence est disponible.

BIBLIOGRAPHIE

AL-QADI, I. L., ELSEIFI, M., & LEONARD, D., Development of an overlay design model for reflective cracking with and without steel reinforcing nettings, In Asphalt Paving Technology 2003, Vol. 72, 388-423p.

ANTOINE, J. P. Essai de laboratoire sur la remontée des fissures. In J. M. Rigo & R. Degeimbre (Eds.), Reflective cracking in pavements: assessment and control Liege, Belgium: C.E.P.-L.M.P. State University of Liege, 1989, 88-94p.

BALAY J. et ODEON H. "Structures de chaussées" ENTPE.

BERTHIER, TOURENQ, TOSTAIN, ARQUIE et al. "Les granulats" Traité théorique et pratique édité par l'équipement mécanique.

BONNOT et PANET. "Les granulats". R.G.R.A. Fascicule No8, Septembre 1971.

BONNOT J. et VERSTRAETEN J. "Reflective Cracking in Pavement" Synthèse des communications Symposium de Liège 8-10 Mars 1989

BRODEUR, M., CARRIER, J., DURAND, J.-M., & FAUTEUX, É. Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles. Québec: Ministère des Transports, 2002.

BROWN, S. F., & BRUNTON, J. M. Grid reinforced overlays. In J. M. Rigo & R. Degeimbre (Eds.), Reflective cracking in pavements: assessment and control. Liege, Belgium: C.E.P.-L.M.P. State University of Liege, 1989, 63-70p.

CLAUWAERT, C., & FRANCKEN, L., Étude et observation de la fissuration "reflective" au Centre de Recherches Routières belge. Paper presented at the Reflective cracking in pavements: Assessment and Control, Liège, Belgium, 1989.

COLOMBIER, G. Fissuration de retrait des chaussées à assise traitées aux liants hydrauliques, Bulletin de liaison des LCPC, France, N 156 et N 157, 1988.

COLOMBIER, G. Fissuration des chaussées - nature et origine des fissures - Moyens pour maîtriser leur remontée. LCPC, France, 1989. 22p.

COLOMBIER, G. Fissuration des chaussées - nature et origine des fissures, moyens pour maîtriser leur remontée. Journée : " La lutte contre les fissures " ENPC, 1991.

D.R.C.R. (Direction des Routes et de la Circulation Routière), Entretien préventif du réseau national. Répertoire de dégradation, Circulaire, avril, 1979

DI BENEDETTO. H., et DE LA ROCHE C. State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures, 1998, RILEM. report #17, E & FN Spon, 137-180p.

DI BENEDETTO. H., Modélisation : écart entre état des connaissances et applications. Journée LAVOC : École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Septembre, Suisse, 1998, 28p.

Directive. "Spécification relatives aux granulats pour chaussées" (S.E.T.R.A.-L.C.P.C., Avril 1984).

DORÉ G., J.-M. KONRAD et M. ROY. Mécanisme de gel dans les matériaux granulaires de fondation contaminés par les sels de déglacage. 32eCongres Annuel de l'Association québécoise du transport et des routes (AQTR), 1997.

DUMONT, G., DI BENEDETTO H., FONTANA, M., Voies de circulation II, chapitre 5, 1998.

DURIEZ M. et ARRAMBIDE J. "Nouveau traité de matériaux de construction" DUNOD.

GOACOLOU, H., MARCHARD, JP. Fissuration des couches de roulement, 5ème Conférence Internationale sur les chaussées bitumineuses, DELF, 1982

HADDAR, N., FISSOLO, A., & MAILLOT, V. Thermal fatigue crack networks, An computational study: International Journal of Solids and Structures Micromechanics of Materials, 42(2), (2005), 771-788p.

HARVEY, J. T., & BEJARANO, M. O., Performance of Two Overlay Strategies Under Heavy Vehicle Simulator Trafficking: Transportation research record (1769), (2001). 123p.

IRWIN G.R., Analysis of stresses and strains near the end of crack transversing a plate. Journal of Applied Mechanics, 1957

JACOB, T. R. Basic limits of overlay performance during simultaneous thermal and traffic loading. Asphalt Paving Technology, 1990. 59, 382p.

JEUFROY "Conception et construction de chaussée" (tome 2. EYROLLES PARIS 1975).

LANGLOIS, P. Enrobés, définitions, volumes, granulométries et caractéristiques en fonction des granulométries, Cours d'enrobés bitumineux, Université Sherbrooke, 2004.

LEFORT, M., SICARD, D., & MERRIEN, P., Techniques anti-remontée des fissures : Guide d'emploi en chaussées aéronautiques. Bonneuil-sur-Marne, France: Service technique des bases aériennes, 1999.

LELIÈVRE, A. Les enrobés bitumineux, Les éditions "Le Griffon d'argile", ISBN 2-89443-016-7, 1994, 408p.

LIANG, R. Y., & ZHOU, J. Prediction of fatigue life of asphalt concrete beams, International Journal of Fatigue, 19(2), 1997, 117-124p.

MOUGHABGHAB, Z. Étude de l'orniérage, de la fissuration thermique et du désenrobage dans les enrobés bitumineux, Université Laval, TA 7.5 UL 1994 M975 1, 1994.

MTQ, Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples, ISBN 2-551-21654-0, 2002

NEIFAR M. Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux: expérimentation et modélisation, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 1997, 205p.

NEJI, J. Fissuration des chaussées semi - rigides. Expérience et Modélisation. Unpublished Mécanique des Sols - Structures Matériaux, École Centrale de Paris, Lyon 1992.

PARCELLS, W. H. J., METHENY, T. M., & MAAQ, R. G., Predicting surface friction from laboratory tests. 1982, 33-40p.

PIERRE P, PERRATON D, DORÉ G. et JUNEAU S. "Étude et compréhension des causes de la remontée des fissures et propositions de solutions adéquates", Rapport final, 2005

RIGO, J. M., DEGEIMBRE, R., & FRANCKEN, L. Laboratory simulation and modelling overlay systems. In RILEM (Ed.), Reflective cracking in pavements state of the art and design recommendations: proceedings of the second international RILEM conference. London: RILEM. 1993, 73-99p

SALENÇON J. Viscoélasticité, Cours de calcul des structures anélastiques, Paris, 1983, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, France, 88p.

SAVARD, Y. Guide pour évaluer la performance des chaussées, MTQ, Ministère de transports du Québec, Direction du laboratoire des chaussées, 1995.

SCARPAS, A., & de BONDT, A. H. Finite elements simulation of reflective cracking in asphaltic overlays: *Heron*, 41(1), 5., 1996.

SHOOK, J. F., F. N. FINN, M. W. WITCZAK et C. L. Monismith. (1982) «Thickness Design of Asphalt Pavements - The Asphalt Institute Method» *Proceedings, 5th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Amsterdam, (Volume 1)*. 1982. 17-43

SICARD, D., Remontée des fissures dans les chaussées : Essai de comportement en laboratoire par flexions sur barreaux. In J. M. Rigo & R. Degeimbre (Eds.), *Reflective cracking in pavements: assessment and control*, Liege, Belgium: C.E.P.-L.M.P. State University of Liege, 1989, 71-78p.

S.T.B.A. – Techniques anti-remontée de fissures, 1999

SVEC, O. J., & ELDRED, D., New Laboratory Testing Technique for Asphalt Concrete. *Transportation research record* (1353), 1992, 31-38p.

UGE P., GRAVOIS A. et LEMAIRE J.N "Le comportement en fatigue des enrobés bitumineux : influence du liant".

WENDLING, L., XOLIN, E., GIMENEZ, D., REYNAUD, P., DE LA ROCHE, C., CHEVALIER, J., et al., Characterisation of crack propagation in bituminous mixtures. In C. Petit, I. L. Al-Qadi & A. Millien (Eds.), *Fifth International RILEM Conference on Cracking in Pavements: Mitigation, Risk Assessment and Prevention: Limoges, France, 5-8 May*. Bagneux, France: RILEM Publications, 2004.

YODER, E.J., WITCZAK, M.W., *Principles of pavement design*, John. Wiley and Sons Inc, 1975

ZHOU, F., CHEN, D., SCULLION, T., & WILIAMME, R., Overlay tester: a simple test to evaluate the reflective cracking resistance of asphalt mixtures. In C. Petit, I. L. Al-Qadi & A. Millien (Eds.), *Fifth International RILEM Conference on Cracking in Pavements: Mitigation, Risk Assessment and Prevention: Limoges, France, 5-8 May* Bagneux, France: RILEM Publications, 2004, 113-120p.

ZHOU, J., & LIANG, R., Y., Two-stage fatigue model for asphalt concrete. Paper presented at the *Proceedings of the 10th Conference on Engineering Mechanics. Part 2 (of 2)*, Boulder, CO, USA, May 21-24, 1995.