

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
MATHIEU MEUNIER

CONTRIBUTION À LA MISE AU POINT DES CRITÈRES DE FORMULATION POUR
LES ENROBÉS SMA ADAPTÉS À LA FORMULATION DU LABORATOIRE DES
CHAUSSÉES DU MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC

MONTRÉAL, LE 7 JUIN 2005

(c) droits réservés de Mathieu Meunier

**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**

**Mme Marie-José Nollet, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure**

**M. Michel Paradis, membre du jury
Ministère des transports du Québec – Laboratoire des chaussées**

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

LE 7 JUIN 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

CONTRIBUTION À LA MISE AU POINT DES CRITÈRES DE FORMULATION POUR LES ENROBÉS SMA ADAPTÉ À LA FORMULATION LC

Mathieu Meunier

SOMMAIRE

Ce mémoire a comme objectif d'élaborer une méthodologie de formulation et de pose adaptée aux enrobés à matrice de pierres (SMA : Stone Matrix Asphalt) suivant le principe de formulation du Laboratoire des Chaussées développé au Québec.

La méthodologie de formulation proposée est la suivante :

- a. estimer une masse de départ de particules grossières;
- b. définir la masse de particules intermédiaire (0/2,5), de telle sorte qu'elle n'engendre pas le desserrement des particules grossières;
- c. déterminer la masse optimale en pierre (> 5 mm) à partir d'un essai à la PCG;
- d. déterminer le dosage optimum en filler.

Ce travail fait ressortir les critères de formulation pour les enrobés SMA ainsi que les critères que les entrepreneurs et les donneurs d'ouvrages devraient prendre en considération avant la mise en place des SMA. La principale différence demeure dans la stratégie de compaction qui se doit d'être plus agressive et sévère.

CONTRIBUTION À LA MISE AU POINT DES CRITÈRES DE FORMULATION POUR LES ENROBÉS SMA ADAPTÉ À LA FORMULATION LC

Mathieu Meunier

SOMMAIRE

Au Québec, les écarts de température entre les saisons représentent des conditions sévères pour l'enrobé bitumineux. Pour l'ingénieur, la formulation d'un enrobé se fait souvent sur la base de compromis.

De surcroît, la formulation des enrobés de resurfaçage est encore plus critique du fait que les dits enrobés sont soumis à des conditions sévères de température et de circulation et assujettis à des contraintes avec le substrat.

Sur la base d'une revue exhaustive de la littérature, ce mémoire a comme objectif d'élaborer une méthodologie de formulation et de pose adaptée aux enrobés à matrice de pierres (SMA : Stone Matrix Asphalt) selon le principe de formulation du Laboratoire des Chaussées (LC) développé dans la province de Québec.

La méthodologie de formulation proposée comporte les différentes étapes suivantes :

- a. estimer une masse de départ de particules grossières dans l'enrobé;
- b. définir la masse de particules intermédiaires (0/2,5), de telle sorte qu'elle n'engendre pas le desserrement des particules grossières (la pierre);
- c. déterminer la masse optimale en pierre (> 5 mm) à partir d'un essai à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG);
- d. déterminer le dosage optimum en filler.

Après plusieurs essais en laboratoire et en chantier, ce travail fait ressortir les principaux critères de formulation pour les enrobés SMA. En particulier, le volume de bitume effectif (V_{be}) devrait être fixé à plus ou moins 15,2%, tandis que le dosage en particules fines devrait être à son optimum pour permettre un meilleur rendement de l'enrobé.

Ce document fait aussi ressortir les principaux critères que les entrepreneurs et les donneurs d'ouvrages devraient prendre en considération avant la mise en place de l'enrobé SMA en chantier. La principale différence relativement aux enrobés standards s'avère être la stratégie de compaction qui se doit d'être plus agressive et sévère et être effectuée sous contrôle afin d'éviter une surcompaction qui générerait une fragmentation des granulats.

SUPPORTING DATA ON CLARIFYING FORMULATION CRITERIA ADAPTED TO SMA BITUMINOUS MIX ACCORDING TO THE LC FORMULATION

Mathieu Meunier

ABSTRACT

In Quebec, the variations of the temperature between the seasons represent severe conditions for the bituminous mix. This has repercussions on the engineer who must often carry out a formulation on a bituminous mix on the basis of compromise.

In addition, the formulation of the bituminous mix of a surface layer is even more critical due to the fact that it is subjected to extreme temperature conditions and so subject to constraints with the substrate.

Based on an exhaustive literature review, this dissertation's objective is to devise a methodology of formulation and construction procedures adapted to SMA bituminous mix according to the LC formulation principle developed in the province of Quebec.

The methodology of formulation proposed includes the following steps :

- a. estimate the mass of 5-10 mm stone;
- b. define the intermediate aggregate (0/2,5) mass in such a way that it will not affect the interaction between the large aggregates (stone);
- c. determine the optimal mass of stone (> 5mm) using the SGC;
- d. determine the optimum filler proportion.

According to several tests in laboratory and in the field, this work emphasizes the principal criteria of formulation for bituminous mix SMA. In particular, the V_{be} which should be fixed at more or less 15,2% as well as the proportioning in fine particles which must be at its optimum to allow a better output of the bituminous mix.

Moreover, this document emphasizes the principal criteria that contractors and donors of works should take into consideration before the installation of bituminous SMA mix in a building site. The principal difference relative with the standard bituminous mix remains in the strategy of compaction which must be undertaken in a more aggressive manner as well as be carried out under control in order to avoid an overcompaction which would generate a fragmentation of the aggregates.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. Daniel Perraton pour son support, son soutien et ses encouragements tout au long de mon projet. Enfin, je veux lui souligner combien je lui suis reconnaissant qu'il m'ait transmis son goût et son grand intérêt pour la recherche.

Je tiens également à remercier tout le personnel du département de génie de la construction pour leur aide et leur soutien, en particulier, MM. John Lescelleur, Alain Desjardins, Francis Bilodeau ainsi que Michel Vaillancourt.

Je remercie également M. Michel Paradis, du Ministère des transports du Québec, pour son appui et son soutien logistique tout au cours de mon projet.

Finalement, je voudrais mentionner le soutien que j'ai reçu de mes parents, de mon frère Marc-André ainsi que de ma copine Isabelle qui m'ont sans cesse encouragé et motivé tout au long de mes travaux.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES.....	xvii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA DOCUMENTATION.....	3
1.1 L'origine des SMA.....	3
1.2 Les premières proportions de référence de l'enrobé SMA	4
1.3 Le « MASTIMAC »... le premier SMA	5
1.4 Le SMA d'aujourd'hui.....	6
1.5 Les méthodes de formulation des enrobés bitumineux	7
1.5.1 La méthode HVEEM	8
1.5.2 La méthode Marshall	9
1.5.3 La méthode Superpave.....	10
1.5.4 La méthode Française	13
1.5.5 La méthode LC	14
1.6 La méthode de formulation des enrobés SMA selon le N.C.A.T.....	15
1.6.1 La sélection des matériaux pour les enrobés SMA	16
1.6.2 La sélection du fuseau granulaire optimum pour la confection des enrobés SMA.....	18
1.6.3 La sélection du taux de liant optimum	21
1.6.4 L'évaluation de l'enrobé à la tenue à l'eau et au ressuage.....	23
1.6.5 Les propriétés de l'enrobé SMA.....	23
1.7 Les caractéristiques des SMA.....	24
1.7.1 La durée de vie.....	25
1.7.2 Les coûts de production.....	25
1.7.3 La résistance à l'orniérage.....	25
1.7.4 L'essai TSRST.....	27
1.7.5 La résistance à la fissuration.....	29
1.7.6 La résistance à la fatigue	32
1.7.7 Les performances vis-à-vis la sécurité.....	33
1.8 Les procédures de production en usine de l'enrobé SMA	34
1.8.1 Les matériaux.....	35

1.8.1.1	Les granulats	35
1.8.1.2	Le filler d'appoint.....	35
1.8.1.3	Le liant.....	36
1.8.1.4	Les agents stabilisants.....	36
1.8.2	La production en usine des enrobés SMA.....	37
1.8.2.1	Le réglage de la centrale d'enrobage.....	37
1.8.2.2	Les températures de production des enrobés SMA	38
1.8.2.3	Le temps de malaxage des enrobés SMA.....	38
1.8.2.4	L'entreposage des enrobés SMA.....	39
1.8.3	Les procédures de mise en place des enrobés SMA	39
1.8.3.1	Les températures limites de pose des enrobés SMA	39
1.8.3.2	Les conditions de transport des enrobés SMA.....	40
1.8.3.3	La préparation de la surface	40
1.8.4	Les manipulations et procédures reliées à la paveuse.....	41
1.8.4.1	Le chargement.....	41
1.8.4.2	Le réglage.....	42
1.8.4.3	La vitesse	42
1.8.5	Les opérations de compactage.....	43
1.9	La corrélation entre la prévision de l'aptitude au compactage en laboratoire et celle en chantier : la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)	45
1.9.1	L'approche du Ministère des transports du Québec (MTQ).....	46
1.9.1.1	Les avantage(s).....	47
1.9.1.2	Les désavantage(s)	48
1.9.2	L'approche du laboratoire Central des Ponts et Chaussées de France (LCPC).....	48
1.9.2.1	Les avantage(s).....	51
1.9.2.2	Les désavantage(s)	51
1.9.3	L'approche du programme Superpave.....	52
1.9.3.1	Les avantage(s).....	54
1.9.3.2	Les désavantage(s)	54
CHAPITRE 2 DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DE FORMULATION (MIX DESIGN) POUR LES ENROBÉS SMA		56
2.1	Introduction.....	56
2.2	Détermination du volume de bitume effectif : V_{be}	57
2.3	Détermination du N_{design}	59
2.4	Méthodologie de formulation proposée	59
2.4.1	Estimation de la masse de pierre (> 5 mm) de départ à utiliser.....	59
2.4.2	Détermination de la masse de particules intermédiaires : le granulat fin (0/2,5).....	60
2.4.3	Évaluation de l'aptitude au compactage de la formulation de départ, $SMA_{départ}$	64
2.4.4	Détermination du dosage optimum en filler.....	64
2.4.5	Modification de la formulation pour obtenir les caractéristiques recherchées.....	65
2.5	Programme expérimental.....	65

2.5.1	PHASE 1 : Formulation en LABORATOIRE.....	66
2.5.2	PHASE 2 : Réalisation d'une planche d'essai en CHANTIER.....	66
2.5.3	PHASE 3 : Analyse des résultats et établissement des critères de design.....	67
CHAPITRE 3 DESCRIPTIONS DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LES PHASES 1 ET 2.....		
		68
3.1	Introduction.....	68
3.2	Descriptions des matériaux utilisés.....	68
3.2.1	Gros granulats de calibre 5-10 mm.....	68
3.2.2	Granulats fins de calibre 0-5 mm.....	69
3.2.3	Sable.....	71
3.2.4	Filler minéral.....	71
3.2.5	Liant bitumineux.....	74
3.2.6	Agents stabilisants.....	74
3.3	Descriptions des essais de contrôle en laboratoire.....	75
3.3.1	Détermination de l'aptitude au compactage.....	76
3.3.2	Mesure de la résistance à l'orniérage.....	76
3.3.3	Mesure du retrait thermique empêché : TSRST.....	78
3.3.4	Mesure des propriétés rhéologiques des enrobés.....	81
3.3.5	Mesure du coefficient de dilatation thermique : α	85
3.3.6	Confection des éprouvettes pour les mesures de la résistance à basse température (TSRST), des propriétés rhéologiques (E^*) et du coefficient de dilatation thermique (α).....	87
3.3.7	Synthèse des essais réalisés sur l'enrobé SMA pour évaluer ses performances.....	89
CHAPITRE 4 PHASE 1 : FORMULATION EN LABORATOIRE.....		
		90
4.1	Validation de la procédure de formulation de l'enrobé SMA.....	90
4.1.1	Sélection du volume de bitume effectif : V_{be}	91
4.1.2	Estimation de la masse de pierre (> 5mm) de départ à utiliser.....	91
4.1.3	Détermination des masses des autres constituants.....	91
4.1.4	Détermination de l'optimum en filler et résultats de l'essai à la PCG....	94
4.1.5	Formulation de l'enrobé SMA sélectionné.....	99
CHAPITRE 5 PHASE 2 : RÉALISATION D'UNE PLANCHE D'ESSAI D'ENROBÉ SMA EN CHANTIER.....		
		100
5.1	Description du site de la planche d'essai.....	100
5.2	Formulation sélectionnée.....	102
5.3	Échantillonnage des lots.....	102
5.4	Présentation des résultats relatifs à l'homogénéité des échantillons du prélèvement de masse en usine.....	104
5.4.1	Variation de la teneur en bitume des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse.....	106

5.4.2	Variation de la teneur en pierre (> 5 mm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse.....	107
5.4.3	Variation de la teneur en particules fines (< 80 µm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse.....	108
5.4.4	Variation des résultats relatifs à l'aptitude au compactage à l'aide de la PCG des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse.....	109
5.4.5	Tableau récapitulatif des variations mesurées des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse.....	110
5.4.6	Formulation de l'enrobé prélevé à l'usine.....	111
5.5	Caractéristiques de la performance de l'enrobé SMA produit en usine d'enrobage.....	113
5.5.1	Mesure de la résistance à l'orniéreur LCPC.....	114
5.5.2	Mesure du coefficient de dilatation thermique.....	116
5.5.3	Essais de Retrait thermique empêché : TSRST.....	118
5.5.4	Essais de module complexe.....	120
5.6	Résultats obtenus lors de l'analyse de la stabilité de la production en chantier.....	121
5.6.1	Présentation des résultats relatifs à la teneur en bitume.....	123
5.6.2	Présentation des résultats relatifs à la variation de la granulométrie de l'enrobé en cours de production.....	124
5.6.2.1	Variation de la teneur en pierre (> 5mm) dans l'enrobé.....	125
5.6.2.2	Variation de la teneur en particules fines (< 80 µm) dans l'enrobé.....	127
5.6.2.3	Présentation des résultats relatifs à la variation de l'aptitude au compactage en cours de production évaluée à l'aide de la PCG.....	129
5.6.2.4	Tableau récapitulatif des variations mesurées des échantillons prélevés sur la planche d'essai.....	130
5.6.3	Tableau comparatif des différentes formulations des enrobés SMA....	131
5.7	Résultats quant au degré de compacité de l'enrobé SMA en chantier.....	133
CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS.....		139
6.1	Sélection d'un V_{be} approprié.....	139
6.1.1	Éléments de réflexion.....	139
6.1.1.1	Performance à l'orniérage pour les enrobés SMA de différents dosages en V_{be}	143
6.1.1.2	Évolution du coefficient de dilatation thermique pour les enrobés SMA de différents dosages en V_{be}	144
6.1.1.3	Évolution de la performance à basse température pour les enrobés SMA de différents dosages en V_{be}	145
6.1.2	Conclusions.....	146
6.2	Évaluation des limites acceptables lors de la production en chantier.....	147
6.2.1	Analyses des tolérances admissibles en production.....	148

6.2.2	Conclusions	155
6.3	Sélection / Validation du N_{design} pour la formulation en laboratoire.....	156
6.3.1	Analyse des méthodes de sélection du N_{design}	156
6.3.2	Conclusions	161
CONCLUSION		164
RECOMMANDATION.....		173
ANNEXES		
1	Description de la méthode de formulation HVEEM	174
2	Description du stabilomètre HVEEM	178
3	Description de la méthode de formulation MARSHALL.....	181
4	Description de la méthode de formulation SUPERPAVE	185
5	Description de la méthode de formulation FRANÇAISE.....	194
6	Description de la méthode de formulation LC du MTQ.....	198
7	Critères de qualité pour la fibre de cellulose	202
8	Critères de qualité pour la fibre minérale	204
9	Démonstration des formules de formulation selon la méthode N.C.A.T.....	206
10	« Determination od Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures	209
11	Critères de formulation des enrobés SMA à la presse Marshall	213
12	Description du « Asphalt Pavement Analyzer (APA) »	215
13	Fiche technique du bitume ABL-2	218
14	N_{design} originaux de la méthode de formulation SUPERPAVE.....	220
15	Données de formulation sur différents SMA à travers le monde.....	222
16	Attestation de conformité du bitume PG58-28 utilisé dans la confection des enrobés SMA	225
17	Fiche technique de la fibre d'amiante utilisée dans la confection des enrobés SMA	227
18	Fiche signalétique de la fibre d'amiante utilisée dans la confection des enrobés SMA	229
19	Descriptions des calculs pour l'obtention du mélange SMA _{ESSAI}	231
20	Calculs effectués pour l'obtention des facteurs de correction induit par le four à ignition	233
21	Fiche technique de l'enrobé SMA-10 _{55 SHER USINE}	236
22	Fiche technique de l'enrobé EGA-10 _{55 SHER USINE}	238
23	Fiche technique de l'enrobé ESG-10 _{USINE}	240
24	Valeurs de compaction brutes des enrobés SMA et EGA-10 recueillies en chantier	242
25	Graphiques représentant les résultats des différents essais effectués sur les enrobés SMA à différents dosages en V_{be}	245
BIBLIOGRAPHIE.....		248

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau I	Les premières proportions des mélanges SMA	5
Tableau II	Méthode Superpave - Caractéristiques de chaque niveau	12
Tableau III	Critères de performance des gros granulats pour la confection d'un enrobé SMA selon le N.C.A.T.....	17
Tableau IV	Critères de performance des granulats fins pour la confection d'un enrobé SMA selon le N.C.A.T.....	18
Tableau V	Critères de qualité pour les granulats servant à la formulation des enrobés SMA en fonction de la grosseur nominale maximale du granulat : le NMAS.....	19
Tableau VI	Taux de liant minimum requis en fonction de la densité brute des granulats.....	22
Tableau VII	Propriétés des mortiers des enrobés SMA	23
Tableau VIII	Spécifications des enrobés SMA formulés à l'aide de la PCG à 100 girations	24
Tableau IX	Résultats à l'essai APA de différents enrobés SMA	27
Tableau X	Résultats à l'essai TSRST sur différents enrobés SMA	28
Tableau XI	Identification des enrobés utilisés pour l'analyse des fissures.....	31
Tableau XII	Analyses des fissures par projet après 5 ans (% de fissuration)	31
Tableau XIII	Analyses des fissures par caractéristiques des projets (% de fissuration).....	32
Tableau XIV	Synthèse des résultats des essais de fatigue effectués sur des enrobés SMA et des enrobés conventionnels (T° = 10 °C et une fréquence de 10 Hz)	33
Tableau XV	Critères de sélection et du N _{design} des enrobés du MTQ	47

Tableau XVI	Critères de fonctionnement de la PCG	50
Tableau XVII	Niveau de N_{design} Superpave révisé	55
Tableau XVIII	V_{be} et données climatiques de différentes régions du monde	58
Tableau XIX	Caractéristiques des granulats	70
Tableau XX	Caractéristiques du sable	72
Tableau XXI	Caractéristiques du filler	73
Tableau XXII	Caractéristiques du bitume PG 58-28.....	74
Tableau XXIII	Caractéristiques des agents stabilisants.....	75
Tableau XXIV	Paramètres de fonctionnement de l'orniéreur LCPC.....	77
Tableau XXV	Liste des principaux essais réalisés	89
Tableau XXVI	Formulation de l'enrobé de laboratoire	93
Tableau XXVII	Caractéristiques des mélanges confectionnés pour déterminer le dosage optimal en filler (bitume : PG 58-28; $V_{be} = 15,2\%$)	95
Tableau XXVIII	Résultats de l'essai à l'orniérage pour les enrobés SMA confectionnés avec un V_{be} de 15,2%.....	96
Tableau XXIX	Formulation de l'enrobé SMA <small>A OPTIMISER</small>	99
Tableau XXX	Formulation ciblée en laboratoire pour la planche d'essai	103
Tableau XXXI	Variations mesurées pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage en masse à l'usine	111
Tableau XXXII	Formulation ciblée en laboratoire pour la planche d'essai	112
Tableau XXXIII	Résultats de l'essai à l'orniérage	115
Tableau XXXIV	Résultats des coefficients de dilatation thermique en fonction de la température.....	117
Tableau XXXV	Données recueillies lors de l'essai TSRST	119
Tableau XXXVI	Valeurs des paramètres du modèle de Huet-Sayegh pour les enrobés étudiés	121

Tableau XXXVII	Résultats de l'essai au four à ignition	123
Tableau XXXVIII	Résultats de la granulométrie et de l'essai au four à ignition	125
Tableau IXL	Résultats de l'essai à la PCG	130
Tableau XL	Variations mesurées pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de chantier	131
Tableau XLI	Formulation ciblée en laboratoire pour la planche d'essai	132
Tableau XLII	Données relatives aux équipements de chantier	133
Tableau XLIII	Données recueillies lors de la compaction de l'enrobé SMA ₅₅ SHER CHANTIER	137
Tableau XLIV	Détails de formulation des enrobés sélectionnés	141
Tableau VL	Tableau récapitulatif des essais effectués sur les enrobés sélectionnés	142
Tableau VLI	Tolérances de production en usine selon N.C.A.T.	147
Tableau VLII	Tolérances de production élaborées suite à nos résultats et analyses	156
Tableau VLIII	Données recueillies lors de la compaction de l'enrobé EGA-10 ₅₅ SHER CHANTIER	159
Tableau IL	Valeurs de N _{design} obtenues selon la méthode Française	161
Tableau L	Synthèse des N _{design} en fonction de la méthode	162
Tableau LI	Spécifications des matériaux pour les enrobés SMA utilisés en couche de roulement	167
Tableau LII	Critères de formulation (<i>mix design</i>) pour les enrobés SMA	168
Tableau LIII	La méthodologie proposée de formulation des enrobés SMA	169
Tableau LIV	Les performances recherchées pour les enrobés SMA	170
Tableau LV	Les recommandations de mise en oeuvre pour les enrobés SMA	171

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1	Illustrations du procédé physique (A) et mécanique (B) de la PCG	11
Figure 2	Représentation schématique de la composition volumétrique des enrobés bitumineux	16
Figure 3	Plage de profondeurs d'ornières mesurées sur différents projets routiers aux États-Unis (Adapté de Brown et coll., 1997).....	26
Figure 4	Analyses des fissures d'une chaussée d'enrobé standard et d'une moyenne pour des chaussée d'enrobé SMA après 5 ans de services (Adapté de Schmiedlin et Bischoff, 2002).	30
Figure 5	Illustrations des différentielles de températures (en °F dans la benne du camion) observées à la livraison d'un enrobé en chantier (Adapté de WSDOT, 2000).	42
Figure 6	Illustrations des variations de températures (en °F) lors de la pose des enrobés en chantier (Adapté de WSDOT, 2000).....	44
Figure 7	Écarts relatifs générés par l'énergie développée par les compacteurs (adapté de Moutier, 1982).....	51
Figure 8	Évolution de l'indice des vides d'un combiné binaire gros (G) et fin (F) en fonction de la proportion de gros dans le combiné et ce pour divers rapport des diamètres de taille de particules ($\frac{\text{Ø}_{\text{gros}}}{\text{Ø}_{\text{petit}}}$) (Perraton, 2004).....	62
Figure 9	Représentation de l'effet d'interférence d'après Powers (F(particules fines ou intermédiaires) + G(pierre) = 1) (Perraton, 2004).....	63
Figure 10	Effets du surdosage en filler : (A) dosage optimum en filler (B) surdosage qui génère une augmentation des vides : effet d'interférence	65
Figure 11	Principales phases du programme expérimental	66

Figure 12	Illustration des gros granulats et des granulats fins échantillonnés (été 2004).....	69
Figure 13	Illustration des granulométries Carrière et LUCREB du gros granulat, du granulat fin ainsi que du sable	73
Figure 14	Localisation des points de mesure après chaque seuil de contrôle	77
Figure 15	Schématisation des éprouvettes pour l'essai TSRST et identification de la localisation des extensomètres	79
Figure 16	Données recueillies et analysées pour l'essai TSRST	81
Figure 17	Représentation schématique du modèle rhéologique de Huet-Sayegh	84
Figure 18	Schématisation des éprouvettes pour l'essai de coefficient de dilatation thermique	86
Figure 19	Variations typiques des températures pour laquelle une éprouvette est soumise durant l'essai visant à mesurer le coefficient de dilatation thermique	87
Figure 20	Schématisation du plan de carottage des éprouvettes pour les différents essais.....	88
Figure 21	Étapes de formulation des enrobés SMA	90
Figure 22	Influence du rapport des diamètres des granulats sur l'indice des vides d'un mélange binaire de granulats (Perraton, 2004).....	92
Figure 23	Graphique illustrant la relation entre le passant 80 μm et le pourcentage de vides optimum mesuré à 60 girations ($V_{be}=15,2$).....	96
Figure 24	Graphique illustrant le pourcentage d'ornièrage en fonction du nombre de cycles pour différents enrobés SMA	97
Figure 25	Graphique illustrant le haut taux de bitume par la droite de la masse volumique maximum (DMVM)	98
Figure 26	Localisation des différents prélèvements effectués sur la planche d'essai	101

Figure 27	Photos illustrant le premier type d'échantillonnage : échantillonnage de masse en usine	104
Figure 28	Photos illustrant le deuxième type d'échantillonnage : échantillonnage en chantier.....	104
Figure 29	Relation illustrant la variation de la teneur en bitume en fonction du lot échantillonné en masse à l'usine.....	107
Figure 30	Relation illustrant la variation de la teneur pierre en fonction du lot échantillonné en masse à l'usine.....	108
Figure 31	Relation illustrant la variation de la teneur en particules fines en fonction du lot échantillonné en masse à l'usine	109
Figure 32	Relation entre la variation du pourcentage de vides à 60 girations à l'essai à la PCG et le numéro de lot échantillonné en masse à l'usine.....	110
Figure 33	Graphique illustrant le pourcentage d'orniérage en fonction du nombre de cycles pour les trois enrobés échantillonnés en masse en usine d'enrobage et l'enrobé formulé en laboratoire	116
Figure 34	Graphique illustrant les résultats des coefficients de dilatation thermique.....	117
Figure 35	Relation entre la température et la contrainte induite au sein d'une éprouvette (\varnothing 60 mm X 250 mm; taux de gel : 10°C/hr) en retrait thermique empêché	120
Figure 36	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 (ϵ_{MOYEN} =0))	122
Figure 37	Relation illustrant la variation de la teneur en bitume en fonction du numéro de camion échantillonné	124
Figure 38	Influence de la proportion de gros granulat sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA évalué à la PCG à partir de l'enrobé confectionnées en laboratoire (adapté de Tremblay 2001).....	126
Figure 39	Relation entre la teneur en particules retenues au tamis 5 mm et le numéro de camion échantillonné en cours de mise en œuvre de la planche d'essai.....	127

Figure 40	Relation entre la teneur en particules passant le tamis 80 μm et le numéro de camion échantillonné en cours de mise en œuvre de la planche d'essai	128
Figure 41	Relation entre la variation du pourcentage de vides à 60 girations à l'essai à la PCG et le numéro de camion échantillonné en cours de mise en œuvre de la planche d'essai.....	129
Figure 42	Variation des températures mesurées directement dans le malaxeur (sonde thermique) à l'usine d'enrobage, dans la benne de la paveuse (sonde thermique) au moment de l'échantillonnage à la réception en chantier.....	136
Figure 43	Graphiques illustrant la variation de la température et le degré de compaction en chantier à différent chaînage (A : 3+516 ; B : 3+545 ; C : 3+608 ; D : 3+651).....	138
Figure 44	Relation entre la teneur en vides à 60 girations à la PCG et le pourcentage de particules passant le tamis 80 μm pour différents dosages en V_{be}	143
Figure 45	Graphique illustrant les résultats à l'orniérage pour les différents V_{be} sélectionnés.....	144
Figure 46	Graphique illustrant les résultats du coefficient de dilatation thermique pour les différents V_{be} sélectionnés.....	145
Figure 47	Graphique illustrant les résultats de l'essai TSRST pour les différents V_{be} sélectionnés	146
Figure 48	Graphique illustrant les limites de tolérance proposées sur l'analyse du dosage de la pierre (particules > 5 mm).....	149
Figure 49	Graphique illustrant les limites de tolérance proposées sur l'analyse du dosage sur le tamis 80 μm	150
Figure 50	Graphique illustrant la variation observée sur l'analyse de la teneur en bitume ainsi que la limite de tolérance proposée	151
Figure 51	Graphique illustrant la variation du pourcentage de vides observée sur les lots analysés au N_{design} (60 girations).....	152
Figure 52	Influence de la compacité sur la résistance à l'orniérage, essai à l'orniéreur (adapté de Proteau et Paquin, 2000).....	153

Figure 53	Graphique illustrant la variation du pourcentage de vides observée sur les lots analysés au N_{design} (60 girations).....	154
Figure 54	Graphique illustrant la variation du pourcentage de vides observée sur les lots analysés au N_{design} (60 girations) en fonction des limites ajustées en fonction des tolérances de production	155
Figure 55	Graphique illustrant la variation de la température et du niveau de compaction en chantier à différent chaînage (A : 3+785 ; B : 3+906) pour l'enrobé EGA-10 ₅₅ SHER CHANTIER	160

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

φ	angle de phase
σ_T	contrainte de tension
ϵ_0	déformation imposée
°	degré
°C	degré Celcius
°F	degré Fahrenheit
\emptyset	diamètre
ω	fréquence
γ_s^{GROS}	masse volumique sèche du gros granulat (kg/m^3)
γ_{eau}	masse volumique de l'eau (kg/m^3)
α	surface spécifique (mm^{-1})
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AFNOR	Association française de normalisation
AIPCR	Association internationale permanente des Congrès de la Route
ALDOT	<i>Alabama Department of Transportation</i>
APA	<i>Asphalt Pavement Analyzer</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BNQ	Bureau de Normalisation du Québec
CCDG	Cahier des Charges et Devis Généraux
C_{chantier}	niveau de compaction obtenu en chantier
C_e	coefficient d'écoulement
$C_{\text{laboratoire}}$	niveau de compaction obtenu en laboratoire
cm	centimètre
coll.	collaborateur
CRCP	<i>Continuously Reinforced Concrete Pavement</i>
D	diamètre du gros granulat
\bar{D}	diamètre moyen du gros granulat
d	diamètre du granulat fin
\bar{d}	diamètre moyen du granulat fin

daN	déca Newton (10^1)
db	décibel
D_b	densité du bitume
D_{ga}	densité apparente
D_{gb}	densité brute d'un granulat
D_{ge}	densité effective d'un granulat
Dmax	diamètre maximal des particules
D_{mb}	densité brute de l'enrobé compacté
Dmin	diamètre minimal des particules
D_{mm}	densité maximale du mélange
DMVM	Droite de la Masse Volumique Maximale
e	épaisseur de l'enrobé (cm)
E^*	module complexe
E1	module complexe partie réelle
E2	module complexe partie imaginaire
$ E^* $	module dynamique
<i>EAPA</i>	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EB	Enrobé Bitumineux
ÉCAS	Équivalent de Charge Axiale Simple
EG	Enrobé Grenu
EGA	Enrobé Grenu avec Amiante
EME	Enrobé à Module Élevé
ESG	Enrobé Semi-Grenu
F	proportion de granulat fin
FBE	Film de Bitume Effectif
FME	Film de Mastic Effectif
g	gramme
G	proportion de gros granulat
<i>GDOT</i>	<i>Georgia Department Of Transportation</i>

GNM	dimension de Grosseur Nominale Maximale qui correspond au tamis de degré supérieur au 1 ^{er} tamis qui retient plus de 10% de particules. (NMAS : Nominal Maximum Aggregate Size - S_n : Grosseur nominale maximale du squelette granulaire)
GPC	Chromatographie sur Gel Perméable
H.R.	Humidité Relative
Hz	hertz
JRCP	<i>Jointed Reinforced Concrete Pavement</i>
K	facteur dépendant de l'énergie développé par le compacteur
kg	kilogramme
kN	kilonewton
kPa	kilopascal
LA	Los Angeles
LC	Laboratoire des Chaussées
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LUCREB	Laboratoire Universitaire sur les Chaussées Routes et Enrobés Bitumineux
mm	millimètre
MD	Micro-Deval
Mg	méga Gramme (10^6)
M_{granulat}	masse de granulat
$M_{\text{granulat fin}}$	masse de granulat fin
M_{fibre}	masse de fibre
M_{pierre}	masse de pierre
MPa	méga Pascal
M_{richesse}	module de richesse
MTQ	Ministère des Transports du Québec
mol	mole
N	nombre de giration
n	nombre d'échantillon
N.C.A.T.	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NQ	Normes du Québec
n/a	non applicable

n/d	non disponible
NF	Norme Française
n_g	nombre de giration
n/m	non mesurable
n_p	nombre de passe du rouleau compacteur
O.C.D.E.	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
P	pourcentage passant au tamis "d"
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
pH	potentiel hydrogène
P_s	pourcentage de granulat dans l'enrobé
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i> (vieillessement sous pression)
PCC	<i>Portland Cement Concrete</i>
PCCP	<i>Portland Cement Concrete Pavement</i>
PCG	Presse à Cisaillement Giratoire
PG	grade de performance d'un bitume (" <i>Performance Grade</i> ")
PNCRR	Programme National Coopératif de Recherche Routière (<i>NCHRP</i>)
RTA	<i>Roads and Traffic Authority</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i> (étuvage accéléré en couche mince)
s	écart type
SGC	<i>Superpave Giratory Compactor</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMA	enrobé à matrice de pierre (" <i>Stone Matrix Asphalt; Splitt Mastic Asphalt; Stone Mastic Asphalt</i> ")
T°	Température
T _{eff}	température effective
T _g	température de transition vitreuse
TSE	Tambour Sécheur Enrobeur
TSRST	<i>Thermal Stress Restrained Speciment Test</i> (test de retrait thermique empêché)

μm	micromètre
VAM	vides intergranulaires (" <i>Voids in the mineral aggregate</i> ")
VMA	<i>Voids in the Aggregate Mineral</i>
V_a	vides comblés par l'air
V_b	volume total de bitume
V_{be}	volume de bitume effectif
V_{ba}	volume de bitume absorbé
V_{GG}	volume de gros granulat
$V_{GG \text{ MÉLANGE}}$	volume du gros granulat dans la combinaison granulaire
$V_{GG \text{ SEC}}$	volume du gros granulat selon la masse pilonnée à sec
V_i	volume des vides
WSDOT	<i>Washington State Department of Transportation</i>
\bar{x}	moyenne

INTRODUCTION

Au Québec, les écarts de température entre les saisons représentent des conditions sévères pour l'enrobé qui doit être suffisamment élastique à basse température pour limiter les risques de fissuration tout en étant suffisamment cohésif à haute température pour diminuer l'orniérage.

Or malgré ces exigences, la formulation d'un enrobé se fait souvent sur la base de compromis pour l'ingénieur. De plus, la formulation des enrobés de resurfaçage est encore plus critique du fait que ces dits enrobés sont soumis à des conditions sévères de température et de circulation et sont assujettis à des contraintes avec le substrat.

Actuellement, une partie importante des interventions de réhabilitation effectuées sur l'ensemble du réseau routier canadien consiste en des actions de resurfaçage. En Ontario, au cours des dernières années, la mise en œuvre d'enrobés à matrice de pierres (SMA) en resurfaçage laisse présager des performances prometteuses car ces enrobés semblent présenter un potentiel élevé à limiter la remontée des fissures en plus d'être performant à l'orniérage. Au fil des ans, l'ensemble des réseaux routiers a été soumis à une augmentation importante du nombre de poids lourds. Cela a des effets importants à cause des augmentations significatives de la charge par essieu et de la vitesse des véhicules de sorte que le degré de sollicitation de la couche de roulement est de plus en plus intense. Les enrobés de resurfaçage doivent donc être plus résistants à l'orniérage, à la fatigue et aux basses températures et présenter un potentiel élevé à limiter la remontée des fissures.

De façon plus spécifique, ce projet de recherche vise à évaluer l'influence des composantes de l'enrobé SMA en regard des performances recherchées dans des conditions sévères et ce, en vue d'aider l'ingénieur à "formuler" de façon optimale les enrobés utilisés en resurfaçage. Le projet comporte 3 volets. Le premier s'intéresse aux aspects liés à la formulation des enrobés SMA au terme des exigences liées à son aptitude au compactage. Le second vise à mettre en relief les effets des principales

phases constituantes de l'enrobé SMA, tel que le volume de bitume effectif (V_{be}), et finalement, l'aspect de la mise en place en chantier des SMA.

Les recherches élaborées dans le cadre de l'étude de la relation entre la résistance à l'orniérage et l'aptitude au compactage nous permettront de réfléchir à une méthodologie pour la formulation de l'enrobé SMA dans le contexte de la méthode de formulation du laboratoire des chaussées du Ministère des transports du Québec. Cette méthodologie englobera aussi bien le processus de formulation, en regard à l'aptitude au compactage, que celui lié à l'évaluation des performances de l'enrobé pour des applications de resurfaçage. Dans un premier temps, une revue exhaustive de la littérature sur les thèmes de la formulation et des performances des enrobés SMA sera conduite de manière à mettre en relief les différentes approches préconisées. Le bilan sera orienté sur l'importance relative des 2 principales phases qui définissent l'enrobé SMA soit la "phase granulaire" et la "phase bitume (V_{be})". Dans un deuxième temps, un programme expérimental en 2 volets sera élaboré afin de contribuer au développement d'une méthodologie de formulation propre à l'enrobé SMA adoptée au besoin du Québec.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA DOCUMENTATION

Malgré le fait que plusieurs études et analyses aient été effectuées sur les SMA à travers le monde, il n'en demeure pas moins que les SMA restent encore au Québec une source d'enrobé très peu utilisée. De ces études ressortent plusieurs critères de conception et méthodes de formulation.

En procédant à une revue de la littérature exhaustive sur les diverses caractéristiques des SMA ainsi que sur les différentes méthodes de formulation des enrobés, il nous sera possible d'élaborer et de faire ressortir les paramètres critiques de formulation pour l'enrobé SMA de manière à prendre en compte les conditions spécifiques liées à notre secteur géographique. Nous présenterons donc successivement l'historique des SMA, les caractéristiques associées à cet enrobé, les méthodes de formulation d'enrobés et finalement les critères de design et de formulation propres aux SMA.

1.1 L'origine des SMA

Au début des années 60, suite à l'apparition d'une nouvelle technologie, les pneumatiques « cloutés », les conditions des chaussées se dégradèrent très rapidement, spécialement dans les sillons des roues des véhicules. A l'époque, cette nouvelle technologie devait s'avérer un ajout sécuritaire mais tel ne fut pas le cas puisqu'il devenait désormais très dangereux de circuler sur ces chaussées à cause de l'apparition d'ornières¹ majeures. En effet, dans le Sud de l'Allemagne, au cours de la période hivernale, on observa des ornières pouvant aller jusqu'à 10 mm de profondeur (VIATOP, site internet).

Pour essayer de pallier à cette problématique, plusieurs entrepreneurs décidèrent d'appliquer des couches de resurfacement d'enrobés standard selon les méthodes de

¹ Ornière : Déformation permanente longitudinale de la chaussée qui se crée sous le passage des roues

pose habituelles. Mais, malgré ce travail, le même phénomène fut à nouveau observable les hivers subséquents.

C'est alors qu'une méthode se démarqua des autres techniques préalablement utilisées. Ce nouveau procédé demandait simplement l'utilisation et l'épandage d'un « traitement mastic ». Il s'agissait de remplir les ornières d'un mélange asphaltique liquide extrêmement chaud dans lequel on venait insérer une proportion importante de granulats grossiers concassés de bonne qualité. Le tout était étendu puis compacté à l'aide d'un petit rouleau d'acier lisse.

Cette méthode s'avérait très efficace mais elle possédait deux inconvénients majeurs : coûts élevés de main-d'œuvre (pose manuelle), non applicable sur de grandes surfaces (processus très lent de mise en place).

1.2 Les premières proportions de référence de l'enrobé SMA

Au milieu des années 1960, partant de ces travaux et de ces résultats, le Directeur du Laboratoire Central de la Construction des Routes en Allemagne (*Zentrallaboratoriums der STRABAG BAU AG*), le Docteur Gerhard Zichner commença à se pencher sur le problème. Il chercha à mécaniser et à optimiser une telle méthode pour la rendre applicable sur de longue distance.

Le Docteur Zichner arriva à la formulation suivante : il est nécessaire d'avoir de 12 à 15 kilogrammes de mastic asphaltique liquide chaud par mètre carré de chaussée. Le tout devait être recouvert de 28 à 35 kilogrammes de matériaux granulaires concassés 5/8 mm de bonne qualité. L'ensemble serait ensuite compacté à l'aide d'un rouleau d'acier lisse. Le ratio massique mastic - pierres concassées devait se situer autour de 30 : 70. Les premiers enrobés SMA voyaient le jour : les proportions de mélange sont identifiées dans le Tableau I.

Suite à des essais sur chantier de ce type d'enrobé, on remarqua rapidement qu'il était impossible de produire et de transporter en grande quantité ce type de « bouillie »

puisque ce dernier générerait une perte de bitume par séparation (*draindown*) : le mélange était trop liquide et n'offrait pas assez de cohésion étant donné la proportion élevée de bitume et la proportion réduite en particules fines.

Tableau I

Les premières proportions des mélanges SMA

%	% de la masse	Matériaux
Pierre 70 %	± 70,0 %	Matériaux granulaires concassés 5/8 mm de bonne qualité
Mastic 30 %	± 12,0 %	Matériaux fins concassés 0,09 – 2,00 mm de bonne qualité
	± 10,5 %	Filler minéral < 0,09 mm
	± 7,5 %	Bitume B 80 (ou B 65)

(Source Viatop, 2003)

C'est donc avec une certaine déception que le Docteur Zichner retourna en laboratoire. Avec l'aide d'ingénieurs, dans le milieu de l'hydraulique, spécialisés en transport, il décida d'utiliser la fibre d'amiante pour augmenter la cohésion du mélange. L'ajout de la fibre fit en sorte de créer un mélange qui s'apparentait aux autres enrobés bitumineux en terme de facilité de transport, de mise en place et de compaction en chantier. Les proportions furent alors révisées et on ajouta jusqu'à 1% de la masse totale en fibres. Ultérieurement, le pourcentage en fibres fut à nouveau révisé et on détermina la plage suivante comme valeurs idéales : 0,5 à 0,7% de la masse totale.

1.3 Le « *MASTIMAC* »... le premier SMA

C'est ainsi que le Docteur Zichner mit au point le premier mélange de type SMA. À l'époque, le mélange ne portait pas la mention SMA mais plutôt le nom de « *MASTIMAC* ». Car ce dernier était composé en priori du mélange d'un liant asphaltique, le « *MASTIX* », et d'une composition squelettique granulaire basée sur le principe du « *MACADAM* ». C'est donc de la jonction de ses deux termes qu'est née la

« **MASTIMAC** ». La force du « MASTIMAC » est liée au fait que chaque granulat est enrobé d'un mince film de bitume lui assurant ainsi une excellente cohésion intergranulaire.

Suite à une batterie de tests standardisés et à de nombreux développements en laboratoire, le « MASTIMAC » fut testé en premier lieu sur diverses routes et voies d'accès de différentes usines de fabrication d'enrobés bitumineux de la compagnie STRABAG / DEUTAG en Allemagne. La première « apparition publique » du « MASTIMAC » eut lieu, le 30 juillet 1968, à Freiligrath-Strabe dans la ville de Wilhelmsahven, en Allemagne. Le résultat fut tellement impressionnant que plusieurs autres petits projets furent exécutés sur toutes sortes d'autres types de chaussées.

Étant donné que le « MASTIMAC » était riche en liants et en granulats, de nombreux sceptiques du milieu de la construction routière doutèrent de l'utilisation de cet enrobé dans des conditions climatiques hivernales. Mais, après avoir été soumis aux conditions hivernales, la majorité des dissidents se rangèrent du côté de cette nouvelle génération d'enrobés.

1.4 Le SMA d'aujourd'hui

Aujourd'hui, peu importe le nom qui le désigne, soit la vieille désignation allemande « **SPLITTMASTIASPHALT** » ou les nombreuses traductions : « stone-filled mastic », « grit mastic asphalt », « skeleton asphalt » ou plutôt les termes qu'on connaît davantage aujourd'hui soit ceux de « Stone Mastic Asphalt » ou « Stone Matrix Asphalt », l'enrobé SMA demeure un matériau de chaussée présentant les caractéristiques suivantes :

- a. augmentation de la stabilité et de la résistance à l'orniérage et aux déformations générées par le contact pierre sur pierre et l'utilisation de matériaux de bonne qualité (Brown et Cooley, 1999; EAPA, 1998; Kandhall, 1998; Kennepohl et Davidson, 1992);

- b. augmentation de la résistance au glissement (adhérence pneu-chaussée) causée par une texture de surface plus grossière (EAPA, 1998; Julien et coll., 1994; Kennepohl et Davidson, 1992);
- c. diminution d'éclaboussures et de bruines fines générés par le passage des véhicules sur les surfaces mouillées principalement à cause de la texture de surface et la capacité de drainage des SMA (EAPA 1998; Kennepohl et Davidson, 1992);
- d. réduction du niveau sonore de la circulation automobile dû à l'utilisation de haut taux de bitume et à la texture de surface de l'enrobé (Schmiedlin et Bischoff, 2002; EAPA, 1998; Kennepohl et Davidson, 1992);
- e. augmentation de la durabilité au désenrobage, à l'arrachement et augmentation de la durée de vie de l'enrobé principalement causée par le haut taux de bitume et les critères de qualité des matériaux (GDOT, 2002; EAPA, 1998; Kennepohl et Davidson, 1992);
- f. amélioration des performances à basse température générées par l'utilisation de haut taux de bitume et de bitume modifié (Kennepohl et Davidson, 1992);
- g. amélioration des propriétés suite au vieillissement de la chaussée principalement dues encore à l'utilisation d'un haut taux de bitume (Kennepohl et Davidson, 1992).

1.5 Les méthodes de formulation des enrobés bitumineux

Dans la perspective de bien cerner les différences majeures associées à la formation de l'enrobé SMA et à celle des enrobés plus conventionnels, nous proposons de présenter sommairement en revue les différentes approches de formulation des enrobés qui ont vu le jour depuis l'application de matériaux bitumineux dans le domaine routier.

Cinq principales méthodes sont utilisées pour déterminer les proportions des constituants des enrobés bitumineux et ayant servi de base à la formulation des enrobés SMA, soit : la méthode HVEEM, la méthode Marshall, la méthode Superpave, la méthode Française et la méthode du Ministère des transports du Québec. Pour

chaque méthode nous présenterons un bref historique, une description sommaire et les principales caractéristiques pour finalement apporter une appréciation quant aux avantages et désavantages de chacune d'elle.

1.5.1 La méthode HVEEM

La méthode HVEEM (décrite en détails à l'Annexe 1), développée dans le début des années 20 (Roberts et coll., 1996) propose de déterminer le taux de liant de l'enrobé, en considérant la surface spécifique de la masse granulaire et de valider la stabilité de l'enrobé en regard à la déformation induite par la circulation à l'aide du « stabilomètre HVEEM ». L'évaluation de la performance de l'enrobé est complétée par une évaluation de la susceptibilité au gonflement à l'eau. Dès lors, l'accent est mis sur l'importance de la surface spécifique des particules du squelette granulaire (α) quant à l'épaisseur du film de bitume qui s'avère effectif pour bien coller ensemble les particules et assurer ainsi une stabilité (sous charge) et une durabilité (stabilité en présence d'eau) de l'enrobé bitumineux.

En définitive, le principe de la méthode HVEEM repose sur la compression confinée d'une éprouvette non rationnelle, c'est-à-dire que la dimension de l'éprouvette est variable d'un essai à l'autre (Fortin, 1996). Les critères de base évalués sur échantillons compactés sont essentiellement la stabilité, la cohésion et le gonflement. La stabilité de l'enrobé est testée à l'aide du « stabilomètre » HVEEM (procédé ASTM D1560) en évaluant, dans une sorte de cellule triaxiale (voir Annexe 2), les déformations horizontales sous une charge axiale induite dans l'axe de compactage (Woods et coll., 1960). La méthode consiste principalement à optimiser la teneur en bitume d'un enrobé en se basant principalement sur la surface spécifique du combiné granulaire et de sa densité apparente (Fortin, 1996; Wallace et Martin, 1967). L'enrobé sélectionné sera celui offrant le plus haut taux de liant sans toutefois engendrer une perte au niveau de la stabilité.

1.5.2 La méthode Marshall

La méthode Marshall (décrite en détails à l'Annexe 3), élaborée à la fin des années 30 (Roberts et coll., 1996), visait le design des enrobés d'aérogare. Depuis son apparition jusqu'à aujourd'hui, ces critères de design ont constamment évolué et ont su s'adapter à l'augmentation des charges de circulation et des pressions pneumatiques d'aujourd'hui. Actuellement, cette méthode demeure toujours très répandue en Amérique du Nord (Roberts et coll., 1996).

La méthode Marshall utilise comme principe de base l'écrasement diamétral d'une éprouvette placée entre deux mâchoires cylindriques. Les exigences de base essentiellement recherchées sont : la stabilité, la déformation (fluage) ainsi que le volume des vides.

Tout comme la méthode de formulation HVEEM, les premières étapes de formulation consistent à sélectionner et à évaluer les granulats selon les critères recherchés et à déterminer un taux de liant approximatif en fonction de la localité géographique et du type d'enrobé sélectionné (Roberts et coll., 1996). Il est important de déterminer le fuseau granulométrique et de s'assurer qu'il réponde bien à la plage de granulométrie fixée selon les normes. Finalement, il faut établir la surface spécifique de la masse granulaire associée au fuseau ciblé, le taux d'absorption ainsi que la densité apparente (Roberts et coll. 1996; Fortin, 1996). Le noyau de la méthode consiste à déterminer la teneur optimale en bitume en se référant à l'évolution des caractéristiques des enrobés confectionnés (densité, stabilité, volume des vides) pour différents dosages en bitume. Les principales analyses de données consistent à illustrer sur un diagramme la teneur en bitume en fonction de (Roberts et coll., 1996) la densité, de la stabilité, du pourcentage de vide du mélange, de la masse volumique, du fluage et du pourcentage de vides intergranulaires. La teneur en liant optimale est sélectionnée suite à l'analyse des différentes relations établies et correspondantes à la moyenne arithmétique des teneurs en bitume obtenues selon la stabilité maximale, la masse volumique maximale ainsi que le pourcentage de vide visé (Fortier, 1996). De plus, la valeur optimale obtenue doit être validée quant aux exigences relatives à l'indice de fluage et le

pourcentage des vides du squelette granulaire (V.M.A. : voids in the mineral aggregate ou V.A.M. : vides intergranulaires)).

Cette méthode de formulation est simple, rapide et relativement complète compte tenu des vides, de la stabilité et de la durabilité de l'enrobé. Le point critique de cette méthode demeure sans équivoque la méthode de fabrication des éprouvettes (compaction par impact), laquelle est non représentative des conditions de chantier (Robert et coll., 2002).

Finalement, il faut noter que cette méthode de formulation ne tient pas compte de la résistance au cisaillement de l'enrobé associée à l'orniérage.

1.5.3 La méthode Superpave

Au début des années quatre vingt, le besoin se faisait sentir pour mettre au point une nouvelle méthode de formulation qui pouvait de façon rationnelle répondre aux nouvelles charges et volumes de circulation ainsi qu'aux conditions environnementales et climatiques. Le but premier de cette nouvelle méthode était de pouvoir prédire le comportement des enrobés à l'orniérage, à la fissuration thermique ainsi qu'à la fissuration par fatigue. C'est en 1993 (Roberts et coll., 1996) que le Strategic Highway Research Program (SHRP) a présenté cette nouvelle méthode de formulation, la méthode Superpave : *SUPERior PERforming asphalt PAVement* (Asphalt Institute, 1995) system. Cette méthode (décrite en détails à l'Annexe 4) apporte principalement deux nouvelles notions, soit : 1) la compaction en laboratoire des éprouvettes réalisée par la presse à cisaillement giratoire (PCG) et 2) les méthodes d'évaluation de performance des enrobés.

La presse à cisaillement giratoire est un outil de laboratoire développé pour évaluer l'aptitude au compactage des enrobés. Elle permet par simulation du pétrissage d'évaluer la compacité d'un mélange hydrocarboné destiné à une épaisseur connue (Moutier, 1991). Cette compacité est obtenue, comparativement à l'essai Marshall qui est généré par impact, suivant une action de pétrissage. Ce procédé introduit du

cisaillement intergranulaire et permet donc de simuler l'aptitude au compactage observé en chantier. La PCG permet de suivre l'évolution de la compacité de l'enrobé en cours d'essai, c'est à dire en fonction du nombre de giration : à chaque giration, l'enrobé se densifie et le volume de vides dans l'enrobé diminue. La Figure 1 illustre le procédé physique et mécanique de l'essai.

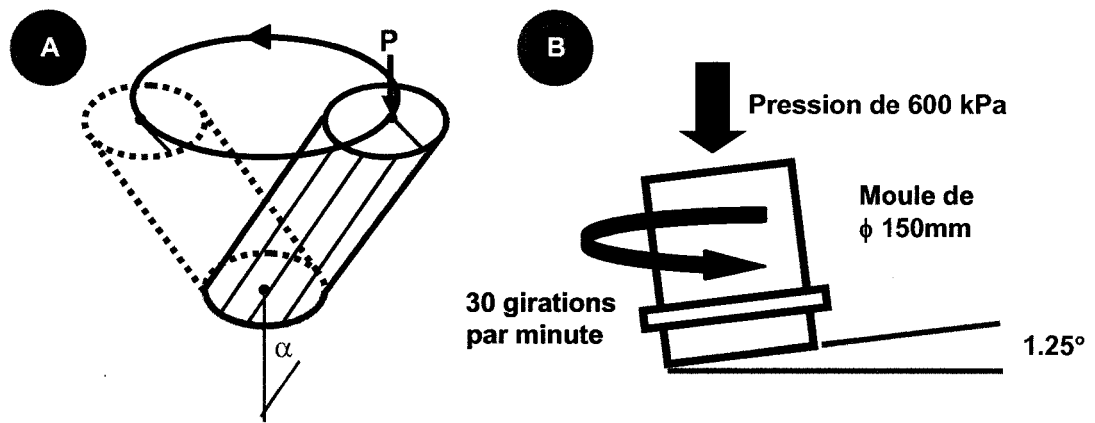


Figure 1 Illustrations du procédé physique (A) et mécanique (B) de la PCG

À cet effet, l'essai à la PCG va permettre d'évaluer l'aptitude au compactage, laquelle sera quantifiée à partir de certains degrés d'énergie de compaction associés à un nombre de girations. Notons particulièrement que le nombre de girations, se rapportant à la compacité recherchée en chantier, sera désigné N_{design} .

Suivant ces notions, la méthode Superpave se découpe en trois niveaux de design selon le niveau de circulation à laquelle la chaussée sera soumise. Les trois niveaux ainsi que les caractéristiques de chacun sont identifiés dans le Tableau II.

La procédure générale de niveau 1 (Asphalt Institute, 1995) comporte quatre étapes bien distinctes : la sélection des matériaux, la sélection du squelette granulaire optimum, la sélection du pourcentage de bitume et l'évaluation de la tenue à l'eau de l'enrobé. La sélection du type de bitume est faite en fonction de la température ambiante moyenne du site, de la température de la chaussée et, finalement, de la

vitesse et de la charge autorisée sur la chaussée. Les granulats sont pour leur part sélectionnés en fonction de trois grandes catégories liées : a) aux caractéristiques de formes et d'impuretés, b) aux caractéristiques intrinsèques et c) à la distribution granulaire recherchée. Trois combinaisons granulaires conformes aux fuseaux établis (Tableau 4.1 Annexe 4), sont alors évaluées sur des enrobés et testées à la PCG (AASHTO TP4) en vue de déterminer le squelette granulaire optimal. Une teneur en bitume initiale pour chacun de ces enrobés est établie suivant la grosseur nominale maximale du squelette granulaire de l'enrobé (S_n).

Tableau II

Méthode Superpave - Caractéristiques de chaque niveau

Niveau de design	Niveau de circulation ÉCAS ¹	Éléments requis
1	ÉCAS < 10 ⁶	<ul style="list-style-type: none"> • Sélection des matériaux; et • Établissement des proportions volumétriques
2	10 ⁶ < ÉCAS < 10 ⁷	<ul style="list-style-type: none"> • Niveau 1; et • Tests de prédiction de performance
3 (très sévère)	ÉCAS > 10 ⁷	<ul style="list-style-type: none"> • Niveau 1; et • Tests de prédiction de performance avancés

Note 1 : ÉCAS : Équivalent de charge axiale simple

(Source Asphalt Institute, 1995)

Suite à la sélection du combiné granulaire optimale, la teneur optimale en bitume est établie en évaluant les performances de l'enrobé pour 4 teneurs en bitume variant autour de la valeur initiale ($\pm 0,5\%$ et $\pm 1,0\%$). Les performances cibles sont définies à partir de l'essai à la PCG (pourcentage de vides) et suivant les proportions volumétriques des constituants. Ces performances cibles varient en fonction du niveau de circulation à laquelle la chaussée sera soumise. La teneur en bitume sélectionnée sera alors celle qui génère un pourcentage de vides égal à 4% au nombre de girations de design tout en respectant les autres critères tel que la déformation permanente, la fissuration par fatigue et la fissuration thermique à basse température (Annexe 4).

À partir de la formulation retenue (squelette granulaire et dosage en bitume optimaux), on évalue la tenue à l'eau de l'enrobé sélectionné. Dans le cas des enrobés soumis à des charges de circulation importantes et/ou à un important taux de circulation stationnaire, la méthode Superpave exige également de sélectionner un bitume de grade supérieure qui assure une meilleure performance en fatigue (c'est le bitume qui se fatigue dans l'enrobé) et de valider sa performance par des essais à la fatigue et à la fissuration thermique.

La méthode Superpave est relativement lourde de mise en œuvre mais elle est nettement plus complète en prenant en considération les conditions environnementales locales (température; ÉCAS) (Kuennen, 2004) en plus d'intégrer des critères de conception quant à la performance de l'enrobé vis-à-vis ses résistances à la fatigue et à la basse température.

1.5.4 La méthode Française

La méthodologie Française de formulation des enrobés exige, depuis les années 70, l'usage exclusif de granulats concassés. Dans cette méthode de formulation (voir détail à l'Annexe 5) qui introduit le concept de l'utilisation des classes granulaires, la teneur en liant est également établie en fonction des caractéristiques de la masse granulaire (masse volumique, surface spécifique et GNM) pondérée suivant un module de richesse (M_{richesse}). Cette valeur est en soi proportionnelle à une épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant les granulats (Di Benedetto et coll., 2004).

La procédure de formulation Française établit une notion importante qui se démarque de toutes les autres méthodes de formulation par l'introduction d'un essai de simulation en laboratoire, l'essai à l'orniéreur. Également, la méthode Française optimise la formulation de l'enrobé en laboratoire sur la base d'un essai simulant l'aptitude au compactage de l'enrobé, par l'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG). Des exigences à l'orniérage et à la PCG sont alors introduites dans le processus de formulation de l'enrobé.

La formulation Française constitue une méthodologie de travail efficace et basée sur plusieurs essais, qui représentent assez fidèlement le comportement en chantier et l'usure générée par la circulation. Par contre, il s'agit d'un procédé d'envergure qui nécessite des équipements très dispendieux. De plus, les caractéristiques de fonctionnement de ces appareils sont propres aux équipements français et nécessitent certains ajustements et certaines modifications afin d'être compatibles aux équipements utilisés dans les autres procédés de formulation, principalement en Amérique du Nord.

Il est toutefois important de noter que la nouvelle génération de presse à cisaillement giratoire, la PCG III, possède des critères de fonctionnement variables tant au niveau de l'angle de giration, de la vitesse de rotation que de la pression. Ces critères la rendront compatible aux autres pays notamment en Amérique du Nord.

1.5.5 La méthode LC

En 1991, suite à la nouvelle méthode de formulation Française, le Ministère des transports du Québec entreprend des recherches pour mettre au point sa propre méthode de formulation. Mais, la venue, en 1993, de la méthode de formulation Superpave, laquelle était utilisée par toutes les provinces et états adjacents au Québec, a forcé les experts du laboratoire des Chaussées du MTQ à mettre au point une méthodologie de travail qui s'apparente à la méthode Superpave. Les experts du MTQ ont d'abord mis en relief certaines lacunes de la méthodologie Superpave. Dans un premier temps, ils constatent que la méthode peut donner lieu à la formulation d'enrobés à faible teneur en bitume, engendrant des performances relativement faibles. Par ailleurs, des enrobés à teneur en bitume trop élevée peuvent être générés, pouvant présenter des risques élevés d'orniérage. C'est donc suite à ces observations que les responsables du laboratoire LC du MTQ conviennent d'imposer des teneurs en bitume optimales en fixant le volume de bitume effectif de l'enrobé (V_{be}) : Le premier enrobé issu de la formulation LC du MTQ voit le jour en 1993, l'enrobé EG-12,5 (voir détail à l'Annexe 6).

La procédure de formulation LC est, tout comme l'approche Française, une méthode de formulation à deux niveaux combinant l'optimisation de l'aptitude au compactage de l'enrobé évaluée à la presse à cisaillement giratoire à celle de sa résistance à l'orniérage. Par contre, elle fixe, sur des considérations volumétriques, la valeur du volume de bitume effectif requis pour un enrobé donné : V_{be} (%).

La méthode de formulation LC fixe un V_{be} et prend en compte l'aptitude au compactage et la résistance à l'orniérage. Par contre, la formulation LC possède comme principal désavantage celui de fonder la sélection de son N_{design} de façon aléatoire et empirique et uniquement basé sur l'expérience acquise antérieurement.

1.6 La méthode de formulation des enrobés SMA selon le N.C.A.T.

Après avoir décrit sommairement les principales méthodes de formulation des enrobés bitumineux, il est maintenant important de se concentrer sur l'adaptation et les modifications apportées à ces méthodes pour être en mesure de formuler des enrobés SMA. Cette section traite donc de la formulation des SMA selon la méthode américaine développée par le National Center for Asphalt Technology (N.C.A.T.).

Il apparaît intéressant à ce stade-ci de rappeler la notion des volumes absolus que l'on utilise couramment comme base de réflexion quant à la formulation des enrobés bitumineux. La Figure 2 illustre schématiquement cette notion ainsi que les différents volumes occupés par les constituants du mélange.

La méthode de formulation des enrobés SMA selon le N.C.A.T. est le fruit de plusieurs organismes. Elle fut commanditée par l'Americain Association of State Highway and Transportation Officials en collaboration avec le Federal Highway Administration sous la supervision du National Cooperative Highway Research Program qui elle-même est administrée par le Transportation Research Board of the National Research Council. Elle est donc le résultat de nombreuses analyses et études faites par plusieurs chercheurs.

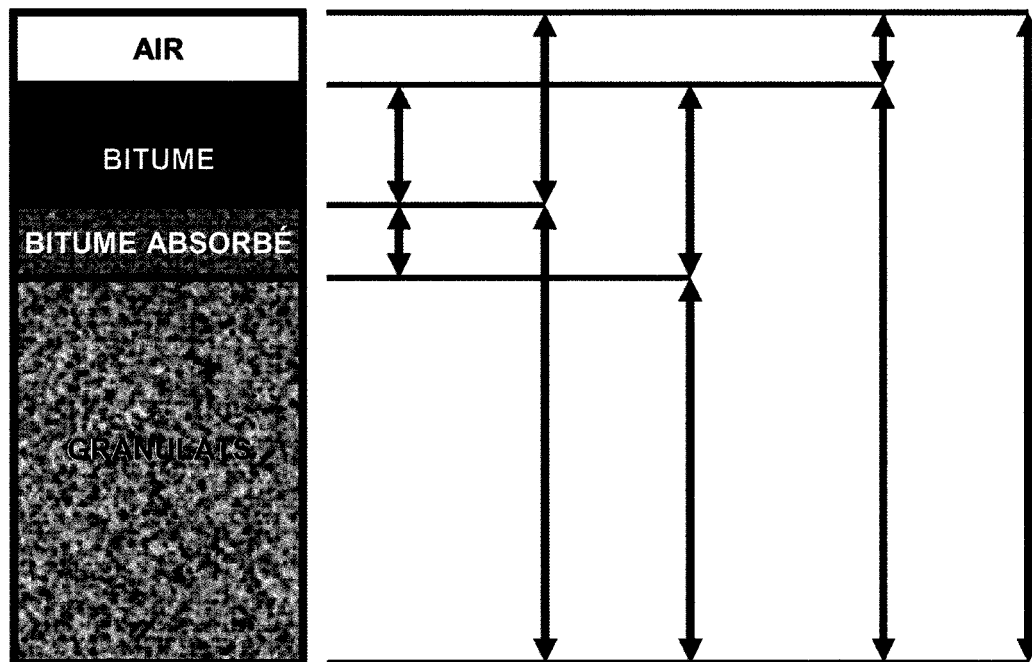


Figure 2 Représentation schématique de la composition volumétrique des enrobés bitumineux

La formulation des enrobés SMA selon le N.C.A.T. se résume en 5 points : a) la sélection des matériaux, b) la sélection du fuseau granulaire optimum, c) la sélection du taux de liant optimum, d) l'évaluation de l'enrobé à la tenue à l'eau et au ressuage et e) les propriétés des enrobés SMA.

1.6.1 La sélection des matériaux pour les enrobés SMA

La sélection des matériaux pour la formulation d'un enrobé SMA est une étape importante. Elle vise la sélection du liant bitumineux, des granulats, du filler ainsi que d'un agent stabilisant. Chaque matériau sélectionné doit répondre à des critères spécifiques pré-établis et définis selon les conditions climatiques et le niveau de circulation prévu.

Le liant doit satisfaire aux critères de performance spécifiés dans la norme MP1 et la norme MP2. Les granulats grossiers et fins devront obligatoirement être des granulats à 100% concassés et répondre aux critères de performance présentés dans les Tableaux III et IV respectivement.

Tableau III

Critères de performance des gros granulats pour la confection d'un enrobé SMA selon le N.C.A.T.

Test	Méthode	Spectre Minimum	Spectre Maximum
Test d'abrasion Los Angeles (% de perte)	AASHTO T96	-	(1)
Particules plates et allongées (%) 3 à 1 5 à 1	ASTM D4791 Section 8.4	- -	20 5
Absorption (%)	AASHTO T85	-	2
Solidité des agrégats (5 cycles) Sulfate de sodium (%) Sulfate de magnésium (%)	AASHTO T104	- -	15 20
Contenu de granulat concassé Une face (%) Deux faces (%)	ASTM	100 90	- -

Note 1 Des agrégats possédant une valeur, au test d'abrasion Los Angeles, de 50 ont été utilisés avec succès dans la production d'enrobé SMA. Par contre, lorsque la valeur obtenue excède plus ou moins 30, les particules peuvent être soumises à un haut taux de fissuration et de fragmentation durant le processus de mise en place et de compaction.

(Source Brown et coll., 1998)

En ce qui concerne le filler, le NCAT recommande l'utilisation d'un filler d'appoint composé de matières minérales finement constituées telles des particules fines de granulats concassés, de chaux ou de cendres volantes. L'ajout de ces particules doit être fait à l'état sec pour permettre un mélange homogène et ainsi éviter l'accumulation d'agglomération dans les enrobés.

Quel que soit le filler utilisé, il doit être exempt de toute trace d'impureté organique et posséder un indice de limite de plasticité égal ou inférieur à 4. De plus, les fillers possédant un indice des vides supérieur à 50% à l'essai « Rigden Voids » (Essai AFNOR P18 – Section granulats : *Détermination de l'indice des vides Rigden*, 1990) ne devraient en aucun cas être utilisés dans la confection des enrobés SMA : les

expériences ont montré que les fillers ayant un excédant de 50% de vides tendent à rendre l'enrobé plus consistant et moins malléable à la pose.

Tableau IV

Critères de performance des granulats fins pour la confection d'un enrobé SMA selon le N.C.A.T.

Test	Méthode	Spectre Minimum	Spectre Maximum
Solidité des agrégats (5 cycles) Sulfate de sodium (%) Sulfate de magnésium (%)	AASHTO T104	- -	15 20
Vides non compactés	AASHTO TP33 Method A	45	-
Limite de liquidité (%)	AASHTO T89	-	25
Limite de plasticité (%)	AASHTO T90	non-plastique	non-plastique

(Source Brown et coll., 1998)

Finalement, l'utilisation d'un agent stabilisant est recommandé par le N.C.A.T. pour enrayer le saignement de l'enrobé. Les fibres de cellulose (0,30 %²), des fibres minérales (0,40 %²) ou des fibres polymères. Les fibres polymères devront être incluses dans le mélange selon un dosage nécessaire pour rencontrer les exigences du grade PG du bitume. Les caractéristiques physiques des fibres de cellulose et les fibres minérales sont données aux Annexes 7 et 8 respectivement.

1.6.2 La sélection du fuseau granulaire optimum pour la confection des enrobés SMA

Le choix du fuseau granulaire est fondé sur le type de la chaussée à réaliser. Le N.C.A.T. a établi, suivant le GNM³, des fuseaux granulaires à respecter. Le Tableau V présente les différentes exigences quant à la granulométrie des granulats requise pour la confection d'un enrobé SMA suivant les recommandations du N.C.A.T.

² % massique en référence à la masse totale de l'enrobé.

³ Le GNM correspond au NMAS qui correspond au tamis de degré supérieur au premier tamis qui retient plus de 10%.

Tableau V

Critères de qualité pour les granulats servant à la formulation des enrobés SMA en fonction de la grosseur nominale maximale du granulat : le NMAS

		Fraction passante (% volumique)									
		GNM de 25 mm		GNM de 19 mm		GNM de 12,5 mm		GNM de 9,5 mm		GNM de 4,75 mm	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Tamis (mm)	37,5	100	100								
	25,0	90	100	100	100						
	19,0	30	86	90	100	100	100				
	12,5	26	63	50	74	90	100	100	100		
	9,5	24	52	25	60	26	78	90	100	100	100
	4,75	20	28	20	28	20	28	26	60	90	100
	2,36	16	24	16	24	16	24	20	28	28	65
	1,18	13	21	13	21	13	21	13	21	22	36
	0,60	12	18	12	18	12	18	12	18	18	28
	0,30	12	15	12	15	12	15	12	15	15	22
0,075	8	10	8	10	8	10	8	10	12	15	

(Source Brown et coll., 1998)

La sélection de la combinaison granulaire optimale des SMA est basée sur une méthode volumétrique. Dans un premier temps, trois combinaisons granulaires sont initialement évaluées en fonction du GNM. En général, on sélectionne le fuseau maximum et minimum permis ainsi que le fuseau médian. La sélection de la granulométrie optimale s'effectue en fonction de celle qui assure un minimum de vides inter granulaires (VAM) et par conséquent un contact pierre sur pierre adéquat. À certaines occasions, le VAM peut s'avérer inatteignable indépendamment de la combinaison granulaire sélectionnée. Ce problème est généralement relié à un trop fort niveau de rupture des granulats lors de la compaction en laboratoire. Advenant une telle situation, les granulats sélectionnés sont alors rejetés.

Par contre, l'optimisation du contact pierre-sur-pierre demeure le critère de performance demandant le plus d'attention lors de la sélection du fuseau granulaire. Pour cette raison, selon la grosseur nominale maximale du gros granulat, un tamis de contrôle de la fraction grossière sera déterminé. En fait, le N.C.A.T. propose de vérifier que le volume des vides du gros granulat, défini suivant le tamis de contrôle dans le combiné granulaire, demeure inférieur au volume des vides obtenu lorsque le gros granulat est seul et ce, de manière à assurer le contact pierre-sur-pierre dans l'enrobé. Sans quoi, l'insertion des autres particules dans le combiné granulaire a pour incidence de desserrer les particules grossières.

Le pourcentage de vide dans le gros granulat est donc établi de la façon suivante, en concordance avec la norme AASHTO T19 :

$$\% \text{ de vides dans le gros granulat (sec)} = \frac{(D_{gb}^{GROS} * \gamma_{eau}) - \gamma_s^{GROS}}{D_{gb}^{GROS} * \gamma_{eau}} * 100$$

ou

D_{gb}^{GROS}	=	densité brute du granulat grossier (norme AASHTO T85);
γ_s^{GROS}	=	masse volumique sèche du gros granulat dans le test de densité sèche (kg/m^3) (norme AASHTO T19); et
γ_{eau}	=	masse volumique de l'eau (998 kg/m^3).

Par la suite, à l'aide des éprouvettes compactées, on détermine la densité brute de l'enrobé. La portion non compactée de l'échantillon sert de son côté à déterminer la densité maximale. À l'aide de ses deux densités, le pourcentage des vides d'air, les vides intergranulaires (VAM) ainsi que le pourcentage de vides du mélange sont déterminés selon les équations suivantes (le développement est présenté à l'annexe 9):

$$VAM (\%) = 100 - \left(\frac{D_{mb}}{D_{gb}} * P_s \right)$$

$$V_a = 100 * \left(1 - \frac{D_{mb}}{D_{mm}} \right)$$

$$\% \text{ de vides du mélange} = 100 - \left(\frac{D_{mb}}{D_{gb}^{GROS}} * P_{gg} \right)$$

ou

P_s	=	pourcentage de granulat dans l'enrobé;
P_{gg}	=	pourcentage de gros granulat dans l'enrobé;
D_{mb}	=	densité brute de l'enrobé compacté;
D_{mm}	=	densité maximale de l'enrobé (densité RICE);
$D_{gb}^{COMBINÉ}$	=	densité brute du combiné granulaire;
D_{gb}^{GROS}	=	densité brute du granulat grossier;
V_a	=	vides comblés par l'air.

Selon les résultats obtenus pour chacun de ces trois enrobés, chacun étant constitué d'une des trois combinaisons granulaires sélectionnées, la combinaison possédant le pourcentage de gros granulats le moins élevé tout en répondant au minimum de VAM spécifié et dont la $V_{GG \text{ MÉLANGE}}$ est inférieur à la valeur obtenue suite au calcul du $V_{GG \text{ SEC}}$, est la combinaison sélectionnée et devient donc la granulométrie optimale. Par contre, certaines observations démontrent que la valeur du VAM, du mélange granulaire, devrait être supérieure à 17% (idéalement entre 17,5 et 18,0 %) pour contrer la réduction du VAM générée par la production de l'enrobé en usine.

1.6.3 La sélection du taux de liant optimum

La méthode de formulation du N.C.A.T. est une méthode volumétrique. C'est-à-dire qu'elle fixe le rapport du volume de bitume en fonction du volume de granulat dans l'enrobé. Le N.C.A.T. a établi qu'un dosage massique en bitume de 6% est requis pour un granulat de densité de 2,75. Dans le cas où la densité des granulats change, la proportion en bitume est corrigée de manière à conserver le rapport volumique entre les deux constituants. Le Tableau VI donne la correspondance entre la teneur en bitume minimale recommandée en fonction de la densité du granulat utilisé.

Tableau VI

Taux de liant minimum requis en fonction de la densité brute des granulats

Densité brute du combiné granulométrique	Taux de liant (%) minimum basé sur la masse d'enrobé
2,40	6,8
2,45	6,7
2,50	6,6
2,55	6,5
2,60	6,3
2,65	6,2
2,70	6,1
2,75	6,0
2,80	5,9
2,85	5,8
2,90	5,7
2,95	5,6
3,00	5,5

(Source Brown et coll. 1998)

Suite à l'obtention du fuseau granulométrique optimum, certaines modifications au taux de liant peuvent s'avérer nécessaires afin d'obtenir le pourcentage de vides optimum lequel doit être compris entre 3 et 4 % et ce tout en conservant un VAM minimum de 17%. Advenant de telles modifications, la confection de nouveaux enrobés est nécessaire. Quatre éprouvettes par taux de liant devront être confectionnées. Trois de ces éprouvettes seront analysées pour la compaction et le 4^{ième} servira à déterminer la densité maximale (D_{mm}) de l'enrobé. Les propriétés propres à chaque enrobé devront à nouveau être déterminées et la sélection du taux de liant optimum s'effectuera en fonction de celui qui répond le mieux aux critères tout en fournissant un pourcentage de vides adéquat.

1.6.4 L'évaluation de l'enrobé à la tenue à l'eau et au ressuage

Avant d'autoriser la production en masse de ce nouvel enrobé, deux essais sont essentiels : 1) la tenue à l'eau (AASHTO T283) et 2) le niveau de ressuage. Les éprouvettes nécessaires à l'essai de tenue à l'eau devront être identiques à celles utilisées pour évaluer le taux de liant optimum tout en conservant un pourcentage de vide de $6,0\% \pm 1,0\%$. Le niveau de performance à la tenue à l'eau a été fixé à 70% minimum.

L'évaluation de la sensibilité au ressuage de l'enrobé est effectuée selon une procédure établie par le N.C.A.T : « *Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Bituminous Mixtures* » disponible à l'Annexe 10. Le ressuage doit être inférieur à 0,30% à la température de malaxage.

1.6.5 Les propriétés de l'enrobé SMA

Le mélange composé du liant, des agents stabilisants ainsi que des particules passant le tamis 0,075 mm (ces trois composantes constituent le mortier) des enrobés SMA devra posséder les caractéristiques du Tableau VII.

Tableau VII

Propriétés des mortiers des enrobés SMA

Test	Méthode	Propriétés	Spécifications
Mortier original cisaillement dynamique	AASHTO TP 5	$G^* / \sin \delta$	> 5,0 kPa
Étuvage accéléré en couche mince du mortier (RTFO) cisaillement dynamique	AASHTO TP 5	$G^* / \sin \delta$	> 11,0 kPa
Vieillessement sous pression du mortier(PAV) flexion de poutre	AASHTO TP 1	S	< 1500 MPa

(Source Brown et coll. 1998)

D'autre part, les enrobés SMA doivent satisfaire les exigences à la PCG telles qu'identifiées au Tableau VIII. Les valeurs de référence pour l'essai à la presse Marshall sont identifiées à l'Annexe 11. Lorsque les granulats possèdent une valeur supérieure à 30% à l'essai d'abrasion Los Angeles ou lorsque le niveau d'ÉCAS servant de design pour la chaussée est inférieur à 1 million, le nombre de girations de contrôle à la PCG doit être alors fixé à 70 et les mêmes exigences du Tableau VIII doivent s'appliquer.

Également, la tenue à l'eau, testée selon la norme AASHTO T283, des SMA devrait être au minimum 70% pour un pourcentage de vides équivalent à $6,0\% \pm 1$. La PCG peut être utilisée afin de compacter les éprouvettes pour ces essais, tout en respectant les dimensions requises, soit : 150 mm de diamètre et 95 mm de hauteur.

Tableau VIII

Spécifications des enrobés SMA formulés à l'aide de la PCG à 100 girations

Propriétés	Exigences
Pourcentage de vides (%)	4,0 ¹
VAM (%)	17 min
V _{GG MÉLANGE} (%)	Inférieur au V _{GG SEC}
Tenue à l'eau (%)	70 min
Saignement à la température de production (%)	0,30 max

Note 1 : Pour des chaussées à faible circulation et/ou dans des régions froides, le pourcentage de vides peut être sous les 4,0% mais jamais inférieur à 3,0%

(Source Brown et coll. 1998)

1.7 Les caractéristiques des SMA

Ce chapitre présente les principales caractéristiques des enrobés SMA. Tant les aspects mécaniques que les aspects sécuritaires et de rendements seront abordés.

1.7.1 La durée de vie

Selon diverses études (Watson, 2003; Brown, 2002; GDOT, 2002) sur des enrobés SMA posés en couche de roulement et suivant les conclusions des expériences européennes (AASHTO, 1991), la durée de vie des enrobés SMA serait supérieure de 25% à celle des enrobés conventionnels. De plus, les SMA présentent une dégradation moins rapide et les seuils critiques sont atteints plus lentement que les enrobés Superpave ou de haut rendement.

1.7.2 Les coûts de production

On estime que les coûts de production sont de 20 à 40 % (Brown, 2002; GDOT, 2002; AASHTO, 1991) supérieurs aux coûts de production des enrobés standards. Par contre, le gain en regard des coûts d'entretien et de la durée de vie compense largement pour le coût de production.

1.7.3 La résistance à l'orniérage

Plusieurs études et analyses en chantier, montrent que la performance des enrobés SMA à l'orniérage est excellente et supérieure aux enrobés conventionnels (Brown et coll., 1997; Prowell et coll., 2002; JTG Richardson, 1999; Cooley et Brown, 2003). À cet effet, la Figure 1 présente la synthèse de l'évolution de la performance à l'orniérage d'enrobés SMA évaluée sur plus de 100 projets routiers aux Etats-Unis.

La majorité de ces projets, d'une moyenne d'âge de 3 ans, au moment de l'étude, étaient associés à des projets de resurfaçage sur d'anciens enrobés bitumineux. La Figure 3 montre que pour plus de 90 % des projets, les enrobés SMA ont offert un rendement excellent face à l'orniérage (ornières ≤ 4 mm après 3 ans). Rappelons que le MTQ exige actuellement, dans le cas de contrat de performance, des ornières inférieures à 5 mm en fin de construction pour des tronçon de route et limite la profondeur d'ornières à 6 mm pour la durée de la garantie de performance, usuellement de 5 ans (MTQ, 2000).

Par ailleurs, des essais de simulation en laboratoire pour estimer la performance à l'orniérage des enrobés SMA ont été conduits à partir de l'appareil « Asphalt Pavement Analyzer (APA) ». Une description sommaire de l'appareil et de la procédure est disponible à l'Annexe 12. Il est à noter que pour cet essai, on estime que 8000 cycles équivalent approximativement à 3 000 000 ÉCAS.

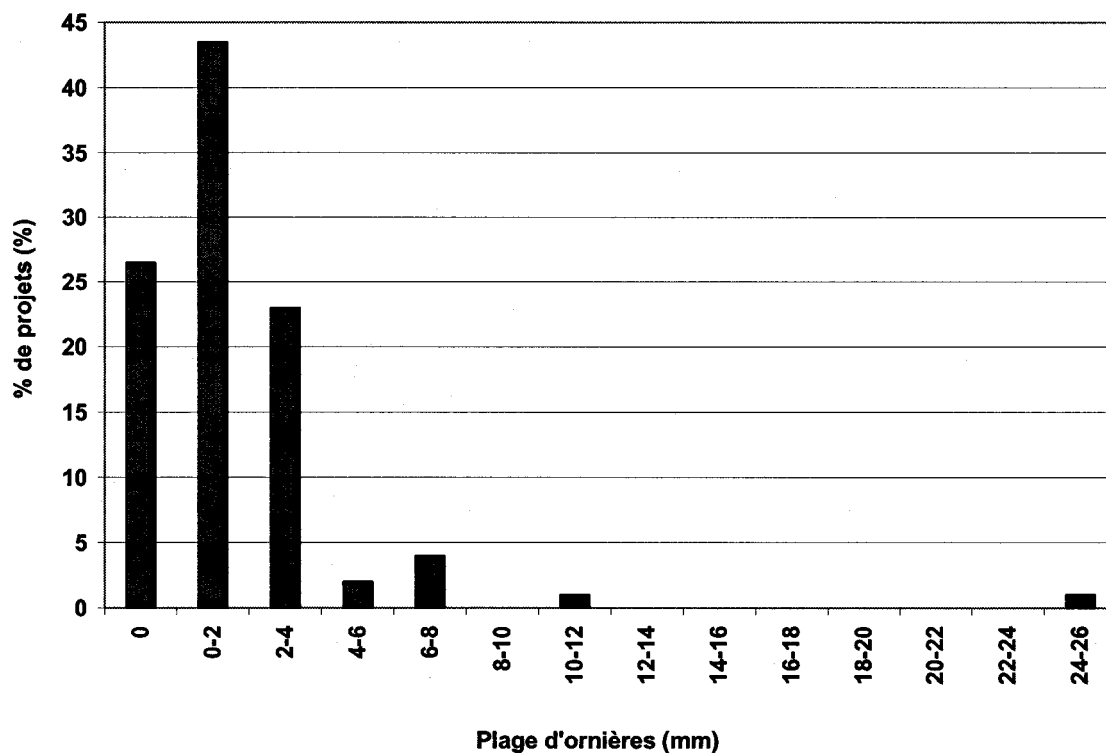


Figure 3 Plage de profondeurs d'ornières mesurées sur différents projets routiers aux États-Unis (Adapté de Brown et coll., 1997).

Le Tableau IX présente la synthèse des résultats à l'essai APA de différents mélanges SMA constitués à partir de différentes granulométries. Les essais ont été effectués sous une charge cyclique axiale de 445 Newtons (conduite pressurisée à 690 kPa) à différentes températures (50 et 64°C). La température de 50°C a été sélectionnée pour fin de comparaison avec le critère de performance établi à 5 mm par le Georgia Department Of Transportation (GDOT) pour les enrobés de haute performance. La température de 64°C correspond à la température haute du grade de bitume utilisé soit, un PG 64-22.

Selon une étude du N.C.A.T., la profondeur d'ornièrre mesurée à l'APA à 8000 cycles pour des enrobés conventionnels, doit être inférieure à 8 mm (Brown et coll., 2001). En ce qui concerne la performance à l'essai à l'ornièrre français LCPC, étant donné que les conditions d'essais diffèrent de l'APA, la corrélation des données peut se faire si la mesure de la profondeur d'ornièrre à l'essai à l'ornièrre LCPC est effectuée après 30 000 cycles. À ce moment l'ornièrre mesurée se doit d'être inférieure à 10 mm.

Les résultats présentés au Tableau X montrent en définitive que tout les enrobés SMA répondent haut la main à ce critère de performance avec une valeur moyenne pour toutes les combinaisons granulométriques confondues de 3,01 mm à 50°C et de 4,40 mm à 64°C.

Tableau IX

Résultats à l'essai APA de différents enrobés SMA

Type de mélange	Moyenne d'ornièrre à 50 °C (mm) après 8 000 cycles	Moyenne d'ornièrre à 64 °C (mm) après 8 000 cycles
4,75 / 2,36 ¹	4,2	5,3
4,75 / 1,18	2,7	5,4
9,5 / 4,75	2,8	4,4
9,5 / 2,36	3,5	5,4
12,5 / 9,5	3,7	4,5
12,5 / 4,75	4,1	5,4
19 / 4,75	1,7	2,6
19 / 4,75	1,4	2,2
Moyenne	3,0	4,4

Note 1 Particules passant le tamis de 4,75 mm et retenues au tamis 2,36 mm

(Source Cooley et Brown 2003)

1.7.4 L'essai TSRST

Afin d'évaluer la performance à basse température des enrobés SMA, des essais en retrait thermique empêché (TSRST) ont été effectués. Ce type d'essai fut réalisé dans

le cadre d'une étude sur les propriétés mécaniques des SMA (Partl et coll., 1995). Deux types de SMA, les enrobés SMA 11 #2 et SMA 11 #3, confectionnés à partir de deux bitumes distincts (SMA 11 #2, un bitume d'indice de pénétration 170 (ABL-2 dont la fiche technique est présentée à l'Annexe 13) et SMA 11 #3 un bitume d'indice de pénétration 80) et de dosages variables, ont été testés au TSRST. L'influence du dosage en fibres a également été étudiée dans le cadre de cette étude sur l'enrobé SMA 11 #3. Un enrobé conventionnel de référence, l'enrobé AB11, a aussi été testé pour fin de comparaison. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 50 mm de diamètres par 250 mm de longueur suivant l'essai SHRP Test Method M-010. Le taux de refroidissement utilisé fut de 10°C/hr.

Les caractéristiques et les résultats de ces essais sont synthétisés dans le Tableau X. Les résultats indiquent que peu importe la teneur en fibre et le type de bitume, les enrobés SMA performant relativement mieux que l'enrobé conventionnel de référence. Néanmoins toute comparaison avec l'enrobé de référence demeure précaire du fait que les bitumes sont distincts

Tableau X

Résultats à l'essai TSRST sur différents enrobés SMA (taux de refroidissement de 10°C/hr sur des éprouvettes de Ø 50 mm X 250 mm)

Type de mélange	SMA 11 #3				SMA 11 #2	AB11
Nb. Éch.	3	2	2	1	3	1
% Air	2,5	2,7	5,4	5,6	3,4	7,5
Type de bitume	ABL-2	ABL-2	ABL-2	ABL-2	B80/100 + polym	B60/70
% bitume	6,1	7,0	7,0	7,0	7,0	5,7
Type de fibre	Cellulose	Cellulose	Cellulose	Cellulose	Cellulose	Cellulose
% de fibre	0,50	0,00	0,20	0,35	0,50	s/o
Contrainte maximale de rupture (MPa)	3,32	3,86	3,09	2,79	4,42	2,38

Tableau X (suite)

Type de mélange	SMA 11 #3				SMA 11 #2	AB11
T° associée à la contrainte maximale (°C)	-39,0	-35,1	-36,7	-33,3	-30,6	-21,0
T° de transition bisectrice (°C)	-20,4	-18,6	-16,8	-17,7	-14,1	-8,0
T° de transition tangente (°C)	-26,5	-23,6	-20,5	-21,0	-18,9	-12,5
Pente No.1 dS/dT (MPa/°C)	-0,007	-0,012	-0,017	-0,046	-0,016	-0,024
Pente No.2 dS/dT (MPa/°C)	-0,202	-0,231	-0,157	-0,172	-0,256	-0,161

(Source Partl et coll., 1995)

1.7.5 La résistance à la fissuration

Une étude sur six projets comportant la mise en place des enrobés SMA fut élaborée au Wisconsin. Cette étude a porté sur plusieurs types de SMA (Tableau XI) (VAM aux alentours de 17% et dosage en bitume variant de 6% à 6,7%) et fut comparée à un enrobé conventionnel (VAM aux alentours de 15%, dosage en bitume variant de 5,3% à 5,6 %). Le type de bitume ne fut pas spécifié. Plusieurs types de structures (substrats) furent ciblés (enrobé bitumineux (EB) : projets 5 et 6; chaussée en béton armé continu (CRCP) : projet 1; chaussée en dalle de béton (JRCP) : projet 2; chaussée en béton mince (PCCP) : projet 3; chaussée en béton ordinaire (PCC) : projet 4) (Schmiedlin et Bischoff, 2002). Les performances furent recueillies et analysées sur une période de cinq ans et sont exprimées en fonction du taux de fissures observé sur la chaussée avant resurfaçage.

Cette étude montre que les enrobés SMA tendent à minimiser la réapparition des fissures en surface comparativement à un enrobé dense standard (Tableau XII).

Toutefois, aucune distinction ne fut apportée pour différencier l'origine des fissures : fatigue, thermique et/ou simplement de la remontée des fissures proprement dite.

La Figure 4 montre la variation du taux de fissures des résultats obtenus pour différents projets SMA en comparaison à l'enrobé de référence. On constate que les enrobés SMA sont plus performants.

Cette même étude a également permis de montrer que l'utilisation de granulats de plus grande dimension et/ou de plus forte résistance (LA plus faible) augmente la performance à la fissuration (Tableau XIII). De ce point de vue, l'effet de la couche de base, qu'elle soit en enrobé bitumineux ou en de béton de ciment Portland n'a peu ou pas d'influence sur le taux de fissuration.

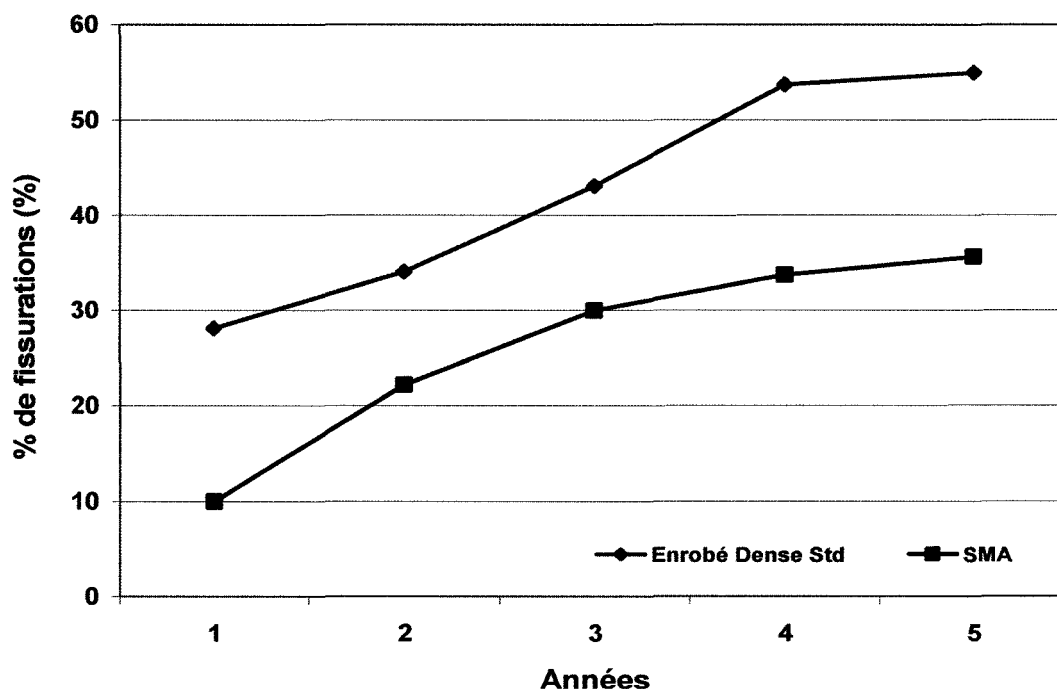


Figure 4 Analyses des fissures d'une chaussée d'enrobé standard et d'une moyenne pour des chaussée d'enrobé SMA après 5 ans de services (Adapté de Schmiedlin et Bischoff, 2002).

Tableau XI

Identification des enrobés utilisés pour l'analyse des fissures

Type d'enrobé	Description
1	SMA + fibre de cellulose
2	SMA + fibre minérale
3	SMA + stabilisant polymères thermoplastique (% faible)
4	SMA + stabilisant polymères thermoplastique (% élevé)
5	SMA + stabilisant polymères élastomère (% faible)
6	SMA + stabilisant polymères élastomère (% élevé)
C	Enrobé dense standard

(Source Schmiedlin et Bischoff., 2002)

Tableau XII

Analyses des fissures par projet après 5 ans (% de fissuration)

		% de fissuration après 5 ans ¹						
		No. Projet	1	2	3	4	5	6
Enrobé	Structure		Chaussée en béton armé continue (CRCP)	Chaussée en dalle de béton (JRCP)	EB sur surface mince de béton (PCCP)	EB sur base de béton ordinaire (PCC)	EB	EB
	Enrobé de référence	C	69	78	68	12	67	38
SMA	1	26	68	60	6	56	1	
	2	21	73	56	17	47	6	
	3	15	86	43	13	46	7	
	4	25	71	39	14	48	7	
	5	28	71	50	10	55	8	
	6	38	65	42	8	60	8	
	Moy SMA	26	72	48	11	52	6	

Note 1 : Exprimée en fonction du taux de fissuration observé sur le substrat avant resurfaçage

(Source Schmiedlin et Bischoff., 2002)

Tableau XIII

Analyses des fissures par caractéristiques des projets (% de fissuration)

		Ø granulats Max.		Base		Résistance à la fragmentation		
		9,5 mm	16 mm	EB	PCC	LA = 22,5	LA = 26,5	LA = 34,5
Enrobé de référence	C	72	39	53	58	40	72	53
SMA	1	51	21	33	39	16	62	30
	2	50	23	37	36	19	60	31
	3	47	22	38	32	14	66	25
	4	45	23	37	31	20	60	23
	5	50	24	36	38	19	63	29
	6	48	25	37	37	23	62	25
	Moy SMA	49	23	36	36	19	62	27

(Source Schmiedlin et Bischoff., 2002)

Finalement, on situe à environ 2,54 cm par année, le taux de propagation des fissures pour des enrobés standard. L'utilisation des enrobés SMA peut significativement abaisser ce taux (Brown, 2002).

1.7.6 La résistance à la fatigue

Selon une étude sur la résistance à la fatigue des enrobés SMA fondée sur l'évolution de l'endommagement du matériau à partir d'un essai homogène (essai de traction – compression alterné en sollicitation cyclique sinusoïdale ($\varepsilon_{\text{moyen}} = 0$)) (Perraton et coll., 2003), il a été montré que ces enrobés confectionnés à partir de fibres d'amiante possèdent une bonne résistance à l'endommagement par fatigue.

Cet essai fut exécuté selon la méthode développée par le Département de génie civil et du bâtiment de l'École nationale des travaux publics de l'État de Lyon et fut testé sur des éprouvettes cylindriques de 80 mm de diamètre par 120 mm de longueur. Le

Tableau XIV résume les différents résultats de fatigue obtenus pour un enrobé SMA ainsi que 3 autres types d'enrobés conventionnels.

Tableau XIV

Synthèse des résultats des essais de fatigue effectués sur des enrobés SMA et des enrobés conventionnels ($T^{\circ} = 10^{\circ}\text{C}$ et une fréquence de 10 Hz)

	SMA	EB1 ¹	EB2 ¹	EB3 ¹
$E_1 = E^* \cos \varphi$ (MPa)	8 019	17 896	10 608	8 483
$E_2 = E^* \sin \varphi$ (MPa)	2 134	2 706	3 590	3 428
E^* (MPa)	8 299	18 100	11 200	9 150
φ (angle de phase)	14,9	8,6	18,7	22,0
Taux d'endommagement ($\times 10^3$) ((MPa/cycle)/($\mu\text{m}/\text{m}$))	-3,8	-2,4	-5,4	-11,4
Résistance à la fatigue : ε_6 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	163	89	111	101

Note 1 1% de fibres d'amiante, bitume PG 58-28 et Grosseur nominale maximale = 10 mm

(Source Perraton et coll., 2003)

1.7.7 Les performances vis-à-vis la sécurité

Du point de vue d'uni de la chaussée, l'utilisation des SMA génère un indice de rugosité international légèrement supérieur à la moyenne des enrobés standard (1,52 vs 1,08 (Schmiedlin et Bischoff, 2002). Par contre, ce facteur dépend évidemment de la grosseur nominale de la pierre utilisée.

Au niveau du seuil sonore perceptible, des études ont montré que le niveau sonore général est similaire entre les enrobés standard et les enrobés SMA. Par contre, ce niveau de perception baisse de 5 dB lorsqu'on évalue les zones sensibles à l'être humain et donne ainsi la perception que les enrobés SMA sont plus silencieux que les enrobés conventionnels (Schmiedlin et Bischoff, 2002 et Richardson, 1999). Il est à

noter que le décibel suit une progression logarithmique, c'est-à-dire que 3 décibels de plus équivaut à multiplier l'intensité sonore par deux alors qu'une augmentation de 5 dB équivaut à trois fois plus de « bruit » (Alternative santé, site internet).

Toujours selon ces études, il a été rapporté que l'utilisation d'enrobés SMA génère moins d'éclaboussures et de bruines fines par les véhicules en temps de pluie comparativement aux enrobés standards. Par contre, étant donné la texture ouverte de l'enrobé, une bruine légère sans conséquence est observée plus longtemps après la pluie sur les SMA. Par ailleurs, les enrobés conventionnels tendent à créer un effet miroir la nuit par période pluvieuse, ce qui n'est pas observé avec l'utilisation des SMA puisqu'ils tendent moins à refléter la lumière.

En condition hivernale, l'utilisation des enrobés SMA demandent une plus grande quantité de sels de déglçage pour un rendement comparable à celui des enrobés conventionnels. Mais par contre, ces mêmes sels tendent à rester plus longtemps sur l'enrobé principalement à cause de leur texture de surface plus ouverte (Schmiedlin et Bischoff, 2002).

Finalement, toujours selon Schmiedlin et Bischoff (2002), les enrobés SMA, possédant les granulats les plus gros et les plus résistants, sont ceux qui offrent les meilleurs caractéristiques du point de vue sécuritaire.

1.8 Les procédures de production en usine de l'enrobé SMA

Après la formulation de l'enrobé suit la production en usine. Cette étape requiert une attention très particulière pour assurer une production adéquate, uniforme et constante tout au long du procédé. Cette section présente les procédures et critères de production en usine qu'il convient de mettre en œuvre pour produire et mettre en place des enrobés SMA de qualité.

Plusieurs points relatifs à la production en usine des enrobés SMA demeurent inchangés relativement à celle des enrobés standard. Par contre, certains points

différent et méritent toute l'attention possible afin d'assurer une production homogène et de qualité. Deux aspects seront analysés : les matériaux et la production.

1.8.1 Les matériaux

1.8.1.1 Les granulats

Lors de la production des SMA en usine, il est recommandé de posséder de 2 à 3 sites d'entreposage des granulats. L'idéal est de 3 : un pour les gros, un pour les granulats intermédiaires ainsi qu'un pour les granulats fins. L'utilisation de plusieurs bennes froides peut s'avérer essentielle afin de fournir à la demande et de minimiser la variabilité dans l'apport des gros granulats. De plus, en tout temps la manipulation et l'entreposage des granulats, peu importe leur dimension, doit se faire avec une extrême précaution (Brown et coll., 1998; WSDOT, 2000).

Un point important est à noter : l'utilisation de sable roulé est fortement déconseillée car cette option n'apporte aucune valeur et aucun bénéfice au mélange. De plus, utilisé en petite quantité (environ 3%), l'apport par les convoyeurs se fait de manière extrêmement lente et de façon inconsistante. Finalement, la haute teneur en humidité de ce matériau implique d'avantage d'inconvénients au plan de production que d'effets bénéfiques au mélange (WSDOT, 2000).

1.8.1.2 Le filler d'appoint

Étant donné la grande importance du filler d'appoint en raison de sa quantité dans l'enrobé SMA, certaines conditions s'avèrent essentielles à respecter. Le filler d'appoint gouverne le taux de production en usine de l'enrobé SMA par sa quantité et son degré de tolérance à la variation. Il demeure donc essentiel de porter une attention particulière à la manutention, l'entreposage et le dosage du filler tout au long de la production.

Idéalement, le filler d'appoint devrait être acheté, transporté et entreposé en vrac dans des silos ou des citernes prévus à cet effet. L'ajout de la quantité de filler devrait alors

être fait à l'aide d'un souffleur dans la gâchée. Étant donné qu'un procédé par convoyeurs ne permet pas d'assurer un contrôle efficace et précis entre l'introduction du filler dans le mélange et l'arrivée du matériel, celui-ci est à proscrire. De plus, des problèmes générés par la poussière en temps venteux peuvent engendrer des pertes considérables (Brown et coll., 1998; WSDOT, 2000).

Dans le cas d'une centrale d'enrobage discontinue (à fournée), l'introduction du filler se fait entre deux séries d'introduction des granulats dans le malaxeur. Pour les centrales de type tambour - sécheur – enrobeur (TSE), la ligne d'apport du filler devrait être située immédiatement après la ligne d'introduction du liant pour s'assurer que le filler soit complètement enrobé avec le liant avant son exposition au fort débit induit par les gaz de combustion dans le tambour. Ces procédés font en sorte d'assurer une bonne homogénéité du filler dans le mélange et d'éviter ainsi son absorption par le système de récupération des fines.

1.8.1.3 Le liant

Les étapes relatives à l'entreposage et à la manutention du liant devrait être effectuées selon les procédures et directives des manufacturiers et ne devraient pas différer de celles pour les enrobés conventionnels. Le point le plus important à prendre en considération lors de l'ajout du liant est le calcul et le contrôle des proportions introduites dans l'enrobé pour éviter des fluctuations du taux de liant.

1.8.1.4 Les agents stabilisants

L'ajout de stabilisants peut se faire par l'introduction de fibres ou par l'ajout d'agents modificateurs au liant. En ce qui a trait à l'ajout de fibres, cette opération devrait être effectuée à l'aide d'un système indépendant pour assurer un contrôle minutieux et un dosage uniforme. Les proportions d'ajout de fibres devraient être directement reliées avec la distribution des granulats ou le système de pesée afin de maintenir le taux de fibres demandé selon la gâchée. Afin d'assurer un contrôle efficace, le plan de production devrait être muni d'indicateurs de débit et de contrôle pour permettre l'interruption du malaxage advenant l'oubli d'introduction des fibres (WSDOT, 2000).

1.8.2 La production en usine des enrobés SMA

Lors de la production en usine, plusieurs points doivent être soulignés afin d'assurer une production de qualité et selon les meilleures conditions possibles. Les points suivants seront traités : le réglage de la centrale d'enrobage, les températures de production, le temps de malaxage et finalement l'entreposage.

1.8.2.1 Le réglage de la centrale d'enrobage

Le point le plus important et demandant le plus d'attention demeure le réglage du système d'alimentation en matériaux avant le début de la production. Le système de benne froide peut influencer grandement la texture des enrobés SMA même pour les procédés faisant l'usage de bennes chaudes. Le réglage devrait être effectué en présence de matériaux utilisés dans la production des SMA et au même rythme que la production visée (Brown, 2002).

La station de contrôle des additifs ou du dosage en fibres devra elle aussi être réglée et vérifiée tout au long de la production pour assurer l'apport exact d'additifs dans l'enrobé. La variation de ces matériaux peut engendrer des effets négatifs et néfastes sur la finition et la texture finale du produit fini.

Finalement, la relation apport en filler et la collecte des éléments fins par le dépoussiéreur demeurent également des points nécessitant un contrôle très étroit. Ces systèmes doivent être opérationnels et fonctionnels pour assurer une alimentation continue et exacte des proportions nécessaires. L'ajout de fillers d'appoint doit être introduit dans l'enrobé de manière efficace pour éviter une obstruction et/ou un mauvais dosage en fines du système. Si le système de dépoussiéreur retire complètement ou en partie l'apport de fines d'appoint, le système devra alors être réglé en conséquence afin d'assurer la quantité requise de fines dans le produit final.

L'inspection et la certification de l'usine est nécessaire a priori à l'approbation pour le début de la production de l'enrobé. Cette mesure assure les compétences de la compagnie de pavage à produire ce type d'enrobé. De plus, la confection et la mise en

place d'une planche de convenance est essentielle avant le début des travaux. Cette planche de convenance est bénéfique pour faire le réglage des équipements, démontrer les procédures de compaction et sensibiliser les employés à la mise en place de ce type d'enrobé nettement plus pierreux (WSDOT, 2000).

1.8.2.2 Les températures de production des enrobés SMA

Plusieurs expériences tendent à montrer que les températures de production standard pour les enrobés à module élevé peuvent s'appliquer aux enrobés SMA. Sans polymère, les températures de malaxage devraient se situer entre 145 et 155 °C. Par contre, lorsque certains additifs sont utilisés (fibres et polymères), la température maximale à ne pas dépasser est alors de 170 °C. À ce moment, une attention doit être portée à la qualité du liant puisque son oxydation est plus susceptible et plus rapide à haute température. L'effet de saignement du liant sur les granulats peut aussi être observé lors d'une élévation de la température de malaxage. La température d'opération devrait alors être fixée pour assurer une homogénéité de l'enrobé et une température de pose en chantier adéquate pour contrer le temps de transport et finalement être en mesure de fournir une température pouvant assurer un bon compactage, ce tout au long de la production et de la mise en oeuvre.

1.8.2.3 Le temps de malaxage des enrobés SMA

Avec l'ajout d'agents stabilisants dans l'enrobé, le temps de malaxage pour ce type d'enrobé devrait être légèrement supérieur à celui des enrobés conventionnels. Cette augmentation du temps de malaxage est nécessaire pour faire en sorte d'assurer la distribution et un enrobage uniforme et efficace des fibres dans l'enrobé. L'évaluation du temps de malaxage devrait être établie en fonction d'une inspection visuelle du mélange. Si la présence de fibres, d'additifs ou de granulats non enrobés est observable, le temps de malaxage doit être prolongé. Le temps recommandé de malaxage pour les enrobés SMA est généralement de 15 secondes pour le malaxage à

sec et de 30 à 35 secondes pour le malaxage « mouillé⁴ » (WSDOT, 2000 et Brown, 1992).

1.8.2.4 L'entreposage des enrobés SMA

L'entreposage des enrobés SMA ne doit pas se faire à haute température pour de longue période. Cette précaution fait en sorte de prévenir le saignement de l'enrobé. Des expériences ont montré que l'entreposage des SMA peut être envisagé comme solution de dernier recours pour une période de 2 à 3 heures et ce sans perte de performance notable. Par contre, le temps d'entreposage ne devrait en aucun cas être supérieur à 12 heures.

Dans les centrales où des silos d'entreposage et de distribution sont utilisés, les silos ne devraient jamais être remplis à pleine capacité afin d'éviter la ségrégation dans le mélange (RTA, 2003).

1.8.3 Les procédures de mise en place des enrobés SMA

Les procédures de mise en place et de compaction des enrobés SMA comportent essentiellement les limitations de température lors de la pose, les conditions de transport et la préparation de la surface.

1.8.3.1 Les températures limites de pose des enrobés SMA

Afin d'assurer une pose adéquate des enrobés SMA, aucune opération de pavage ne doit être autorisée lorsque la température ambiante est sous la barre des 10 °C et que les conditions climatiques ne sont pas clémentes puisque les enrobés SMA tendent à refroidir rapidement (Schmiedlin et Bischoff, 2002; Brown, 1998; RTA, 2003).

⁴ À partir du moment où le bitume est injecté

1.8.3.2 Les conditions de transport des enrobés SMA

Le temps de transport des enrobés SMA de l'usine au chantier doit être le plus court possible. La température de l'enrobé ne doit en aucun cas être augmentée pour pallier à un temps de transport trop long. Une augmentation dans le temps de transport ainsi que les vibrations induites par le transport peuvent générer une ségrégation et une séparation des gros granulats et du liant dans l'enrobé et provoquer ainsi des plaques de ressuage « *fatty spots* » sur la chaussée (RTA, 2003).

Les températures d'arrivée des enrobés en chantier doivent être autour de 140 à 160 °C selon le type de liant et des agents stabilisants utilisés (RTA, 2003 et Brown, 1998). Finalement, étant donné que l'enrobé SMA est un enrobé assez consistant, leur adhérence aux bennes des camions de transport est souvent observée, spécialement avec l'utilisation d'agents stabilisants. Pour pallier à ce problème, l'utilisation d'agents de lubrification et le nettoyage des bennes de transport devraient être effectués régulièrement. L'utilisation de tels produits doit être faite avec précaution puisqu'ils peuvent contaminer l'enrobé durant le transport et modifier son comportement rhéologique. Une trop forte accumulation de ces agents dans le fond de la benne provoquerait un écoulement et donc une perte du liant. Les bennes doivent donc être imprégnées de lubrifiant et tout excès doit être retiré avant le chargement. L'utilisation d'huile ou de produits à base de carburant est totalement à proscrire. Si possible, des camions à benne chauffante devraient être utilisés alors que des bâches de dimensions suffisantes pour couvrir tout l'enrobé (ralentir le refroidissement et protéger contre les intempéries) sont obligatoires afin de pallier aux pertes thermiques lors du transport (CCDG, 2003).

1.8.3.3 La préparation de la surface

La préparation de la surface de pavage pour la pose de l'enrobé SMA nécessite sensiblement la même procédure que celle pour la pose des enrobés conventionnels. Si la pose s'effectue sur une surface existante, l'utilisation d'un agent de liaison est requise suivant les dosages et les procédures habituels. De plus, les dépressions

majeures devront être réparées. Si la condition de la chaussée à resurfer est trop critique, une certaine épaisseur devra alors être retirée par meulage. Finalement, malgré les performances supérieures de l'enrobé SMA, la réparation et l'élimination des problèmes de la chaussée existante devront être effectuées pour assurer et permettre à l'enrobé de bien performer.

1.8.4 Les manipulations et procédures reliées à la paveuse

En ce qui concerne les manipulations et procédures reliées à la paveuse, plusieurs points doivent être spécifiés afin d'assurer une mise en place uniforme et de qualité.

1.8.4.1 Le chargement

Le chargement de la paveuse se fait normalement avec la décharge des camions transporteurs directement dans la benne de la paveuse. Toutefois, des véhicules de transfert de matériaux peuvent être utilisés. Certains auteurs relatent même que la pose des enrobés SMA ne devrait pas s'effectuer sans l'utilisation de ces véhicules. Ces véhicules de transfert ont la capacité de re-malaxage assurant ainsi une homogénéité et une uniformité de l'enrobé suite au transport (risque de ségrégation et de saignement du bitume « draindown »). Les photos de la Figure 5 illustrent très bien les différences de température observées dans le camion transporteur lors de la livraison de l'enrobé au chantier et montrent la pertinence de recourir à un véhicule de transfert avant la décharge dans la benne de la paveuse.

Étant donné la consistance particulière de l'enrobé SMA, l'homogénéité du mélange doit être parfaite à la sortie de la paveuse pour éviter des défauts de surface importants. En termes plus explicites, ils doivent nécessiter le moins de retouches et de modifications possibles par les ouvriers après sa sortie de la paveuse. Tous les problèmes et toutes les erreurs à la sortie de la paveuse auront des répercussions sur la performance de l'uni et de l'enrobé à long terme (Brown, 2002).

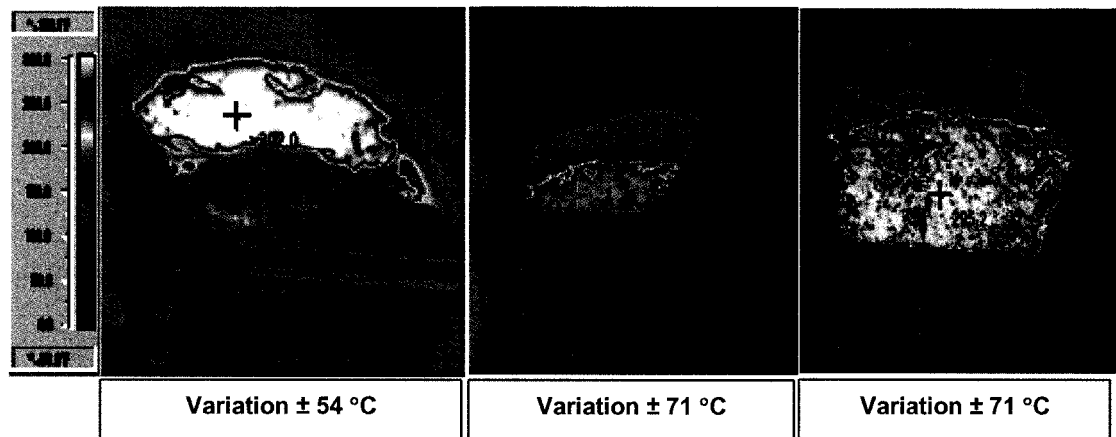


Figure 5 Illustrations des différentielles de températures (en °F dans la benne du camion) observées à la livraison d'un enrobé en chantier (Adapté de WSDOT, 2000).

1.8.4.2 Le réglage

Préalablement à la mise en place de l'enrobé, la paveuse doit être réglée adéquatement. La procédure implique le réglage des ouvertures des portes d'alimentation et des lames du convoyeurs ainsi que des visses hélicoïdales d'alimentation dans la benne de la paveuse. Les portes d'alimentation devront être réglées afin de permettre la distribution uniforme de l'enrobé aux visses hélicoïdales de manière à ce qu'elles demeurent continuellement en action au moins 85 à 90 % du temps en cours de pavage (Brown, 1998).

1.8.4.3 La vitesse

La vitesse de la paveuse est principalement dictée par l'opération de compactage de l'enrobé. Afin de minimiser les départs et arrêts de la paveuse, une bonne coordination doit donc être assurée entre le plan de production, l'équipe de transport, la paveuse et l'équipe de compaction. L'interruption trop fréquente des opérations de pavage induit un effet direct sur l'uni de roulement de la chaussée. La vitesse cible de la paveuse devrait se situer à plus ou moins 5 km/hr et être maintenue le plus possible constante (ALDOT, 2001). Ce temps permet un taux de roulement le plus lent possible. Un taux de roulement supérieur sur de courtes périodes tend à générer un cisaillement entre le

mortier et les gros granulats de l'enrobé ayant pour conséquence principale de favoriser l'apparition de tâches grasses ou de saignement de l'enrobé à la surface. De plus, l'élévation des « ailes » de la paveuse devrait être proscrit à l'exception des manipulations de vidange de la paveuse.

1.8.5 Les opérations de compactage

Les opérations de compactage s'avèrent une des étapes critiques du processus de la mise en place des enrobés SMA. La densité cible recommandée devrait se situer autour de 95% avec un seuil minimum de 94% (Brown, 1998; Schmiedlin, 1998; Richardson, 1999; WSDOT, 2000). De plus, tous les travaux de compaction devraient être terminés avant que la température de surface de l'enrobé atteigne les 115 – 110 °C (RTA, 2003 et ALDOT, 2001) et 127 °C (Brown, 1998) pour les mélanges modifiés de polymères.

L'enrobé SMA se compacte aisément à bonne température et devient de plus en plus dur à compacter lorsque la température chute. Par conséquent, un suivi rigoureux de la procédure de compactage s'avère essentiel et primordial. Afin d'obtenir un taux de compaction conforme aux exigences, l'application d'une stratégie de compaction agressive doit être établie, mise sur pieds et respectée à la lettre pour optimiser la séquence (Brown, 1998; WSDOT, 2000).

Dans la séquence de compactage, les rouleaux compacteurs se doivent de suivre la paveuse le plus près possible (Schmiedlin et Bischoff, 2002; Brown, 1998; ALDOT, 2002; Brown, 2002). Une expérience au Wisconsin a montré que le fait de diminuer la distance rouleau-paveuse de 215 m à 90 m avait comme effet bénéfique d'augmenter le taux de compaction de 3% (Schmiedlin et Bischoff, 2002). À cet égard, la Figure 6 illustre la fluctuation de la température en surface de l'enrobé mis en place selon la distance de la paveuse. Elle témoigne de l'importance à accorder à la stratégie de compaction qui se doit d'être agressive et de débuter immédiatement à la sortie de la paveuse.

Fait à noter, comparativement aux enrobés conventionnels, dont l'épaisseur de compaction génère une diminution de hauteur de 20 à 25 % de la hauteur initiale, les enrobés SMA perdent généralement de 10 à 15 % de leur hauteur initiale (Brown, 1998). Les enrobés SMA ne requiert pas comme tel de surplus de compaction pour obtenir la valeur cible, seulement une approche plus agressive doit être favorisée (Schmiedlin, 1998)

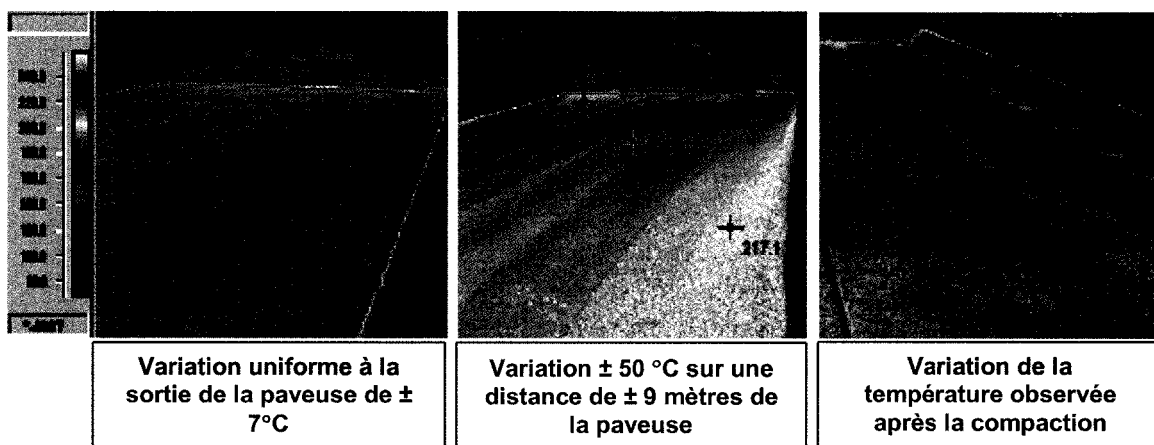


Figure 6 Illustrations des variations de températures (en °F) lors de la pose des enrobés en chantier (Adapté de WSDOT, 2000).

Le nombre de rouleaux compacteurs nécessaire varie de 2 à 3 selon la surface de pavage : si la densité requise n'est pas atteinte, l'ajout d'un autre rouleau compacteur devrait être immédiatement pris en considération. La vitesse de roulement doit être impérativement similaire à celle de la paveuse, soit 5 km/hr (Brown, 1998 et ALDOT, 2002). De plus, lorsque les rouleaux demeurent statiques, ces derniers doivent être retirés de la surface pavée pour éviter la formation de rugosité excessive sur le fini de la chaussée (Brown, 1998).

L'usage de rouleaux à cylindre d'acier est fortement recommandé. La masse minimale des rouleaux utilisés devrait être fixée à 9 000 kg (Brown, 1998 et RTA, 2003). Le mode vibration peut être employé mais sous supervision pour éviter de fracturer les granulats étant donné le contact pierre sur pierre associé à ce type d'enrobé (Brown, 1992 et ALDOT, 2001). Lors de l'utilisation des rouleaux à cylindres d'acier,

l'application d'un lubrifiant, ou de tout autre produit approuvé, mélangé à de l'eau peut s'avérer essentielle pour éviter l'adhésion de l'enrobé aux rouleaux (ALDOT, 2001). Finalement, l'utilisation de rouleaux compacteurs à pneus est déconseillée puisque leurs pneus en caoutchouc entraînent des particules du mortier et causent ainsi des défauts de surface importants (Brown, 1992 et RTA, 2003).

1.9 La corrélation entre la prévision de l'aptitude au compactage en laboratoire et celle en chantier : la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)

Pour établir la corrélation entre les résultats en laboratoire et en chantier, trois approches peuvent être envisagées : 1) l'approche du Ministère des transports du Québec (MTQ), 2) celle du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de France (LCPC-France) et 3) l'approche de design "*Superpave Giration Levels N_{design}* " (*Super Performance Pavement*) des américains. Chaque méthode comporte des avantages et des inconvénients. Il s'agit de bien les étudier et de tirer profit de la méthode la mieux adaptée à nos besoins.

Globalement, les 3 approches de formulation font référence à 3 critères de conception : 1) la teneur en vides de l'enrobé suivant un nombre restreint de girations, $N_{initial}$, 2) la teneur en vides selon un nombre de giration de formulation, N_{design} , et 3) une teneur en vides associée à un nombre maximum de giration, $N_{maximum}$. Ces valeurs sont définies comme suit :

$N_{initial}$

Le nombre de giration initial indique le nombre de girations employés comme une mesure de la compacité du mélange pendant la mise en place. Les mélanges qui se compactent trop rapidement (% de vides trop bas à $N_{initial}$) tendent à être trop souples durant la mise en place et instables lorsque soumis à la circulation. Il s'agit souvent d'une bonne indication de la qualité globale des enrobés. Après le nombre de giration initial, $N_{initial}$, le pourcentage de vides se doit d'être supérieur à 11%.

N_{design}

Le nombre de giration de conception représente le nombre de girations requis pour reproduire un enrobé possédant les mêmes caractéristiques et la même densité recherchées sur le chantier. Après le nombre de giration de conception, N_{design} , le pourcentage de vides entre 4% et 7% est alors visé.

 N_{maximum}

Le N_{maximum} représente le nombre de girations pour reproduire une densité que ne devra jamais atteindre l'enrobé en service. Si le pourcentage de vides à N_{maximum} est trop bas, le post-compaction de l'enrobé lié à l'effet de la circulation engendrera un volume de vides excessivement bas et un potentiel d'orniérage relativement élevé durant la période de vie utile de l'enrobé bitumineux. Le pourcentage de vides à N_{maximum} ne devrait en aucun cas être inférieur à 2%.

1.9.1 L'approche du Ministère des transports du Québec (MTQ)

La formulation des enrobés selon l'approche préconisée par le MTQ est décrite dans la norme *LC26-004 - Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du Laboratoire des chaussées*. On désigne cette méthode, méthode LC de formulation. Cette norme établit préalablement le nombre de girations correspondant à l'énergie de compaction en chantier, le N_{design} , pour chacun des enrobés spéciaux présentement utilisés sur les routes du Québec.

Ce critère est principalement basé sur l'épaisseur de pose de l'enrobé, laquelle définit en quelque sorte le GNM du squelette granulaire, et sur l'expérience acquise durant les dernières années par les responsables du laboratoire LC du MTQ. Les N_{design} tels que spécifiés par le MTQ sont illustrés dans le Tableau XV. Bien évidemment, la teneur en vides cible à N_{design} (4-7%) est celle que l'ont veut atteindre en chantier à la mise en œuvre de l'enrobé. D'autre part, il est intéressant de remarquer que le N_{design} varie en fonction de l'enrobé comparativement au N_{initial} et au N_{maximum} qui demeurent fixes peu importe l'enrobé.

De plus, on observe que plus l'épaisseur optimale est grande, plus le N_{design} est élevé : une épaisseur de couche plus épaisse permet l'utilisation d'un squelette granulaire plus grossier qui conduit alors à une optimisation de la densité de l'enrobé⁵. De surcroît, plus l'épaisseur de pose d'une couche d'enrobé est grande, plus lente sera la perte de chaleur lors de la compaction en chantier (actions de compactage plus efficace) ce qui explique que le N_{design} exigé correspond à un nombre de girations plus élevé.

Tableau XV

Critères de sélection et du N_{design} des enrobés du MTQ

Type d'enrobé		ESG-14	ESG-10	EG-10	EGA-10	Exigences % de vides à la PCG
GNM		14	10	10	10	
Épaisseur de pose (mm)	Minimale	55	40	40	40	
	Optimale	70	60	50	60	
	Maximale	80	70	60	70	
N_{initial} (giration)		10	10	10	10	≥ 11 %
N_{design} (giration)		100	80	80	80	4 à 7 %
N_{maximum} (giration)		200	200	200	200	≥ 2 %

(adapté de MTQ 2001 et de la norme 4202 Tome VII p. 11 de 11)

1.9.1.1 Les avantage(s)

Le principal avantage de la méthode de formulation LC du MTQ est la simplicité de son utilisation. Le Tableau XV illustre bien le processus de formulation basé sur le N_{design} , en fonction de l'enrobé.

⁵ Les travaux de Caquot (1937) ont montré qu'un accroissement de l'étendue granulaire (D augmente) conduit à une réduction des vides du squelette granulaire : $V_v = V_0 (d/D)^{0,30}$

1.9.1.2 Les désavantage(s)

Le désavantage majeur de cette méthode est sa mise en application pour de nouveaux types d'enrobés non standard. En effet, aucune méthode n'existe encore pour calculer ou établir de manière concrète le N_{design} pour un nouvel enrobé : la relation entre le laboratoire et le chantier reste tout à fait subjective. Le choix, pour de nouveaux types d'enrobés, se base présentement sur l'expérience et les connaissances des hommes de décision du MTQ. Ce principe de fonctionnement fait en sorte que cette technique ne facilite pas le développement de nouveaux enrobés même si elle est expérimentalement justifiable.

1.9.2 L'approche du laboratoire Central des Ponts et Chaussées de France (LCPC)

Les recherches du LCPC ont mis en évidence les facteurs pouvant affecter la compacité obtenue sur chantier, soit (Moutier, 1991) :

- a. la formulation moyenne de l'enrobé et la dispersion propre aux composants;
- b. la nature des équipements de compactage (rouleaux compacteurs);
- c. le nombre de passes des équipements de compactage;
- d. la nature des équipements de pose de l'enrobé (finisseurs);
- e. l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé;
- f. les conditions météorologiques;
- g. la nature de la centrale de fabrication de l'enrobé; et
- h. l'état et la nature du sol support.

Suivant un programme d'investigation en chantier, les chercheurs du LCPC ont établi que la compaction en chantier variait d'un chantier à l'autre et que cette dernière était fonction de la compacité obtenue en laboratoire à la PCG avec un certains nombres de biais (Moutier, 1991) :

$$C_{\text{chantier}} = C_{\text{laboratoire}} + \text{biais}$$

Ces biais sont principalement fonction de (du) :

- a. la nature de l'atelier de compactage;
- b. nombre de passes total appliqué qui est très variable;
- c. la station de pose de l'enrobé; et
- d. la nature ainsi que l'origine des postes de fabrication des enrobés.

Les analyses des compacités établies en laboratoire versus celles mesurées en chantier deviennent rapidement fort complexe du fait que des incohérences sont observées dues, notamment : 1) à l'emploi d'ateliers de compactage très divers (bien ou mal utilisés), 2) à la fabrication d'enrobés en chantier assez différente de celles étudiées au laboratoire (variabilité des matières premières) et 3) à des mauvaises opérations quant aux essais à la PCG en laboratoire (Moutier, 1982). Dans ce contexte, le LCPC a développé en laboratoire un simulateur de compaction à échelle réduite. Suite à plusieurs études et travaux, une formule basée sur l'épaisseur de pose, le nombre de passes pour un compacteur donné et un estimateur de l'efficacité de la compaction, permettant de mettre en relation le nombre de passe de compaction en chantier (n_p) à celui correspondant à la compaction à la PCG ($N_{\text{design}} : n_g$), a été proposée. Cette relation se décrit comme suit :

$$N_{\text{design}} = K * e * n_p$$

ou

N_{design}	=	nombre de girations de contrôle en laboratoire (dénomé n_g en France)
K	=	facteur dépendant de l'énergie développée par le compacteur
e	=	épaisseur de mise en œuvre du mélange bitumineux (cm)
n_p	=	nombre de passes prévu du compacteur en chantier

La valeur de K varie entre 0,1 et 2,5 selon le type de compacteur (Moutier, 1991). Pour un compacteur pneumatique standard de trois (3) tonnes (pression pneumatique de 6 bars), la valeur de K est égale à 0,625. Pour un compacteur vibrant lourd, la valeur de K peut atteindre 2,5. Les compacteurs répondant à cette valeur sont des compacteurs

vibrants type Dynapac CC 21 ou CC 50 A de type Ray GO. Ils possèdent des masses statiques linéaires comprises entre 23 et 35 daN/cm. Des compacteurs lourds de ce type compactent environ 4 fois plus vite qu'un compacteur pneumatique standard. Notons que, le nombre de passes du compacteur est établi comme étant un aller simple du compacteur sur l'enrobé.

Les valeurs de K énoncées ci-dessus sont toutefois valables dans la mesure où les conditions d'essai à la presse à cisaillement giratoire sont les mêmes que celles correspondantes à la PCG Française. Or, la situation est particulièrement différente à ce niveau au Québec : les caractéristiques de la PCG québécoise diffèrent à plusieurs niveaux de celles de la PCG Française. Ces différences sont illustrées dans le Tableau XVI. L'angle de giration et la vitesse de rotation générée par la PCG Française sont passablement différents de ceux qui prévalent à la PCG Américaine et Québécoise.

Tableau XVI

Critères de fonctionnement de la PCG

Critères	PCG Américaine	PCG Française	PCG Québécoise
Angle de giration	1,25 °	1,0 °	1,25 °
Pression verticale	600 kPa	600 kPa	600 kPa
Température de l'essai	dépendante du type de bitume mais non constante (car enceinte non chauffée)	constante tout au long de l'essai et dépendante du type de bitume	dépendante du type de bitume mais non constante (car enceinte non chauffée)
Vitesse de rotation	30 girations par minute	6 girations par minute	30 girations par minute
	<i>source Harman et coll. 2001</i>	<i>source Moutier 1982</i>	<i>source Norme Québécoise</i>

1.9.2.1 Les avantage(s)

Un des avantages importants de la méthode de formulation Française est le fait qu'elle permet de calculer le N_{design} en prenant en compte les conditions de mise en œuvre sur chantier. De plus, il s'agit d'un modèle simple et facile à utiliser, pour autant que l'on connaisse bien les critères de conception et de mise en œuvre de l'enrobé bitumineux. Cette approche de formulation permet de constituer une première base solide lors de l'élaboration de nouvelles formulations d'enrobé bitumineux pour établir la valeur de N_{design} requis.

1.9.2.2 Les désavantage(s)

Le désavantage principal de ce procédé est qu'il n'est pas universel. C'est à dire qu'il devient plus difficile d'utiliser cette méthode de calcul lorsque les valeurs de K diffèrent de celle établie antérieurement. La Figure 7 illustre bien la variation observée au niveau de la compacité en fonction du facteur K associé à deux compacteurs différents et ce, après seulement une passe. Étant donné qu'il n'existe pas de "charte" permettant d'attribuer la valeur du facteur K en fonction des types d'équipements disponibles, plusieurs essais peuvent alors s'avérer nécessaires pour le préciser.

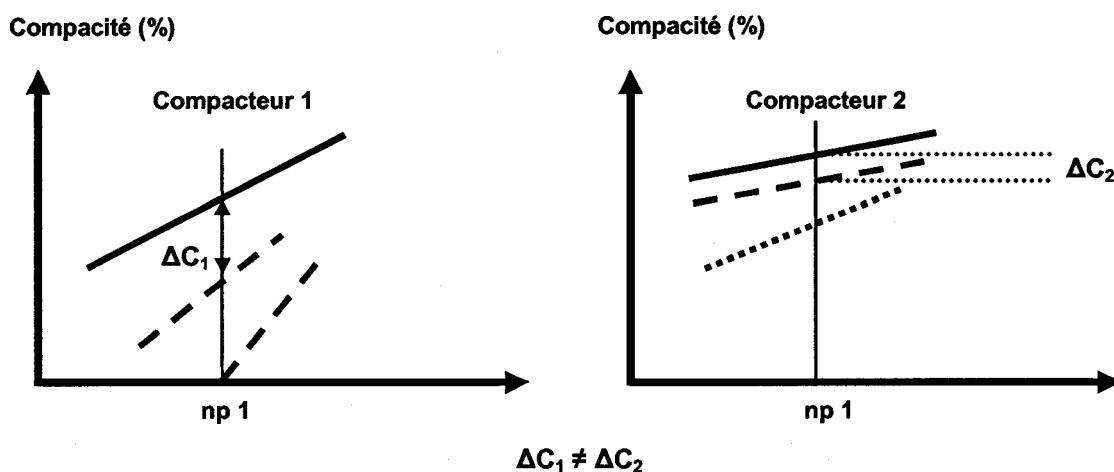


Figure 7 Écart relatif généré par l'énergie développée par les compacteurs (adapté de Moutier, 1982)

De plus, il faut préciser que les procédures d'essais à la PCG diffèrent selon les pays. Le critère de l'angle de giration en est un exemple parfait (Tableau XVI). Il est donc très important de vérifier les critères de fonctionnement de la presse avant d'utiliser cette formule puisque le facteur K est appelé selon la correspondance de la compacité en chantier à celle obtenue en laboratoire par la PCG Française. Étant donné que plusieurs paramètres diffèrent, Moutier a établi une corrélation entre les facteurs K à utiliser selon que l'on utilise la PCG Québécoise plutôt que la PCG Française : le facteur K doit être divisé par deux (Moutier, 2003).

Finalement, cette procédure de calcul globalise plusieurs biais à travers le facteur K pouvant intervenir lors de la mise en œuvre sur chantier. Par contre, certaines autres catégories de facteurs peuvent intervenir et cette formule n'en tient pas compte. Les responsables du LCPC ont proposé l'intégration d'un facteur de correction ΔC de manière à mieux établir la corrélation laboratoire – chantier. Encore une fois, des essais d'étalonnage semblent inévitables pour assurer une utilisation juste de cette approche.

1.9.3 L'approche du programme Superpave

Contrairement au 2 autres méthodes de formulation présentées, la méthode Superpave fixe les différents niveaux de giration pour le contrôle à la PCG, N, en fonction du nombre d'ECAS. Les valeurs de N étant ajustées suivant la température moyenne des sept jours consécutifs les plus chauds. L'Annexe 14 illustre les valeurs cibles d'origine prises en compte par Superpave.

Suite à plusieurs recherches, à des avis d'experts et à l'expérience découlant de la mise en application de ces critères, plusieurs modifications furent apportées. Ces modifications avaient pour but de simplifier la procédure de sélection et de conception des enrobés suivant la méthode Superpave. Elles furent soumises à l'approbation de plusieurs comités dont : Projet 9-9 de perfectionnement de la méthode de compactage giratoire Superpave, Guide Superpave des principaux États participants, Contribution du Groupe d'experts sur les mélanges bitumineux.

Les principales modifications se résument ainsi :

a. Réduction du niveau de circulation de référence

Le choix du niveau de circulation fut ramené de sept à quatre. La procédure fut d'établir le N_{design} à 100 pour la plage de circulation de 3 à 30 millions d'ECAS. Les valeurs des différentes autres plages furent déterminées à partir de l'analyse de sensibilité des propriétés volumétriques et de la rigidité du mélange.

b. Regroupement des colonnes de températures

Les quatre colonnes de températures initialement proposées furent regroupées en une seule. Cette modification fait suite à deux constatations majeures :

Tout d'abord, il a été montré que les propriétés volumétriques s'avèrent peu sensibles entre les colonnes de températures préalablement établies, deuxièmement, lors de l'établissement original de ces catégories, on n'avait pas tenu compte du fait de l'utilisation de liants plus rigides dans les régions au climat plus chaud : la température est prise en compte dans la conception de l'enrobé ce qui rendait inutile ce facteur supplémentaire.

c. Conception d'enrobés pour des valeurs d'ECAS calculées sur 20 ans

Les nouvelles plages du niveau de circulation se basent désormais sur un niveau cumulatif du nombre d'ECAS. Le temps de calcul a été fixé à vingt ans. Même si la chaussée n'est pas conçue pour une telle période de vie, la méthodologie nécessite d'extrapoler la valeur d'ECAS à 20 ans pour sélectionner un enrobé. Cette modification s'impose puisque les expériences ont montré que le phénomène d'orniérage peut survenir au cours des premières années de vie d'un revêtement et, par conséquent, il faut tenir compte de la charge imposée dès les premières années.

d. Considération relative à l'emplacement de la structure de revêtement

Pour tenir compte de l'épaisseur de pose de l'enrobé, les recherches du projet 9-9 du PNCRR ont recommandé d'abaisser N_{design} de sélection d'un niveau,

pour les enrobés placés à plus de 100 millimètres sous la surface (couche de fondation). La solidité de la structure de la chaussée ne devrait pas être affectée puisque les couches d'enrobé situées à cette profondeur ne sont pas soumises aux mêmes tensions que les enrobés de surface. Par contre, il est important de tenir compte de l'échéancier de surfacage pour éviter une surexposition non prévue à la circulation de la couche de fondation et ainsi générer et induire une détérioration prématurée de cette couche.

Suivant ces modifications, les niveaux du N_{design} de la méthode Superpave furent révisés. Le Tableau XVII illustre les critères de conception actuellement en vigueur.

Finalement, il est important de tenir compte des paramètres d'essai à la presse à cisaillement giratoire américaine si l'on veut comparer des résultats avec les deux méthodes précédentes (voir Tableau XVI, section § 1.9.2).

1.9.3.1 Les avantage(s)

L'avantage principal de la méthode de formulation Superpave est sa simplicité d'utilisation. Elle n'implique aucune autre table de références et dépend en grande partie du niveau de circulation. L'ajout d'une description sommaire mais concise des routes typiques aide également à la sélection. Cette méthode tient compte de l'épaisseur et indirectement de la température.

1.9.3.2 Les désavantage(s)

Le désavantage majeur demeure dans le fait qu'il s'agit encore d'une méthode de formulation récente et que des changements peuvent toujours être apportés. De plus, il s'agit d'une technique qui ne prend pas en considération l'énergie de compaction en chantier versus celle en laboratoire.

Tableau XVII

Niveau de N_{design} Superpave révisé

ÉCAS ¹ de référence (millions)	Paramètres de compactage à la PCG			Description d'une route typique
	N_{initial} (V_i -cible)	N_{design} (V_i -cible)	N_{maximum} (V_i -cible)	
< 0,3	6 (≥8,5%)	50 (≥4,0%)	75 (≥8,5%)	<ul style="list-style-type: none"> • Route supportant des volumes de circulation très réduits • Route où la circulation serait considéré comme local; aucune route régionale, intra États ni inter États • Catégorie comprenant également les routes à usage spécial desservant des sites ou des secteurs récréatifs
0,3 à < 3	7 (≥9,5%)	75 (≥4,0%)	115 (≥8,5%)	<ul style="list-style-type: none"> • Nombreuses routes collectrices et rues d'accès • Catégorie incluant les rues urbaines à circulation moyenne et la majorité des routes de comté
3 à < 30	8 (≥11,0%)	100 (≥4,0%)	160 (≥8,5%)	<ul style="list-style-type: none"> • Nombreuses routes à 2 voies ou plus et routes à chaussées séparées à accès partiellement ou complètement contrôlé • Parmi les routes, rues urbaines de circulation moyenne à dense, nombreuses routes principales et itinéraires d'État
≥ 30	8 (≥11,0%)	125 (≥4,0%)	205 (≥8,5%)	<ul style="list-style-type: none"> • La grande majorité du réseau inter États des USA (urbain et rural) • Catégorie incluant des applications spéciales telles que les stations de pesage de camions ou les rampes pour camions sur des routes à 2 voies

Note 1 Valeurs établies sur une période de 20 ans

(Source C-SHRP, 1999)

CHAPITRE 2

DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DE FORMULATION (*MIX DESIGN*) POUR LES ENROBÉS SMA

2.1 Introduction

À la lueur de la revue de la littérature, jusqu'à maintenant aucune procédure de formulation adaptée aux enrobés SMA n'a été produite au Québec. Dans la perspective de contribuer à l'émergence d'une telle méthode de formulation pour les SMA, nous avons cherché à mettre en commun les différents concepts mis en relief dans le chapitre précédent. Le point le plus important à faire ressortir est la principale notion distinctive des enrobés SMA : l'enrobé SMA est un enrobé bitumineux à matrice de pierres selon laquelle une grande quantité de gros granulats est utilisée afin d'assurer un contact pierre-sur-pierre.

Compte tenu du fait que notre travail vise à préciser les paramètres de formulation des enrobés SMA pour la mise en application sur le territoire québécois, notre réflexion se fonde sur les concepts de la méthode de formulation LC du MTQ. Deux éléments nécessitent d'être précisés, soit : 1) établir une valeur probante de V_{be} et 2) préciser la valeur d'un N_{design} associé à ce nouveau type d'enrobé. Dans un deuxième temps, après avoir bien précisé les valeurs de V_{be} et de N_{design} , il devient impératif de préciser la méthodologie permettant d'optimiser la teneur en pierre dans l'enrobé de manière à s'assurer d'avoir un bon contact pierre-sur-pierre du squelette granulaire. Cette dernière notion ne demeure réalisable que dans la mesure où l'on s'assure d'une discontinuité marquée au sein de la structure granulaire de l'enrobé.

Établir une distribution granulaire optimale, permettant d'assurer un contact pierre-sur-pierre au sein de l'enrobé, nécessite de bien comprendre l'interaction entre les différentes particules qui gouverne ultimement les vides dans l'enrobé. À cet égard, nous sommes d'avis que la méthode de formulation LC pour l'enrobé SMA doit intégrer des limitations quant à la combinaison des particules grossières et intermédiaires et ce, en se basant sur une bonne compréhension de l'évolution des vides dans le squelette granulaire suivant son étendue granulaire et sa distribution. Dans ce contexte, la

théorie développée par Caquot en 1937 (Baron et Sauterey, 1982) sur la granulométrie optimale, est fortement préconisée et sera présentée sommairement ultérieurement.

2.2 Détermination du volume de bitume effectif : V_{be}

La première étape, afin de se conformer à la méthode de formulation LC, consiste à établir le volume de bitume effectif de départ pour la formulation. Ce volume est fixé selon les expériences précédentes et sert de point de départ pour la formulation. Pour préciser une valeur de V_{be} réaliste, nous avons donc étudié la formulation de divers enrobés SMA utilisés à travers le monde et celle d'enrobés similaires posés dans la province de Québec. Évidemment, pour préciser le V_{be} le plus réaliste à mettre en œuvre pour les SMA sur le territoire québécois, les facteurs météorologiques propres à chacun des pays répertoriés ont été pris en considération.

Le Tableau XVIII présente les différentes valeurs de V_{be} estimées obtenues pour chacune des régions sélectionnées ainsi que celles correspondantes pour des enrobés de composition se rapprochant aux SMA et mis en œuvre au Québec (cases bleues). Les données identifiées dans les cases jaunes représentent les pays dont les conditions climatiques s'apparentent à celles du Québec.

Les données de l'enrobé SMA d'origine (**MASTIMAC**) ne furent pas prises en considération pour les fins de calculs puisqu'il s'agit du tout premier enrobé. Ce dernier sera tout de même gardé en mémoire pour fin de comparaison. Les valeurs minimale, maximale et moyenne de V_{be} ont été calculées pour chaque type de SMA suivant les données de conception de chacun des enrobés tel que présentées à l'Annexe 15.

En définitive, en considérant les valeurs de V_{be} des pays à climat comparable à celui du Québec, tout en se limitant aux enrobés constitués de granulats de GNM⁶ de 10 mm, la plage de V_{be} peut-être fixée à priori entre 14,2 et 15,9 %.

⁶ Actuellement au Québec, on vise une exploitation de l'enrobé SMA en couche de roulement seulement sur des épaisseurs de couche comprises entre 35 et 55 mm limitant ainsi le GNM à 10 mm.

Tableau XVIII

V_{be} et données climatiques de différentes régions du monde

Pays	Type de SMA	V _{be} (%)			Température (°C)			Quantité de pluie (L/m ²)
		Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	
Allemagne	SMA d'origine	-	16,9	16,9	38,3	8,5	-26,1	583
	SMA 0/11 S	-	14,8	14,8	38,3	8,5	-26,1	583
Canada - Québec	SMA Berthier-sur-Mer	-	14,5	14,5	36,1	4,0	-36,6	1029
	Médiflex	14,8	14,1	13,3	36,1	4,0	-36,6	1029
Etats-Unis	SMA D10	15,8	14,8	13,8	37,2	9,2	-28,8	944
France	BBM 0/11	-	12,2	12,2	36,0	10,7	-19,2	975
Hongrie	ZMA 8	15,8	14,9	14,0	38,8	10,9	-18,8	596
Italie	SMA 0/11	14,9	13,5	12,0	36,6	12,5	-18,3	632
Norvège	SKA 11	-	14,4	14,4	30,0	4,2	-27,2	885
Pays-Bas	SMA 0/11 Type 2	-	14,9	14,9	35,0	10,0	-20,0	645
Portugal	0/12,5	-	11,6	11,6	39,4	16,0	-2,2	682
République Tchecoslovaque	AKMS (SMA 0/11)	15,8	15,3	14,8	35,0	7,9	-27,7	501
Royaume-Uni	SMA 10 mm	16,9	15,8	14,8	29,4	9,0	-12,7	851
Suède	ABS 11	17,1	15,3	13,5	31,1	7,4	-25,0	768
Moyenne		15,9	13,4	13,9	35,5	8,8	-23,2	765
Moyenne cases jaunes et bleues		15,9	14,7	14,2	34,8	6,5	-29,7	820

(source : météo France <http://www.ephemeride.com/meteo.jsp>)

2.3 Détermination du N_{design}

Nous possédons relativement peu d'informations et de renseignements quant à la valeur du N_{design} pour les enrobés SMA. Nous baserons donc notre sélection pour déterminer le N_{design} selon les connaissances acquises du MTQ à ce sujet suite aux différentes expériences que ce dernier a mené. Le N_{design} a donc été établi à 60 girations. Une analyse détaillée sera présentée en fin de mémoire afin de valider cette sélection.

2.4 Méthodologie de formulation proposée

Pour la formulation d'un enrobé SMA, suivant la détermination du V_{be} et du N_{design} , nous proposons dans un premier temps, une méthodologie articulée autour de 4 étapes :

- a. estimer une masse de départ de particules grossières (la pierre) dans l'enrobé;
- b. définir la masse de particules intermédiaires (0/2,5), de telle sorte qu'elle n'engendre pas le desserrement des particules grossières (la pierre);
- c. déterminer la masse optimale en pierre (> 5 mm) à partir d'un essai à la PCG;
- d. déterminer le dosage optimum en filler.

2.4.1 Estimation de la masse de pierre (> 5 mm) de départ à utiliser

La détermination du pourcentage optimal de pierre (> 5mm) à utiliser dans l'enrobé SMA est crucial afin d'assurer un contact pierre-sur-pierre. Pour avoir une idée du dosage en gros granulat à utiliser, nous allons dans un premier temps nous référer à l'essai de la masse volumique pilonnée à sec selon la densité brute du gros granulat. Cet essai est fait suivant la norme NQ 2560-060 « Granulats - Détermination de la masse volumique et du pourcentage des vides ». Le volume maximum de gros granulats pouvant occuper un volume précis est alors établi dans des conditions de serrage sans lubrifiant lequel va correspondre à la masse de pierre de départ à utiliser pour optimiser la formulation de l'enrobé SMA. Cette masse sera ultérieurement modifiée par la présence du bitume qui joue un rôle de lubrifiant. On pourra déterminer l'incidence du bitume à partir de l'essai à la PCG et, par rétro calculs en volumes

absolus, déterminer la valeur optimale réelle en pierre à utiliser. Cette dernière valeur obtenue à la PCG représente de façon plus réaliste la vraie teneur en pierre optimale au sein de l'enrobé SMA.

2.4.2 Détermination de la masse de particules intermédiaires : le granulat fin (0/2,5)

Après avoir déterminé une masse de pierre (> 5 mm) de départ, la teneur en particules intermédiaires peut être approximée à l'aide du bilan de la masse de granulat total. Cet exercice va permettre de préciser la formulation de départ, SMA_{départ}, pour optimiser les composantes de l'enrobé SMA à partir des matières premières disponibles. Par contre, à cette étape, il est très important de fixer les spécifications de formulation en vertu du pourcentage maximum d'agents stabilisants spécifiés.

Étant donné que le volume de bitume effectif, le volume de pierres et le dosage d'agents stabilisants sont, à ce stade-ci, déjà fixés, deux inconnus demeurent quant à la formulation de départ de l'enrobé SMA : 1) la teneur en filler et 2) la teneur en particules intermédiaires (0/2,5).

A priori, on peut écrire que :

$$M_{\text{GRANULATS}} = M_{\text{FILLER}} + M_{\text{FIBRE}} + M_{\text{PARTICULES INTERMÉDIAIRES}} + M_{\text{PIERRE}} \quad (2.1)$$

Pour la formulation de l'enrobé de départ, le pourcentage de filler est fixé à 8% par rapport à la masse de granulats. Cette valeur représente une valeur minimale de filler, laquelle permet de combler les vides laissés par l'agencement des particules grossières (pierre). En effet l'utilisation d'une granulométrie discontinue, requise pour assurer un contact pierre-sur-pierre, engendre une porosité importante au sein du squelette granulaire, laquelle nécessitera ultérieurement un dosage en filler nettement plus important. Le dosage de 8% est donc tout à fait réaliste et conservateur.

Dès lors, une seule inconnue demeure, la masse de granulats intermédiaires. On peut montrer que cette valeur devra être fonction de la masse de pierre utilisée pour éviter

des effets d'interaction. Cette dernière doit être judicieusement dosée de manière à ne pas interférer sur l'agencement des particules grossières dans l'enrobé. Pour déterminer les proportions de ce constituant, nous nous référons au concept élaboré par Caquot quant aux notions d'interaction entre les particules d'un combiné granulaire.

Notions d'effet de paroi et d'interférence

Pour bien comprendre l'interaction entre les particules d'un combiné granulaire, Caquot (1938) a étudié les effets de mélanger, suivant diverses proportions, deux granulats de taille unidimensionnelle différente. Lorsqu'on remplit un récipient avec un granulat, ou un mélange granulaire, une partie seulement du volume est prise par les grains (les solides) et l'autre partie, les interstices entre les grains, demeurent des espaces vides. Le rapport du volume des vides au volume des solides représente l'indice des vides et caractérise en quelque sorte l'arrangement granulaire. Rappelons que pour un milieu infini, l'indice des vides d'un granulat constitué de particules unidimensionnelles est à toute fin pratique indépendante de la taille de la particule. En mélangeant 2 granulats unidimensionnels suivant différentes proportions, on constate alors que l'indice des vides du combiné diminue jusqu'à une valeur optimale, pour laquelle correspond une combinaison optimale.

La Figure 8 montre l'évolution de l'indice des vides (e) en fonction de la proportion de pierre dans un combiné binaire d'une pierre (g) avec un sable (f) ($\% \text{ gros} = (g / g + f) * 100\%$). Ces résultats, obtenus expérimentalement par Powers, montrent que l'indice des vides optimal dépend du rapport des diamètres des particules en jeu et ce, à cause notamment de l'interaction entre ces particules. À ce titre, deux types d'interaction ont été défini par Caquot : l'effet de paroi et l'effet d'interférence.

L'effet de paroi est lié à l'interaction entre les grains et tout type de paroi (tuyau, coffrage, etc.) mis en contact avec la masse granulaire : lorsqu'on plonge un grain grossier (G) au sein d'un volume infini de petits grains (F), la paroi du gros grain perturbe localement à l'interface l'arrangement des petits grains dont la porosité augmente en proportion à la surface du gros grain. La zone en bleu à la Figure 9

montre l'effet de paroi quant à l'indice des vides d'un combiné granulaire lorsqu'on augmente la fraction en gros grains (g) au sein des particules fines (f).

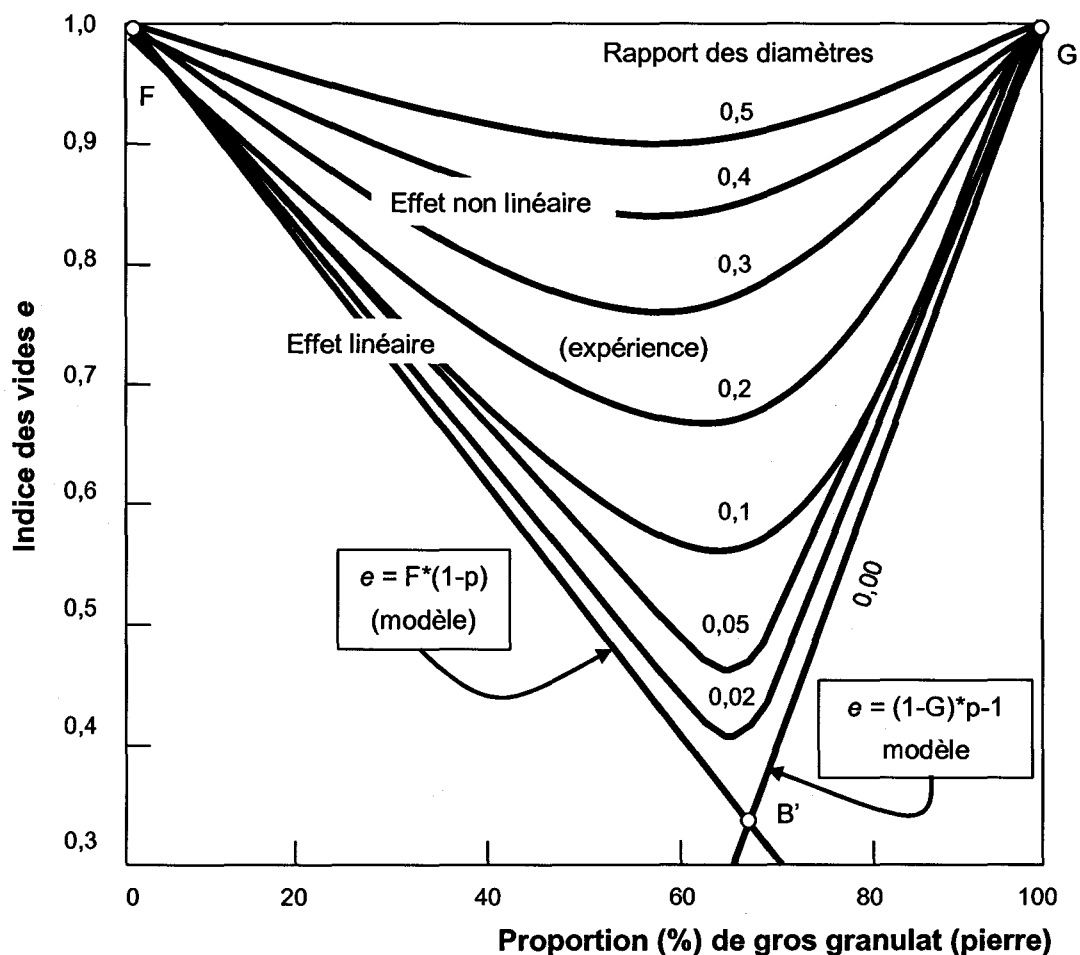


Figure 8 Évolution de l'indice des vides d'un combiné binaire gros (G) et fin (F) en fonction de la proportion de gros dans le combiné et ce pour divers rapport des diamètres de taille de particules ($\varnothing_{\text{gros}}/\varnothing_{\text{petit}}$) (Perraton, 2004)

Par ailleurs, lorsqu'on continue à augmenter la proportion de gros grains, il arrivera un moment où une certaine quantité des grains fins sera emprisonnée dans les interstices délimitées par les gros grains de sorte que, au-delà de l'effet de paroi, l'indice des vides des grains fins augmente par interférence : l'agencement des petits grains dépendra non seulement des aires des parois des gros grains (effet de paroi) mais également de la disposition propre des particules grossières, c'est-à-dire de la forme de ces

interstices. On peut également illustrer la notion d'interférence en pensant à l'effet produit par l'introduction d'un petit grain au sein des interstices d'un volume infini de gros grains. Au fur et à mesure où l'on augmente la proportion de petits grains fins, il arrive un moment où l'ajout d'un seul petit grain force l'écartement des gros grains par desserrement modifiant ainsi son agencement spatial : il y a interférence. La zone en jaune à la Figure 9 montre l'effet d'interférence quant à l'indice des vides d'un combiné granulaire (gros + fin).

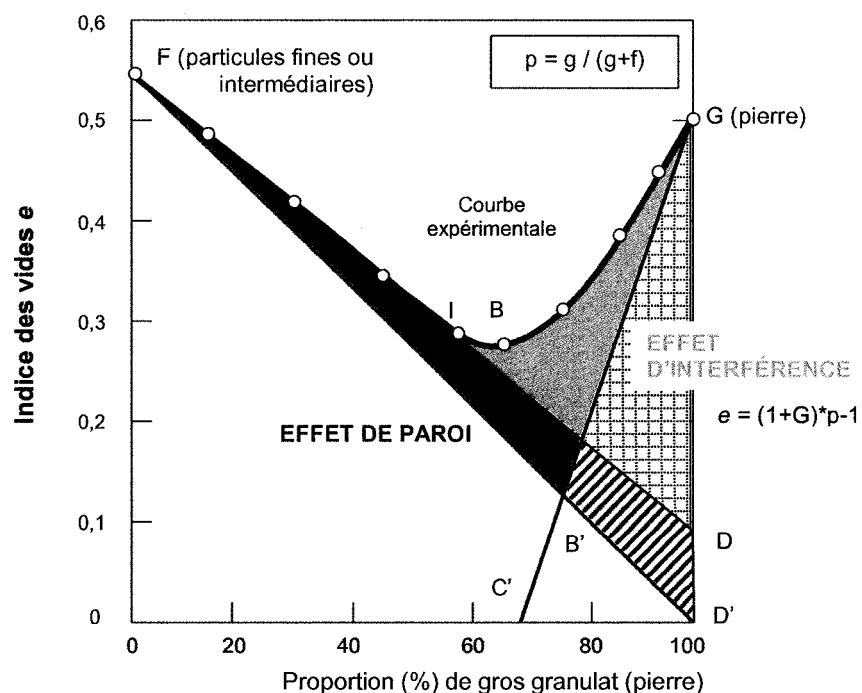


Figure 9 Représentation de l'effet d'interférence d'après Powers (F(particules fines ou intermédiaires) + G(pierre) = 1) (Perraton, 2004)

À l'aide des travaux de Powers, nous sommes donc en mesure d'énoncer que le dosage en granulats intermédiaires doit se faire de façon judicieuse afin d'éviter le plus possible l'apparition d'interférence. La Figure 8 montre l'effet du rapport des diamètres sur l'importance de l'interférence induit : si le rapport des diamètres ($\varnothing_{\text{gros}}/\varnothing_{\text{petit}}$) augmente, la zone jaune de la Figure 9 augmente. Suivant les courbes présentées à la Figure 8, la proportion de particules intermédiaires (F) peut être directement liée à la proportion de la masse de pierre de manière à limiter son niveau d'interférence (minimiser l'aire jaune). Cette relation est établie en fonction du niveau d'interférence

et du rapport des diamètres des particules. Il est entendu que le niveau d'interférence souhaité doit être le plus faible possible afin d'éviter une augmentation de l'indice des vides et un desserrement des particules grossières (la pierre) au sein du squelette granulaire.

2.4.3 Évaluation de l'aptitude au compactage de la formulation de départ, SMA_{départ}

À partir des dosages établis à la section précédente, l'aptitude au compactage de la formulation de départ, SMA_{départ}, est évaluée à la PCG en référence au N_{design} sélectionné. Cette étape servira, entre-autres, à déterminer la teneur optimale réelle en pierre. Cette dernière est directement reliée à la texture et à la forme des granulats des matières premières et elle diffère de la valeur obtenue à l'essai de pilonnage à sec puisque l'essai à la PCG engendre une énergie de compaction différente de celle induite par le pilonnage à la main. De plus, l'incorporation d'une quantité de bitume lubrifie et favorise l'agencement granulaire lors de la compaction.

Il est important de noter que cet essai à la PCG de la formulation SMA_{départ} va donner lieu à des vides non-conformes : cette étape vise à déterminer la teneur optimale en pierre de l'enrobé SMA, laquelle est déterminée à partir de la masse volumique de l'enrobé (D_{mb}) établie à la PCG.

2.4.4 Détermination du dosage optimum en filler

Ayant déterminé un taux de bitume effectif et un volume de pierre optimale (> 5 mm), la seule option restante pour ajuster les composantes de l'enrobé SMA de manière à ce qu'il soit conforme aux exigences liées à l'aptitude à la compaction (les vides à la PCG) est d'ajuster le pourcentage de particules fines dans le mélange.

Plusieurs mélanges sont alors confectionnés à différentes teneurs en filler tout en gardant constant le pourcentage de pierre ainsi que le taux de bitume effectif. L'ajout de filler améliore l'aptitude au compactage jusqu'à un certain niveau. Au-delà de ce niveau, l'effet contraire sera observé, c'est-à-dire une diminution du taux de compaction

ou une augmentation du pourcentage de vides observés dans le mélange (Lamothe, 2003). La Figure 10 illustre bien l'effet néfaste d'un surdosage en filler associé à la notion d'interférence.

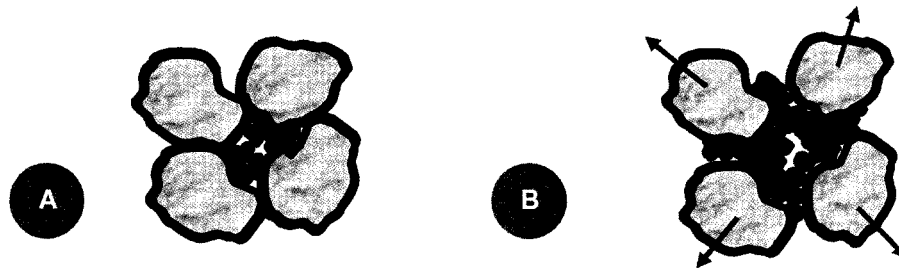


Figure 10 Effets du surdosage en filler : (A) dosage optimum en filler (B) surdosage qui génère une augmentation des vides : effet d'interférence

Le dosage en filler s'avère donc une étape où la précision des calculs et l'ajout des proportions demande une attention particulière pour s'assurer réellement de l'introduction exacte des proportions calculées.

2.4.5 Modification de la formulation pour obtenir les caractéristiques recherchées

Après avoir établi la formule souhaitée, plusieurs autres essais de contrôle sont exigés : ornierage, tenue à l'eau, autres : la formulation de SMA doit satisfaire ces performances et certaines modifications à la formule initiale peuvent alors être nécessaires afin de répondre à ces critères.

2.5 Programme expérimental

Le programme expérimental, tel qu'illustré à la Figure 11 regroupe trois principales étapes. Ces étapes ont été sélectionnées puisqu'elles regroupent chacune d'entre elles des phases distinctes représentant le cheminement requis pour préciser l'ensemble des exigences de formulation d'un enrobé.

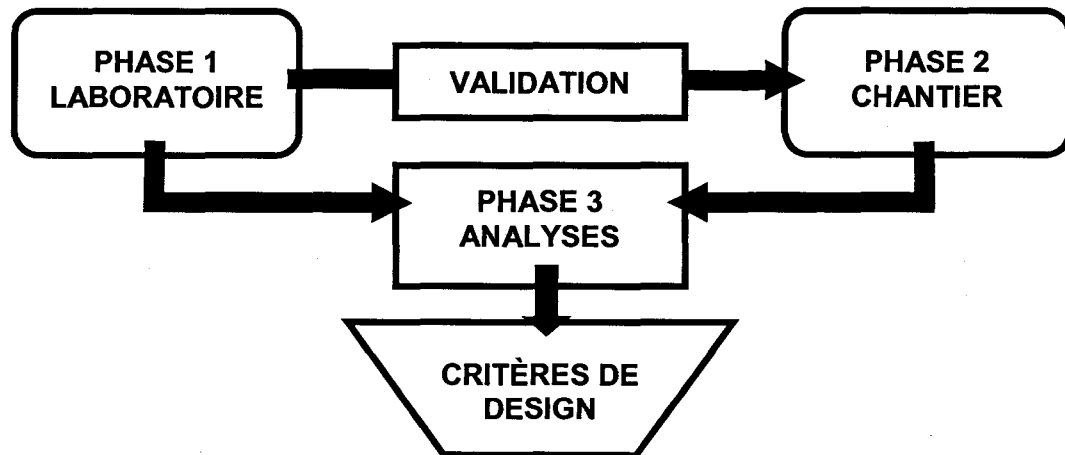


Figure 11 Principales phases du programme expérimental

2.5.1 PHASE 1 : Formulation en LABORATOIRE

Lors de la phase 1, la première étape va consister à évaluer la méthode de formulation proposée par la formulation complète d'un nouvel enrobé. La formulation d'un enrobé SMA sera réalisée en corrélation à la procédure établie dans le norme LC 26-004 « Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du Laboratoire des chaussées ». Le principal objectif de cette étape est d'illustrer le nouveau procédé de formulation mis sur pied et présenté précédemment à la section § 2.4 pour les enrobés SMA.

Le volume de bitume effectif ciblé est fixé à 15,2% soit, la valeur moyenne de la plage ciblée précédemment. Plusieurs essais sont prévus afin d'établir le taux de filler optimum.

2.5.2 PHASE 2 : Réalisation d'une planche d'essai en CHANTIER

À partir de la formulation élaborée en laboratoire (Phase 1), l'enrobé SMA sera produit en usine d'enrobage et mis en œuvre sur une planche d'essai en chantier. Une analyse complète de l'enrobé est alors prévue. Chaque gâchée produite en usine sera testée et analysée selon les essais suivants :

- a. analyse granulométrique;
- b. détermination de la teneur passant le tamis 80 μm ;
- c. détermination de la teneur en bitume;
- d. détermination du retenu au tamis 5 mm;
- e. essais à la PCG.

De manière générale, les performances de l'enrobé produit seront analysées selon les essais suivants :

- a. essais d'orniérage;
- b. essais de retrait thermique empêché (TSRST);
- c. détermination des modules complexes;
- d. détermination du coefficient de dilation thermique;
- e. évaluation du taux de compaction en chantier.

2.5.3 PHASE 3 : Analyse des résultats et établissement des critères de design

La dernière phase, la phase d'évaluation et d'analyse des résultats sera conduite en trois étapes. La première vise à valider le choix du V_{be} pour la confection d'enrobé SMA. La seconde permettra de présenter les limites acceptables en cours de production pour assurer un produit final de qualité. Finalement, la troisième étape vise à valider le choix du N_{design} établi à priori à 60 girations et ce, à partir des résultats anticipés de la mise en oeuvre de la planche d'essai de la phase 2.

CHAPITRE 3

DESCRIPTIONS DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LES PHASES 1 ET 2

3.1 Introduction

Le présent comporte deux volets. Le premier consiste à énumérer dans un premier temps les caractéristiques de chacun des constituants de l'enrobé utilisé tant dans la phase 1 que dans la phase 2. Le second volet sert quant à lui à décrire les essais de contrôle en laboratoire qui auront été effectués.

3.2 Descriptions des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans ce programme expérimental ont été sélectionnés en fonction de leur disponibilité et de leur proximité avec la planche d'essai. Des essais au laboratoire LUCREB ont été effectués afin de valider les caractéristiques générales des matériaux sélectionnés. Les principales caractéristiques de chacun des composants seront présentées dans ce chapitre.

3.2.1 Gros granulats de calibre 5-10 mm

Le gros granulat utilisé (Figure 12) pour la confection des enrobés est une pierre concassée de calibre 5-10 mm. Ce granulat est de nature minéralogique de type grès impur. Une granulométrie a également été conduite par le LUCREB sur le granulat pour fin de vérification et de validation. Les caractéristiques propres à ce granulat sont identifiées au Tableau XIX.

La granulométrie LUCREB identifiée dans le Tableau XIX représente la moyenne des essais effectués (15 essais) puisqu'à chaque série de confection de mélanges, une granulométrie a été pratiquée. Cette procédure s'est avérée indispensable à cause des fluctuations (de 0,8 à 2,7%) du pourcentage passant le tamis 80 μm à l'essai de granulométrie du granulat lavé. La granulométrie du gros granulat est illustrée à la Figure 13. Cette granulométrie possède un coefficient d'uniformité de 1,3 et un

coefficient de courbure de 0,8. Par conséquent, elle est classée uniforme, très serrée et continue.

Les données révèlent que ce type de granulat répond aux critères de catégorie 1 de la norme NQ 2560-14/2002 « Travaux de génie civil – Granulats ». La Figure 11 illustre bien l'aspect et la forme de ce granulat. Finalement, la masse volumique, pilonnée à sec du gros granulat, est de 1484 kg/m^3 pour un pourcentage de vide égal à 43,7%.

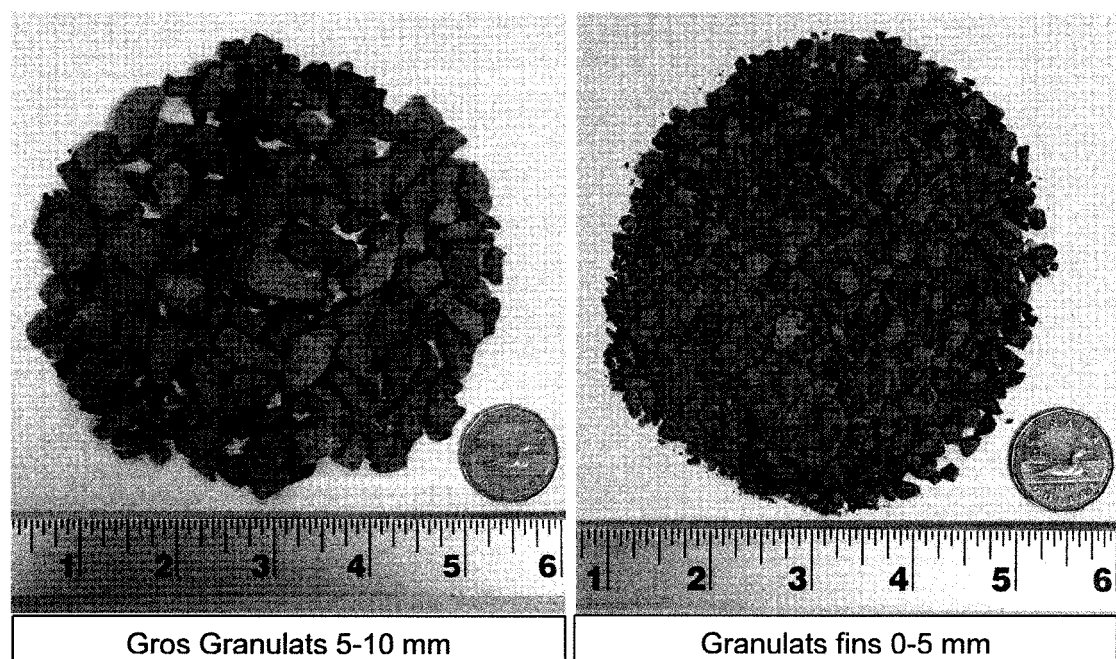


Figure 12 Illustration des gros granulats et des granulats fins échantillonnés (été 2004)

3.2.2 Granulats fins de calibre 0-5 mm

Tout comme le gros granulat, le granulat fin provient également de la même carrière. Leur nature minéralogique est aussi du grès impur. Encore une fois, une analyse granulométrique a été réalisée pour fin de vérification et de comparaison.

Les caractéristiques de ce granulat sont également présentées dans le Tableau XIX. La forme et la texture sont observables à la Figure 12.

Tableau XIX
Caractéristiques des granulats

Propriétés	Norme	5-10 mm lavé		0-5 mm lavé		
		Carrière	LUCREB	Carrière	LUCREB	
Densité brute (D_{gb})	LC-21-065/066/067	2,645	2,617	2,635	2,606	
Densité apparente (D_{ga})	LC-21-065/066/067	2,687	2,686	2,700	2,664	
Absorption à l'eau (%)	LC-21-065/066/067	0,590	0,974	0,920	0,830	
Friabilité (%)	LC-21-080	n/d	n/d	26,2	n/d	
Fragmentation (%)	LC-21-100	100	n/d	n/d	n/d	
Particules plates	LC-21-265	Cat. 1	n/d	n/d	n/d	
Particules allongées	LC-21-265	Cat. 1	n/d	n/d	n/d	
Coefficient d'écoulement (C_e)	LC-21-075	n/d	n/d	103,8	n/d	
Résistance à la fragmentation : LA (%)	BNQ 2560-400 LC-21-400	20,4	n/d	n/d	n/d	
Résistance à l'usure : M.D. (%)	BNQ 2560-070 LC-21-101	9,5	n/d	18,7	n/d	
Propreté au 80 μ m (%)	CSA A23.2.5	1,3	1,3	n/d	11,1	
Coefficient polissage par projection	LC-21-102	0,54	n/d	n/d	n/d	
Mottes d'argiles & particules friables (%)	CSA-A23.2.3	n/d	n/d	0,66	n/d	
Particules inférieures à 5 μ m (%)	NQ 2501-025	n/d	n/d	1,1	n/d	
$\rho_{pilonnée}$ à sec (kg/m^3)	BNQ 2560-060	n/d	1 484	n/d	n/d	
Friabilité (%)	BNQ 2560-080	n/d	n/d	26,2	n/d	
Fragmentation (%)	LC 21-100	100	n/d	n/d	n/d	
Granulométrie (tamisats) (%)	14,0 mm	BNQ 2560-040 LC-21-040	100	100	100	100
	10,0 mm		88	89	100	100
	5,0 mm		9	13	97	99
	2,50 mm		2	3	68	65
	1,25 mm		2	2	45	43
	630 μ m		2	2	33	31
	315 μ m		2	2	25	23
	160 μ m		2	2	18	16
	80 μ m		1,3	1,3	12,1	11,1

La granulométrie du granulat fin, illustrée à la Figure 13, possède un coefficient d'uniformité de 29,3 et un coefficient de courbure de 1,9. Elle est donc classée comme uniforme, étalée et continue.

3.2.3 Sable

Le sable de calibre 0-5 mm provient de la région de Durham Sud. Les premiers enrobés réalisés dans le cadre de ce programme d'essai ont été confectionnés en intégrant du sable roulé dans le mélange. La proportion du sable et de la pierre 0-5 mm a été fixée à 25% et 75% respectivement. Ce combiné devait être nécessaire afin d'assurer un bon dosage et un bon apport des matériaux dans les bennes froides de l'usine d'enrobage. La granulométrie du sable de la carrière ainsi que celle effectuée au LUCREB sont identifiées au Tableau XX ainsi qu'illustrées à la Figure 13. La granulométrie du sable possède un coefficient d'uniformité de 2,7 et un coefficient de courbure de 0,9 ainsi qu'un module de finesse de 1,8. Cette granulométrie est donc classée comme uniforme, serrée et continue.

Après plusieurs essais, la contrainte associée à l'utilisation du sable roulé s'est rapidement résolue en favorisant l'utilisation à 100% du granulat 0-5 mm puisque le dosage ciblé en sable était trop faible de sorte que le système d'alimentation ne pouvait assurer une précision adéquate.

3.2.4 Filler minéral

Le filler minéral d'appoint utilisé provient directement de la centrale d'enrobage. Un prélèvement pour analyse fut pris à la source à l'aide d'un bélier mécanique. Le filler d'appoint possède donc, par conséquent la même nature minéralogique que les différents matériaux utilisés à l'usine. La granulométrie ainsi que la densité du filler minéral sont présentées dans le Tableau XXI. La granulométrie effectuée au LUCREB a été effectuée par sédimentométrie conformément à la norme BNQ 2501-025 – Sols – Analyses granulométriques des sols inorganiques.

Tableau XX
Caractéristiques du sable

Propriétés		Norme	Sable	
			Carrière	LUCREB
Densité brute (D_{gb})		LC-21-065/066/067	2,656	n/d
Densité apparente (D_{ga})		LC-21-065/066/067	2,730	n/d
Absorption à l'eau (%)		LC-21-065/066/067	1,020	n/d
Friabilité (%)		LC-21-080	21,1	n/d
Coefficient d'écoulement (C_e)		LC-21-075	72,2	n/d
Mottes d'argiles & particules friables (%)		CSA-A23.2.3	0,38	n/d
Particules inférieures à 5 μm (%)		NQ 2501-025	0,1	n/d
Particules inférieures à 5 μm (%)		NQ 2501-025	0,1	n/d
Résistance à l'usure : M.D. (%)		BNQ 2560-070 LC-21-101	19,6	n/d
Granulométrie (tamisats) (%)	14,0 mm	BNQ 2560-040 LC-21-040	100	100
	10,0 mm		100	100
	5,0 mm		97	97
	2,50 mm		94	93
	1,25 mm		87	87
	630 μm		76	76
	315 μm		52	51
	160 μm		15	16
	80 μm		3,9	3,2

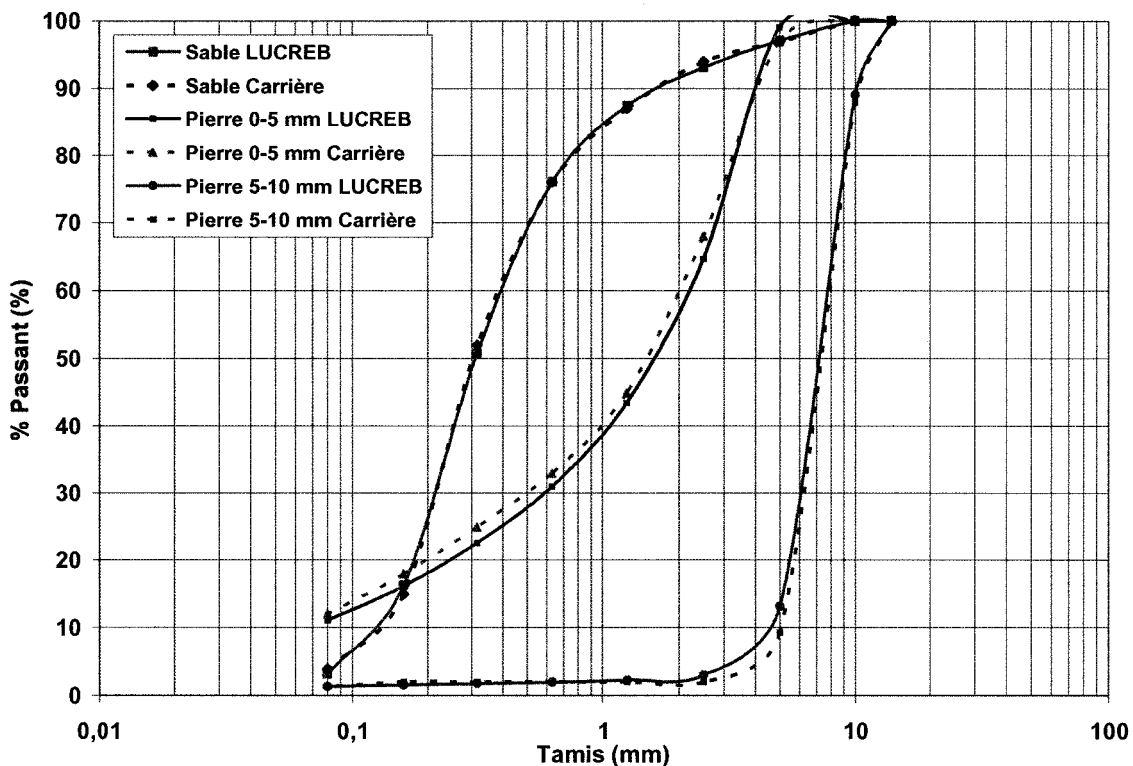


Figure 13 Illustration des granulométries Carrière et LUCREB du gros granulat, du granulat fin ainsi que du sable

Tableau XXI

Caractéristiques du filler

Propriétés		Norme	Filler minéral d'appoint	
			Carrière	LUCREB
Densité brute (D_{gb})		LC-21-065/066/067	2,640	n/d
Granulométrie (tamisats) (%)	160 μm	BNQ 2560-040 LC-21-040	n/d	100
	80 μm		n/d	69,9
	41 μm		n/d	69,6
	30 μm		n/d	65,0
	19 μm		n/d	52,2
	12 μm		n/d	40,0
	9 μm		n/d	32,9
	6 μm		n/d	26,9
	3 μm		n/d	16,1
1 μm	n/d	9,5		

3.2.5 Liant bitumineux

Le bitume employé pour la confection de l'enrobé a été produit par la compagnie Petro Canada (Raffinerie de Montréal #lot : 03125-2 / 13 juillet 2003). Ce bitume est standard, classe PG 58-28, sans ajout de polymère. De plus, ce type de bitume répond aux exigences du MTQ pour la production d'enrobé bitumineux à fibres d'amiante.

L'attestation de conformité du bitume est disponible à l'Annexe 16 et ses principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau XXII.

Tableau XXII

Caractéristiques du bitume PG 58-28

Essais Conventionnels	Valeur
Masse volumique (g/cm ³) à 25 °C	1,0249
Stabilité au stockage (°C)	0,5
Viscosité Brookfield à 135 °C (Pa*s)	0,273
Viscosité Brookfield à 165 °C (Pa*s)	0,079
Température élevée de caractérisation T _e (°C)	59,7
Température basse de caractérisation T _b (°C)	-30,1
Module de rigidité 60 (MPa)	76
Température de malaxage (°C)	155 ¹
Température de compactage (°C)	145 ¹

Note 1 Valeurs calculées selon la norme LC-26-003 pour enrobés additionnés de fibre d'amiante

3.2.6 Agents stabilisants

Les fibres d'amiante utilisées pour la confection de l'enrobé SMA proviennent de la compagnie LAB Chrysotyle et sont de type 7M-450. Ces fibres sont généralement employées dans les enrobés de type EGA-10 du MTQ. Les fibres ont été acheminées au chantier dans des sacs ignifuges et hermétiques afin de minimiser les risques sur la santé des travailleurs. L'introduction des fibres dans le mélange en usine a été assurée par un convoyeur sur lequel on disposait un sac complet par fournée. Évidemment, le

dosage de chaque gâchée a été établi en concordance à la taille des sacs de fibres disponibles. La fiche technique et signalétique complète des fibres d'amiante est disponible aux Annexes 17 et 18. La granulométrie ainsi que quelques caractéristiques principales sont identifiées dans le Tableau XXIII.

Tableau XXIII

Caractéristiques des agents stabilisants

Caractéristiques		Fiche technique
Nom de commerce		Amiante Chrysotile
Famille chimique		Silicates hydratés fibreux
pH		± 10
Apparence		Fibres blanches mates
Densité relative brute		2,4 à 2,6
Surface spécifique (cm ² /g)		9 000
Granulométrie (% retenu sur tamis)	3,35 mm ¹ (tamis #6)	0,0
	1,40 mm ¹ (tamis #14)	1,0
	0,850 mm ¹ (tamis #20)	9,0
	0,656 mm ¹ (tamis #28)	23,0
	0,500 mm ¹ (tamis #35)	16,0
	0,230 mm ¹ (tamis #65)	14,0
	0,230 mm ¹ (tamis #65)	37,0

Note 1 Valeurs approximatives équivalentes des tamis impériaux

3.3 Descriptions des essais de contrôle en laboratoire

Les essais de contrôle, qui sont énumérés dans cette section, ont comme but premier d'étudier la performance des enrobés formulés et de voir leur variabilité générée par la modification de certains critères de formulation très spécifiques dont la variation du volume de bitume effectif, la variation de la teneur en particules fines, etc.

3.3.1 Détermination de l'aptitude au compactage

Lors de la détermination de l'aptitude au compactage, les essais ont été réalisés suivant la norme LC 26-003 « Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud, à la presse à cisaillement giratoire ». Une exception subsiste en regard de la norme. Le nombre d'échantillons testés pour chaque enrobé a été fixé à 2 plutôt que 3. Deux raisons justifient cette sélection. Premièrement, la corrélation et l'uniformité entre les 2 premiers essais a toujours été satisfaisante. Deuxièmement, les échantillons soumis à cette procédure ne représentaient qu'une étape dans le processus visant à élaborer la formulation finale pour laquelle la norme a été rigoureusement respectée. En définitive, la formulation finale a été caractérisée suivant la procédure complète normalisée, c'est-à-dire à partir de 3 échantillons confectionnés au moment optimal de la sélection du mélange devant être posé en chantier sur la planche d'essai.

3.3.2 Mesure de la résistance à l'orniérage

Pour la mesure de la résistance à l'orniérage en laboratoire, 2 plaques d'enrobés ont été confectionnées à l'aide du compacteur de plaques de type LCPC. Les dimensions des plaques sont de 500 mm de longueur par 180 mm de largeur par 50 mm d'épaisseur. Ces plaques ont été réalisées conformément à la norme préliminaire LC 26-400 « Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé ».

La détermination de la résistance à l'orniérage a été réalisée en laboratoire à l'aide de l'orniéreur de type LCPC conformément à la norme LC 26-410 « Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage ». Les paramètres de fonctionnement sont illustrés au Tableau XXIV. La température de contrôle a été maintenue à $60\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ tout au long des essais. Si la température venait à dépasser cette limite, l'essai était immédiatement arrêté et repris lorsque la température se retrouvait à nouveau dans la plage permise. La température a été contrôlée à l'aide de la sonde de régulation située au centre de la masse dans le coin inférieur droit (20 mm du côté droit et 50 mm du bas de la plaque) de la plaque gauche ainsi qu'à l'aide de

deux sondes de mesure situées au milieu de chaque plaque à $60 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ du centre de la plaque.

Tableau XXIV

Paramètres de fonctionnement de l'orniéreur LCPC

Paramètres	Prescriptions
Course du pneumatique	$410 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$
Fréquence du mouvement relatif	$1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$
Pression du pneumatique	$6 \text{ bars} \pm 0,3 \text{ bar}$ en début d'essai
Charge roulante appliquée	$5\,000 \text{ Newtons} \pm 50 \text{ Newtons}$
Écart entre l'axe de la trace et l'axe théorique de l'éprouvette	Inférieure à 5 mm
Angle d'envirage	Absente
Température à l'intérieure de la plaque	$60 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$
Température à l'intérieure de l'enceinte de l'orniéreur	Maximum de 75 °C

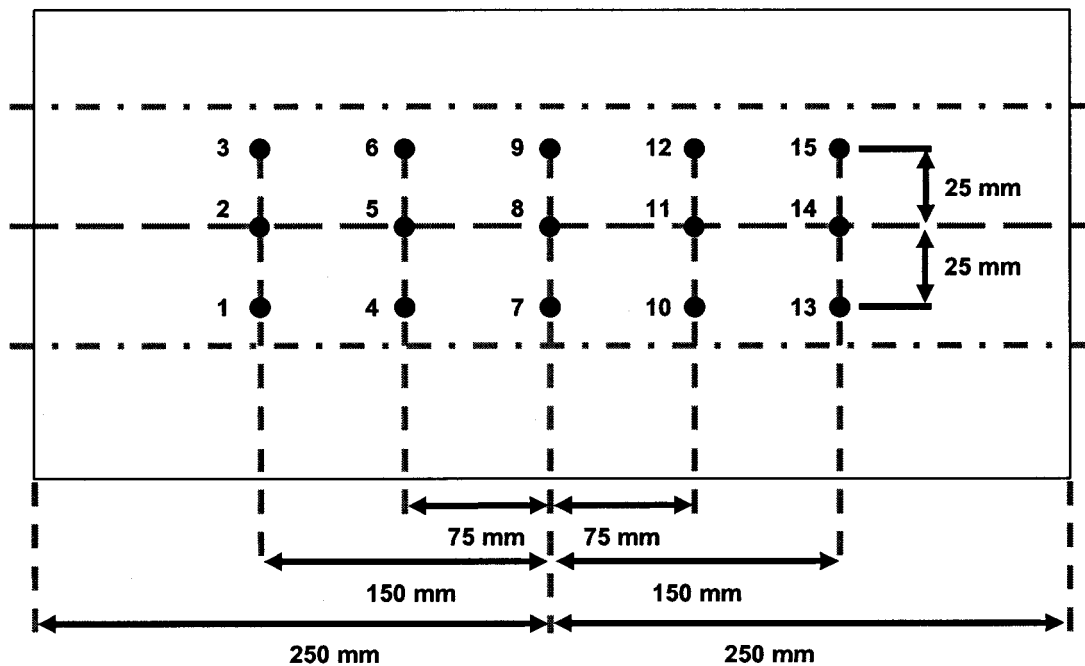


Figure 14 Localisation des points de mesure après chaque seuil de contrôle

Tel que stipulé dans la norme et tel qu'illustré à la Figure 14, 15 mesures à des endroits bien déterminés ont été effectuées sur chaque plaque. Les déformations ont été mesurées après 100, 300, 1 000, 3 000, 10 000, 20 000, 30 000 et 60 000 passages. Compte tenu de la performance exceptionnelle des enrobés SMA, l'étude a été prolongée à 60 000 passages. Cette décision a été prise afin d'étudier le phénomène d'orniérage suite à un haut taux de sollicitation.

3.3.3 Mesure du retrait thermique empêché : 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 ».

Cet essai demande l'utilisation d'une presse selon laquelle le déplacement peut être contrôlé très précisément en fonction de la déformation et de la force induite. Une enceinte thermique ainsi que des extensomètres capteurs de mouvement sont également nécessaires au bon fonctionnement de l'essai.

Une attention particulière doit être apportée lors de la pose des extensomètres sur l'éprouvette. La même procédure se doit d'être respectée pour assurer une uniformité de prise des données. Les capteurs sont positionnés suivant un angle d'espacement de 120° tel qu'illustré à la Figure 15.

Ces capteurs ont une longueur totale de 165 mm et sont constitués d'une tige en invar de 115 mm. L'invar est un alliage composé de 65% de nickel et de 35% d'acier (White 1999). L'invar possède un coefficient de dilation thermique faible, compris entre 0,7 et $1,6 \times 10^{-6}$ mm/mm °C (Callister, 2000). Néanmoins, en cours de refroidissement, le système électronique varie et engendre une dérive du système à laquelle s'ajoute la variation de longueur imputable à la tige d'INVAR. En conséquent, le système de mesure de déplacement a été préalablement calibré à l'aide d'une éprouvette étalon en

aluminium. La procédure consiste à placer cette éprouvette étalon dans l'enceinte thermique, à l'instrumenter à l'aide des capteurs de déplacements et à faire varier la température. La variation de longueur mesurée par les extensomètres est induite par la dilatation de l'invar, la dérivée des systèmes électroniques et les changements de longueur de l'éprouvette sous les variations de température. Bien connaître les biais de mesure est essentiel car lors de l'essai, on cherche à empêcher la déformation longitudinale de l'éprouvette en cours de refroidissement. Ce facteur de correction sera pris en compte afin de réellement empêcher le mouvement induit par une éprouvette d'enrobé bitumineux soumise au même traitement.

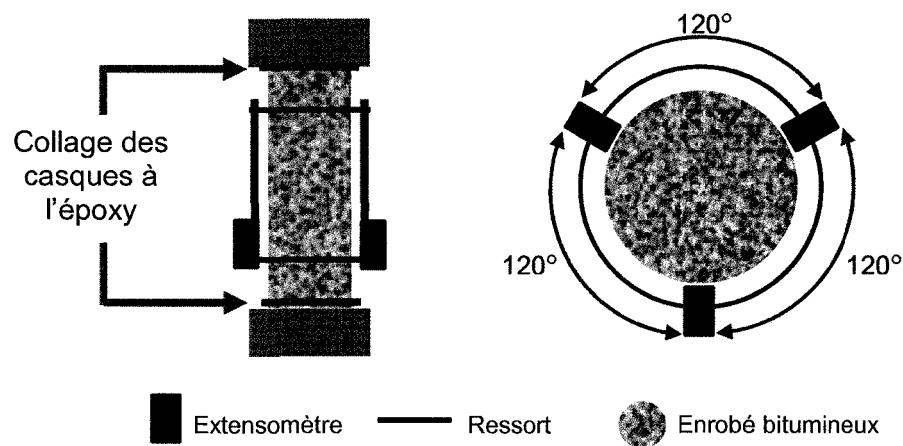


Figure 15 Schématisation des éprouvettes pour l'essai TSRST et identification de la localisation des extensomètres

Le principe de fonctionnement de l'essai TSRST est de mesurer la contrainte dans l'éprouvette soumise à un taux de refroidissement afin de maintenir la déformation à zéro tout au long de l'essai. Le système mécanique contrôlé par la presse assure en temps réel une réaction instantanée provoquant un développement de force équivalent pour s'opposer à ce mouvement induit par les changements thermiques.

Il est à noter que la fixation de l'éprouvette aux casques d'aluminium est effectuée à l'aide d'une époxy de type SIKADUR 31 HIMOD GEL. Pour assurer un maximum d'adhérence, les casques sont préalablement nettoyés au jet de sable. Par la suite, les casques ainsi que l'éprouvette sont nettoyés à l'acétone pour retirer tout dépôt de

poussières et de matières grasses. L'application de l'époxy est la dernière et la plus critique des étapes, car on doit s'assurer de créer une pellicule de colle qui enrobe complètement l'enrobé sans laisser de vides entre l'éprouvette et le casque d'aluminium.

Avant le lancement du refroidissement de l'enceinte, l'éprouvette est soumise à une période de conditionnement de 6 heures à 5 °C. Suite à cette baisse de température, le refroidissement de l'éprouvette est lancé. Tout au long de l'essai, la longueur de l'éprouvette est maintenue constante et ce malgré le fait que la température dans la chambre thermique est abaissée à un taux de 10 °C / heure.

Le maintien de la longueur conduit à la rupture de l'éprouvette. Ce maintien est alors assuré par la déformation moyenne des 3 extensomètres disposés sur l'éprouvette. Suite à la rupture, les données sont recueillies et analysées. Ces données sont illustrées à l'aide de la Figure 16:

La description des données recueillies est la suivante :

- a. Pente No.1 :
Cette pente représente le comportement pendant la période de relaxation ;
- b. Pente No.2 :
Cette pente représente une valeur analogue au module élastique dans un diagramme : contrainte versus déformation d'un matériau élastique;
- c. Température de transition vitreuse (T_g) :
Cette température représente la fin de la période de relaxation et le début du comportement linéaire en fonction de la température;
- d. Température de transition bissectrice :
Cette température représente la jonction de la Pente No.1 et de la Pente No.2 et indique la température de transition entre deux droites de comportement bilinéaire simplifié d'un matériau;

- e. Contrainte de rupture maximale :
 Cette valeur représente la contrainte maximale appliquée à l'éprouvette juste avant sa rupture;
- f. Température associée à la contrainte de rupture maximale :
 Cette température est tout simplement la valeur obtenue lors de l'atteinte de la contrainte maximale;

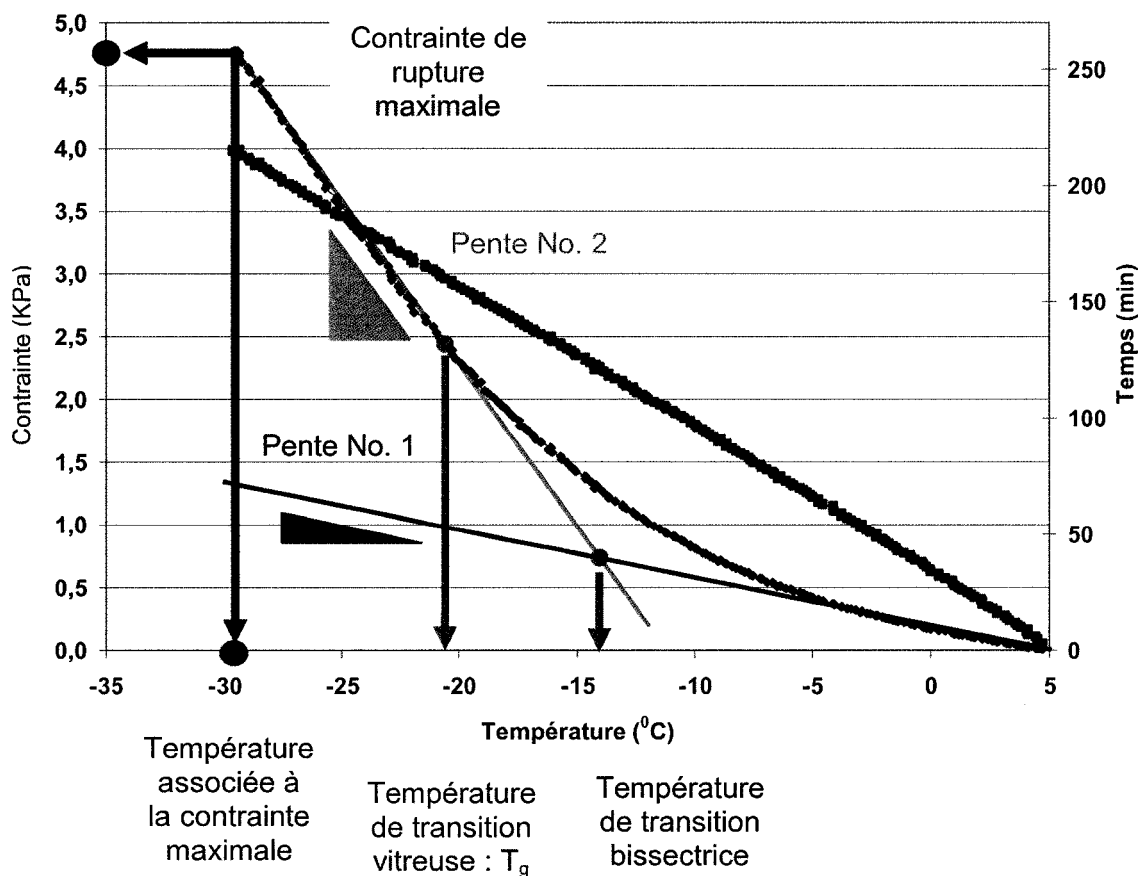


Figure 16 Données recueillies et analysées pour l'essai TSRST

3.3.4 Mesure des propriétés rhéologiques des enrobés

Afin de déterminer les propriétés rhéologiques des enrobés en petites déformations, la mesure des modules complexes a été effectuée. Le module complexe est le coefficient de proportionnalité entre l'amplitude sinusoïdale complexe de la contrainte, à une

fréquence « ω » donnée, et l'amplitude sinusoïdale complexe de la déformation (Di Benedetto et De La Roche, 2004). L'essai pour mesurer le module complexe consiste à soumettre en conditions isothermes le matériau à des sollicitations cycliques, le plus souvent sinusoïdales, de fréquences variées. Ces essais sont effectuées dans le domaine des petites déformations pour lequel l'enrobé se comporte principalement comme un matériau viscoélastique linéaire ($\epsilon_0 < 10^{-4}$). La sollicitation peut être en mode de contrainte ou en mode de déformation.

On définit le module complexe par analogie avec le module de YOUNG en élasticité.

$$E^*(i\omega) = \frac{\sigma^*}{\epsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} e^{i\varphi} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (3.1)$$

où $|E^*|$ est appelé le module de rigidité de l'enrobé.

L'angle φ est compris entre 0 et $\pi/2$. Il caractérise le comportement visqueux du matériau. Sa valeur donne une idée sur la prédominance élastique ou visqueuse du comportement. Pour un matériau parfaitement élastique, φ est nul, et le module complexe devient un nombre réel, associé au module de YOUNG.

On peut distinguer la partie élastique et visqueuse du module complexe en séparant ses parties réelles et imaginaires, à l'aide de l'écriture suivante (Aklonis et MacKnight) :

$$E^* = E_1 + i E_2 \quad (3.2)$$

$$\text{avec :} \quad E_1 = |E^*| \cos \varphi \quad \text{et} \quad E_2 = |E^*| \sin \varphi$$

E_1 est la partie réelle du module complexe. Cette partie est en phase avec la contrainte et représente la partie récupérable de l'énergie emmagasinée. E_2 de son côté est la partie imaginaire correspondant à un comportement visqueux irréversible. Cette énergie dissipée se transforme, entre-autres, en chaleur et va accroître la température au sein d'une éprouvette soumise à un chargement cyclique.

Le module complexe permet de généraliser aux corps viscoélastiques, les lois mécaniques en principe réservées aux seuls corps élastiques.

Les résultats expérimentaux peuvent alors être présentés de diverses façons, soit :

1. sous forme de courbe maîtresse en rapport à la température de référence : $|E^*|$ vs Fréquence-Équivalence (Hz);
2. dans un plan complexe : le plan Cole-Cole E_1 vs E_2 ;
3. dans l'espace de Black : $|E^*|$ vs Angle de phase.

Par ailleurs, certains chercheurs ont proposé un modèle rhéologique élémentaire permettant de décrire le comportement rhéologique global du matériau. Notamment, le modèle de Huet-Sayegh permet une représentation juste de la courbe obtenue dans le plan Cole-Cole, représentatif des résultats expérimentaux. Le modèle de Huet-Sayegh (schématisé à la Figure 17) est l'assemblage en parallèle d'un groupe en série d'un ressort de raideur infini, E_∞ , avec deux amortisseurs à fluage parabolique et d'un groupe constitué d'un ressort de raideur E_0 . La valeur de E_∞ représente le module instantané vers lequel tend la partie réelle E_1 de $E^*(\omega\tau)$ lorsque ω tend vers l'infini et la valeur E_0 représente le module statique.

L'expression analytique du modèle de Huet-Sayegh s'écrit :

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta (i\omega\tau)^k + (i\omega\tau)^h} \quad (3.3)$$

$$k = \frac{2 \cdot \alpha}{\pi} \quad \text{et} \quad h = \frac{2 \cdot \beta}{\pi} \quad (3.4)$$

L'essai du module complexe consiste à imposer une déformation longitudinale sinusoïdale en contrainte alternée (tension-compression) à une éprouvette d'enrobé Φ 80 mm et de 120 mm de longueur en condition isotherme à divers paliers de

température, et pour différentes fréquences de sollicitation (Di Benedetto et de La Roche, 1998). Le comportement rhéologique de l'enrobé est alors défini par l'établissement des courbes maîtresses en fonction des températures et des fréquences sélectionnées.

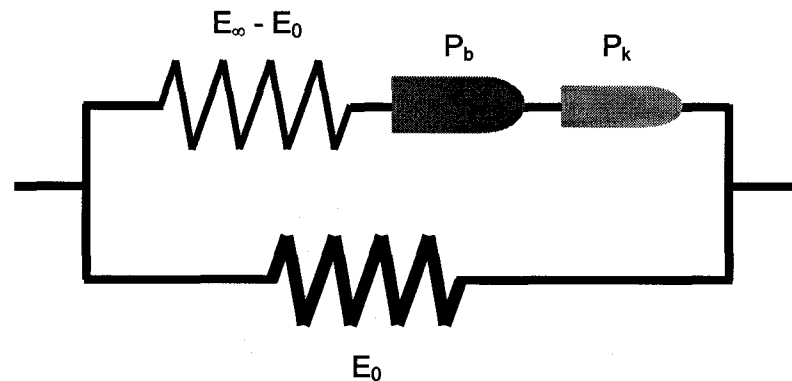


Figure 17 Représentation schématique du modèle rhéologique de Huet-Sayegh

Cet essai 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 mouvement sont également nécessaires au bon fonctionnement de l'essai.

Les extensomètres, au nombre de 3, ont une longueur totale de 50 mm et sont composés de tige en aluminium. La même disposition que celle établie pour l'essai de TSRST, soit à angle de 120° tout au tour de l'éprouvette, devra être respectée et rester constante tout au long des essais.

L'essai de module complexe est soumis à 7 niveaux de température (-35, -25, -10, 0, 10, 20 et 35°C) pour lesquels 8 niveaux de fréquence (0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10 et 20 Hz) sont appliqués. Cet essai est non destructif. Pour ce faire, les essais

s'exécutent de la plus basse aux plus hautes températures. La même procédure est utilisée pour l'application des fréquences, soit de la plus rapide à la plus lente pour chaque niveau de température.

Le déroulement de l'essai nécessite une période de conditionnement pour chaque niveau de température étudié fixée à 4 heures. Par la suite, chaque niveau de fréquence est appliqué à chaque niveau de température et une période de conditionnement s'intercale entre chaque changement pour assurer le bon conditionnement.

3.3.5 Mesure du coefficient de dilatation thermique : α

L'essai pour mesurer le coefficient de dilation 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 la dilation du matériau est étudiée à l'aide de jauges collées sur chaque éprouvettes et d'une éprouvette témoin de silicate de titane. Le silicate de titane a la propriété de posséder un coefficient de dilation 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, suite à l'essai, la valeur obtenue par la jauge de référence du silicate de titane.

Précédent la période d'essai, les éprouvettes sont entreposées dans un bac de sable pour éviter le fluage à température et humidité contrôlées (20°C et 50 %). Par la suite, les jauges TML de type PL-60-11-3LT (60 mm de longueur) sont collées à l'aide d'une colle de type M-Bond GA-2 composée d'une résine et d'un agent durcisseur manufacturés par la compagnie Vishay. Les jauges sont distantes l'une de l'autre par un angle de 180° tel qu'illustré à la Figure 18.

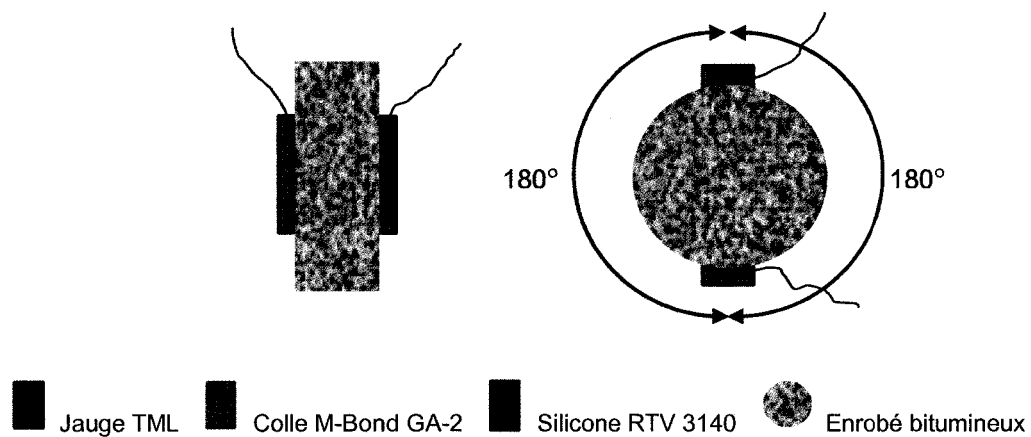


Figure 18 Schématisation des éprouvettes pour l'essai de coefficient de dilatation thermique

Finalement, les jauges sont recouvertes d'une pellicule de silicone de type RTV 3140 pour assurer une protection adéquate de la jauge durant l'essai. L'acquisition des données s'effectue à l'aide du Système 6000 de Vishay et le temps d'acquisition est fixé selon un intervalle de 15 minutes.

Les plateaux de températures 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 19 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.

Des études effectuées montrent que les coefficients de dilation thermique d'enrobés conventionnels varient entre $1,21$ et $3,69 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (Anderson et al., 1999). De son côté, le programme C-SHRP identifie les plages suivantes pour les coefficients de dilatation thermique pour une baisse de 5 °C par jour : entre 0 et -25 °C de 21 à 26 x $10^{-6} / ^\circ\text{C}$, à -35 °C de 15 à 27 x $10^{-6} / ^\circ\text{C}$ et à -45 °C de 8 à 27 x $10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

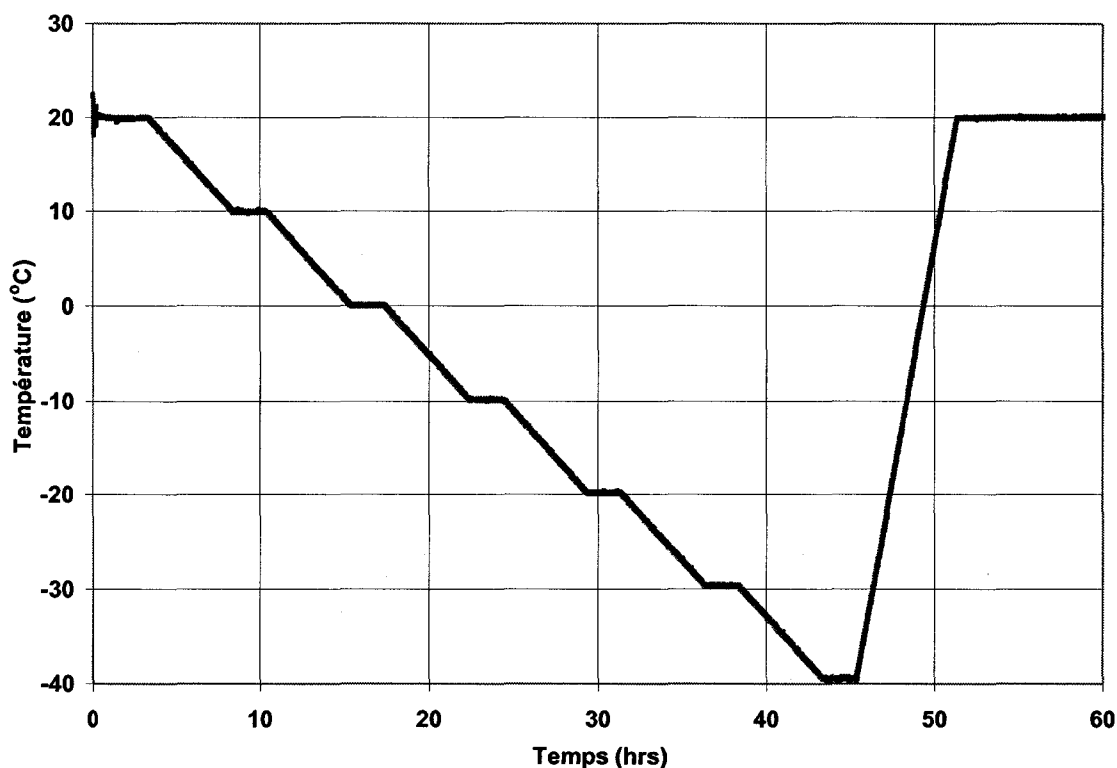


Figure 19 Variations typiques des températures pour laquelle une éprouvette est soumise durant l'essai visant à mesurer le coefficient de dilatation thermique

3.3.6 Confection des éprouvettes pour les mesures de la résistance à basse température (TSRST), des propriétés rhéologiques (E^*) et du coefficient de dilatation thermique (α)

Dans un premier temps, les plaques d'enrobé sont compactées en laboratoire avec le compacteur de plaques LCPC au laboratoire LUCREB. Les plaques obtenues ont une forme prismatique (400 x 600 x 125 mm). Les carottes, à raison de onze par plaque, sont 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 dans la Figure 20. Les éprouvettes sont entreposées sur un lit de sable, suivant leur axe de révolution, de manière à éviter leur gauchissement en cours d'entreposage, le tout dans une chambre à température et humidité contrôlées ($T = 20^\circ\text{C}$ et H.R. = 50 %).

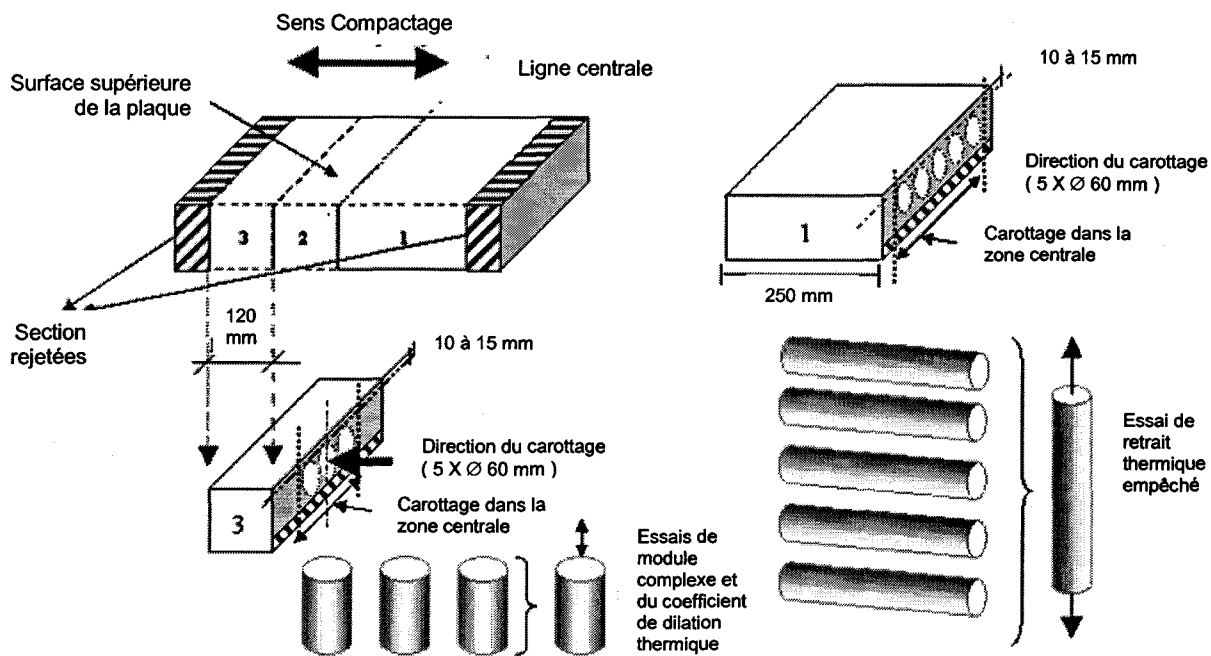


Figure 20 Schématisation du plan de carottage des éprouvettes pour les différents essais

3.3.7 Synthèse des essais réalisés sur l'enrobé SMA pour évaluer ses performances

Tableau XXV

Liste des principaux essais réalisés

Essai	Norme / méthodologie	Taille des éprouvettes			Conditions de l'essai
		Ø ou e (mm)	L (mm)	l (mm)	
Presse à cisaillement giratoire (PCG)	LC26-003	150	115 ¹	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • Pression verticale de 600 kPa • Angle de giration de 1,25° • Vitesse de rotation 30 girations par minute
Coefficient de dilation thermique	LUCREB	80	120	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • 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
Retrait thermique empêché (TSRST)	ASSHTO TP 10-93	60	250	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • 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°
Module complexe (E*)	DGCB ENTPE Lyon	80	120	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • Chargement cyclique sinusoïdale • 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°
Résistance à l'orniérage	LC26-400	50	500	180	<ul style="list-style-type: none"> • T° ESSAIS (°C) : 60 • Charge active : 5 kN • Fréquence de sollicitation : 1Hz • Nombre de cycles : à froid : 1000 à chaud : 100; 300; 1 000; 3 000; 10 000; 20 000; 30 000; 60 000

Note 1 Hauteur à 0% de vide

CHAPITRE 4

PHASE 1 : FORMULATION EN LABORATOIRE

Ce chapitre présente la synthèse des résultats obtenus en laboratoire. Les résultats sont regroupés en deux sections. La première section comporte la validation de la procédure de formulation en entier. La seconde énumère les différents résultats obtenus en laboratoire selon les différents essais.

4.1 Validation de la procédure de formulation de l'enrobé SMA

Cette sous-section énumère et valide à l'aide d'essais en laboratoire toutes les étapes de formulation menant à la confection d'enrobés SMA de grosseur nominale maximale de 10 mm.

Dans l'ensemble, tel que nous l'avons présenté à la section § 2.4, les étapes qui vont nous permettre d'élaborer la formulation du SMA sont synthétisés dans l'organigramme illustré à la Figure 21.

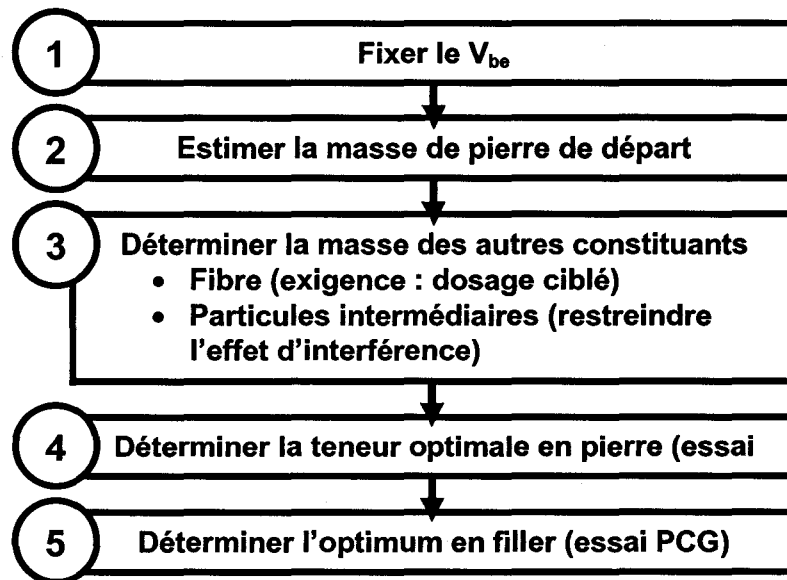


Figure 21 Étapes de formulation des enrobés SMA

4.1.1 Sélection du volume de bitume effectif : V_{be}

Comme nous l'avons traité au chapitre 2, la plage du volume de bitume effectif, estimé à partir de diverses formulations d'enrobés SMA mises en œuvre dans plusieurs pays se situe entre 14,1 et 15,9 %. Pour fins de formulation initiale, la valeur du V_{be} a été fixée autour de la valeur moyenne soit 15,2 %.

4.1.2 Estimation de la masse de pierre (> 5mm) de départ à utiliser

Comme nous l'avons souligné à la section § 2.4.2, la masse de gros granulats pilonnée à sec pour la pierre 5-10 mm à l'étude dans cette phase, établie selon la norme BNQ 2560-060, sert de point de départ pour évaluer la teneur en pierre optimale à utiliser pour la confection d'un enrobé SMA (voir Tableau XIX § 3.2.1).

4.1.3 Détermination des masses des autres constituants

Connaissant le V_{be} et la masse de pierre (>5 mm) de départ, les masses de fibres de filler ainsi que des particules intermédiaires restent à être déterminées. Pour la formulation de départ, il est recommandé de fixer le pourcentage de fibre initial à 1% par rapport à la masse granulaire. D'autre part, dans la perspective d'éviter un risque d'interférence quant à l'agencement que peut et que doit prendre la pierre (>5 mm), il convient de limiter le dosage en filler. Compte tenu du fait que dans les enrobés, la teneur en filler est nécessairement supérieure à 7% et qu'elle se rapproche plus particulièrement de 10% pour les enrobés SMA, la teneur en filler initiale est fixée à 8% toujours par rapport à la masse granulaire.

Il ne reste alors qu'à fixer la teneur en particules intermédiaires, laquelle ne doit pas non plus interférer sur l'agencement de la pierre. Suivant la théorie de Powers, nous savons que la masse de particules intermédiaires peut s'exprimer en fonction de la masse de pierre. On peut écrire :

$$M_{\text{GRANULATS}} = M_{\text{FILLER D'APPOINT}} + M_{\text{FIBRE}} + M_{\text{PARTICULES INTERMÉDIAIRES}} + M_{\text{PIERRE}} \quad (4.1)$$

En considérant les granulométries respectives de la pierre 5/10 (D) et des particules intermédiaires (d) on établit que les diamètres moyen de ces granulat sont respectivement de $\bar{D} = 7,20$ mm et $\bar{d} = 1,83$ mm. En conséquent, le rapport des diamètres (\bar{d}/\bar{D}) est de 0,25. En se référant à la Figure 22, mettant en relation l'évolution de l'indice des vides pour différents mélanges granulaires, et en gardant à l'esprit que nous cherchons un mélange granulaire pierre/particules intermédiaires qui offre un niveau d'interférence le plus faible possible, nous observons suivant un rapport des diamètre de 0,25, que le dosage en particules intermédiaires doit être limité à un dosage autour de 5%.

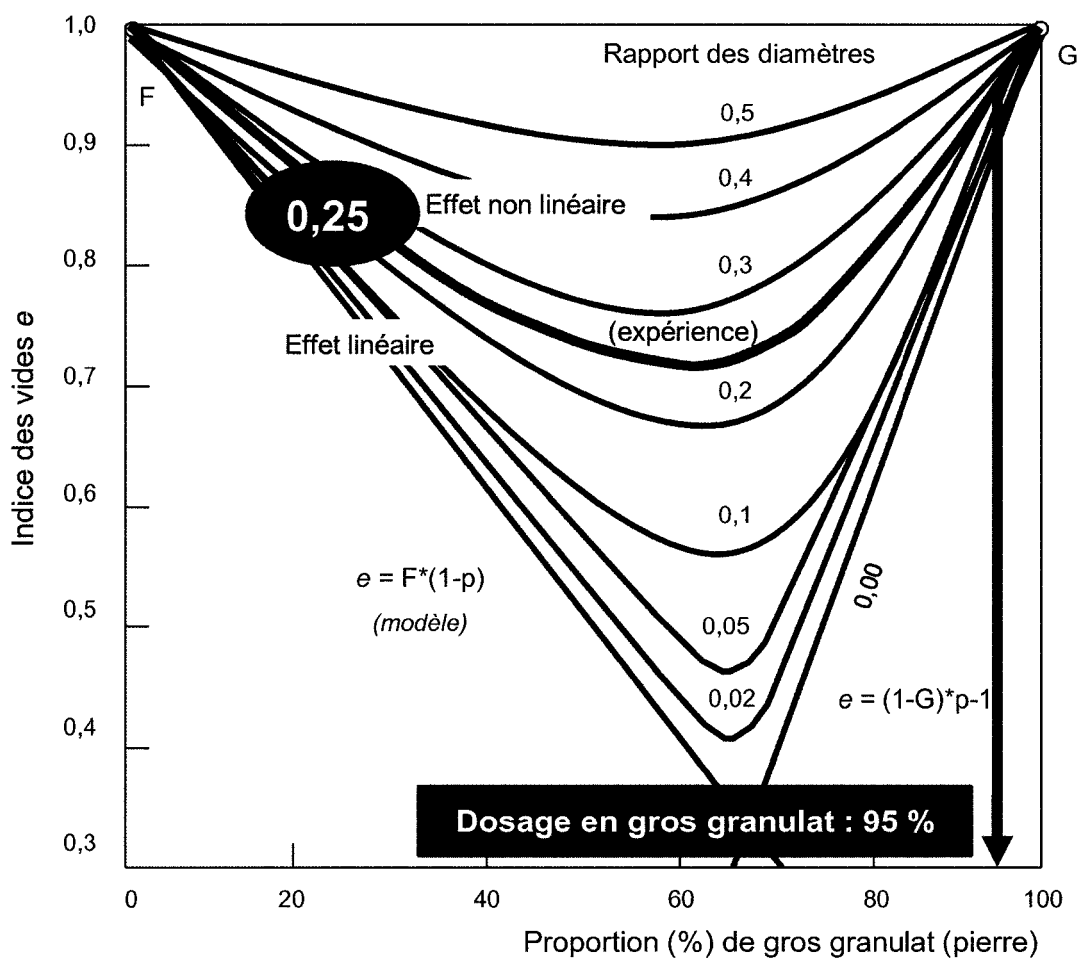


Figure 22 Influence du rapport des diamètres des granulat sur l'indice des vides d'un mélange binaire de granulat (Perraton, 2004)

Le premier mélange, SMA_{DÉPART}, est donc déterminé et va permettre de bien cerner rapidement la teneur en pierre optimale en travaillant à la PCG. Le Tableau XXVI donne la formulation de départ servant à déterminer la teneur optimale en pierre.

Tableau XXVI

Formulation de l'enrobé de laboratoire

Enrobé	SMA DÉPART ¹		SMA ESSAI PCG ³		SMA À OPTIMISER	
	(kg/m ³)	(%)	(kg/m ³)	(%)	(kg/m ³)	(%)
Bitume	128	7,00	145	7,04	151	7,3
Fibre	17	0,92	19	0,92	19 ⁶	0,90
Filler	137	7,44	153	7,43	153 ⁶	7,40
Pierre 5/10	1484	80,56	1659	80,53	1659 ⁶	80,30
Pierre 0/5	75	4,00	89	4,08	89 ⁶	4,10
Vi		~ 22 ²		~ 13 ⁴		valeur cible : 3
V _{be} (%)	15,6		16,7		15,2 ⁵	
D _{mm}	2,360		2,368		2,347	
D _{mb} – calculée	1841		n/a		n/a	
D _{mb} – mesurée ⁵	n/a		2065		2065	

Note 1 : Les calculs ayant conduit à établir la formulation SMA_{DÉPART} sont présentés à l'Annexe 19

Note 2 : Calculé à partir des volumes absolus

Note 3 : Proportions obtenues par rétro-calculs à partir du D_{mb} mesurée à la PCG à 200 girations

Note 4 : Mesuré à la PCG à 200 girations

Note 5 : Établi sur la base d'un volume de vide de 3% et d'une absorption de 0,2% de la masse granulaire : $V_{be} \% = [V_{be} (L/m^3) / (1000 - V_{air} (L/m^3))]$

Note 6 : Valeur à optimiser suivant la prochaine étape : Optimisation de la teneur en filler

Donc, suite au premier essai à la PCG, nous arrivons à déterminer la nouvelle proportion de pierre 5-10 mm optimum par rétro calculs. La nouvelle valeur est donc de 1659 kg/m³. Cette nouvelle valeur assure maintenant la principale caractéristique des SMA soit un contact pierre sur pierre de l'enrobé par une forte teneur en pierre. La même procédure est alors appliquée de nouveau pour déterminer la nouvelle

proportion de granulats fins. On constate également que le V_{be} , après l'essai à la PCG est trop élevé (16,6% au lieu de 15,2%) de l'enrobé. C'est aussi parce qu'il subsiste au sein de l'enrobé trop de vides. C'est le début de la phase d'optimisation, laquelle est associée à l'ajustement du dosage en filler pour atteindre la teneur en vides ciblée à 60 girations (4 à 7%). Avant de se lancer à des essais en laboratoire pour trouver l'optimum en filler, il convient d'ajuster la teneur en bitume en référence à un D_{mb} correspondant à une teneur en vides de 3% (valeur à 200 girations : le nouvel enrobé, SMA_{DÉPART}, aura donc les proportions illustrées dans le Tableau XXVI suite aux nouveaux calculs de formulation.

4.1.4 Détermination de l'optimum en filler et résultats de l'essai à la PCG

Suite à la confection en laboratoire de cet enrobé de départ, on cherche le dosage optimum en filler pour satisfaire les exigences de compacité. Plusieurs essais sont donc nécessaires avec différentes teneurs en filler d'appoint afin de tracer graphiquement la relation entre la teneur en vides de l'enrobé établi en référence à la valeur du N_{design} (60 girations) et la fraction de particules fines au sein de l'enrobé.

Les différents enrobés confectionnés pour évaluer la teneur optimale en filler sont identifiés dans le Tableau XXVII. Le Tableau XXVII donne également les valeurs obtenues à l'essai à la PCG pour chacun de ces enrobés. La relation entre la variation du taux de filler et le pourcentage de vides dans l'enrobé est illustrée à la Figure 23. On constate qu'il existe une teneur optimale en filler comprise entre 12 et 13%.

Il est également intéressant de constater que les teneurs en vides à 60 girations, soit au nombre de girations de formulation (N_{design}), sont relativement tous élevés, tous au dessus de la plage cible usuelle étant comprise entre 4 et 7%.

Suite aux essais à la PCG, 2 mélanges furent ciblés pour vérifier la performance à l'ornièreur LCPC soit les enrobés L15,2_12,0 et L15,2_11,0 contenant respectivement 12 et 11% de filler. Les résultats de l'essai à l'orniérage sont présentés dans le Tableau XXVIII et à la Figure 24.

Tableau XXVII

Caractéristiques des mélanges confectionnés pour déterminer le dosage optimal en filler (bitume : PG 58-28; Vbe = 15,2%)

		L15,2_7,5	L15,2_9,0	L15,2_11,0	L15,2_11,8	L15,2_12,0	L15,2_12,5	L15,2_13,0	L15,2_13,5
Bitume PG		58-28	58-28	58-28	58-28	58-28	58-28	58-28	58-28
Refus au 5 mm (%)		69,8	69,8	69,8	69,8	68,6	69,7	69,8	69,8
Tamisat au 80 µm (%)		7,5	9,0	11,1	11,8	12,0	12,5	13,0	13,5
Vbe (%)		15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
Teneur en fibre (%)		0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,93	0,93	0,93
Teneur en sable		16,05	14,57	12,47	11,77	12,78	11,19	10,59	10,09
Teneur en bitume (%)		6,65	6,63	6,63	6,63	6,62	6,61	6,61	6,61
Tamis (mm)	14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	10	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2	91,3	91,2
	5	30,1	30,1	30,2	30,3	30,0	30,3	30,3	30,3
	2,5	18,8	19,5	20,5	21,2	21,0	20,9	21,4	21,6
	1,25	16,1	17,3	18,8	20,0	19,7	19,4	20,3	20,6
	0,630	14,2	15,7	17,7	19,1	18,9	18,4	19,5	20,0
	0,315	12,3	14,0	16,5	18,2	18,0	17,3	18,7	19,3
	0,160	10,5	12,6	15,5	17,4	17,3	16,4	18,1	18,8
	0,080	7,2	8,8	10,9	12,3	12,2	11,6	12,8	13,3
D _{mm} théo.		2,403	2,403	2,402	2,402	2,402	2,402	2,401	2,401
Teneur en vides (%) dans l'enrobé en fonction du nombre de giration	10	19,1	17,8	16,9	16,4	15,3	15,6	15,9	16,5
	50	11,8	10,0	9,3	8,4	7,8	7,7	7,9	8,8
	60	11,1	9,3	8,6	7,7	7,1	7,0	7,2	8,1
	80	10,2	8,2	7,5	6,6	6,6	5,9	6,0	7,0
	100	9,5	7,6	6,7	5,7	5,3	5,1	6,3	6,3
	200	7,9	5,8	5,0	3,9	3,6	3,3	3,3	4,5

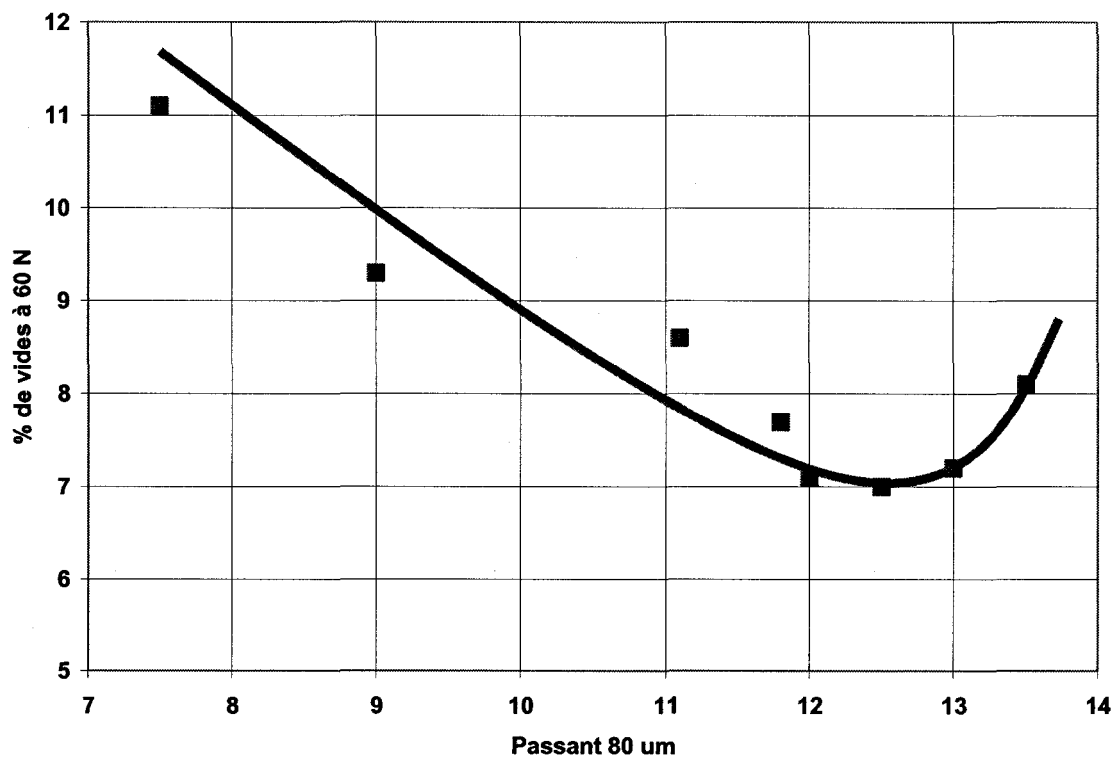


Figure 23 Graphique illustrant la relation entre le passant 80 µm et le pourcentage de vides optimum mesuré à 60 girations ($V_{be}=15,2$)

Tableau XXVIII

Résultats de l'essai à l'ornièrage pour les enrobés SMA confectionnés avec un V_{be} de 15,2%

Nombre de cycles		Pourcentage d'ornièrage							
		100	300	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000	60 000
# d'enrobé	L15,2_11,0 Compacité de 94,63 %	2,13	2,60	2,99	4,72	6,21	7,34	8,12	8,96
	L15,2_12,0 Compacité de 94,05 %	1,91	2,58	3,49	4,36	5,58	6,20	7,06	7,96

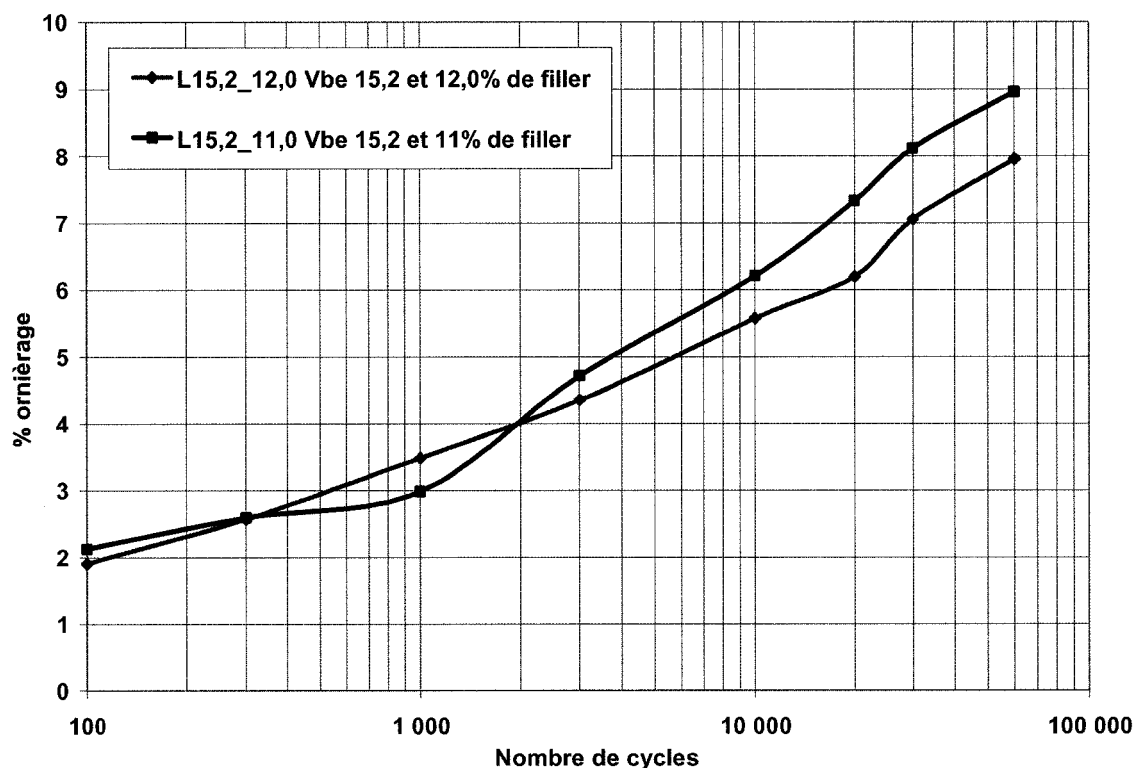


Figure 24 Graphique illustrant le pourcentage d'ornièrage en fonction du nombre de cycles pour différents enrobés SMA

Suivant la Figure 24, on remarque que ces enrobés SMA répondent largement aux critères établis par le MTQ (20% d'ornières pour des plaques de 50 mm donc 10 mm à 3 000 cycles !) et ce, même après 60 000 cycles d'essais.

Il est important de mentionner que les mélanges produits en laboratoire possèdent un dosage élevé de filler d'appoint (> 10%). Ce taux s'explique en partie par la sélection, imposée par l'usine de production mandatée de mettre en œuvre la planche d'essai, de la classe granulaire du granulats fins (0 – 5 mm au lieu d'une classe 0 – 2,5 mm, classe plus recommandée pour la formulation des enrobés SMA). La Figure 25 illustre bien l'effet de l'utilisation d'une classe granulaire 0 – 5 mm. En effet, il est bien reconnu qu'une granulométrie qui s'éloigne de la droite de la masse volumique maximale a pour incidence d'accroître la teneur en vides dans le squelette granulaire (VMA : *Void in the Mineral Aggregate* ou VAM).

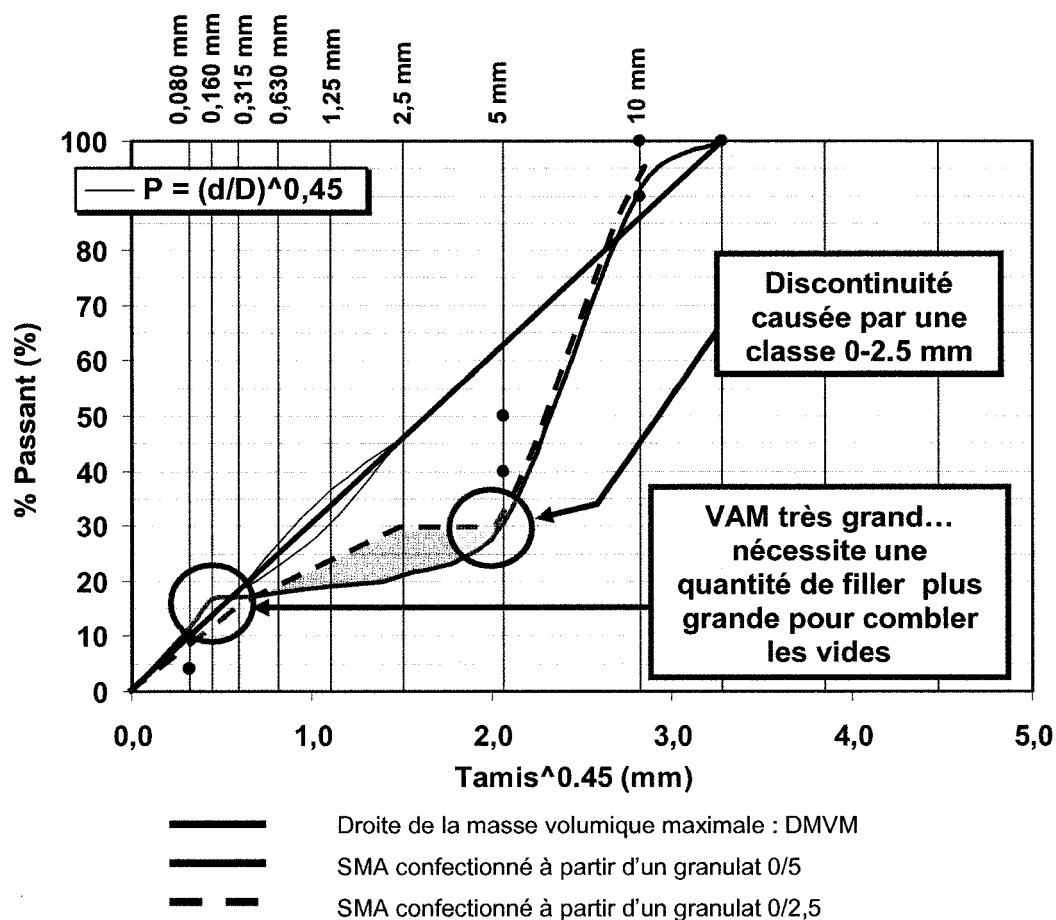


Figure 25 Graphique illustrant le haut taux de bitume par la droite de la masse volumique maximum (DMVM)

Or, le fait de confectionner un enrobé SMA de grosseur nominale maximale de 10 mm, en combinant une pierre 5/10 avec un granulat fin 0/2,5 a pour effet de créer une discontinuité au sein de la granulométrie du combiné (plateau entre les tamis 2,5 mm et 5 mm). Par contre, dans le cas où on utilise un granulat fin 0/5, on obtient une granulométrie plus continue de sorte que la courbe granulométrique reste en écart à la droite de masse volumique maximale indiquant aussi qu'il subsiste au sein du squelette granulaire un pourcentage de vides plus important. En conséquent, pour assurer le remplissage de ces vides, il faudra introduire une fraction plus importante de particules fines (le filler) dans l'enrobé lorsqu'on utilise un granulat 0/5 comparativement au cas où l'on utilise un granulat 0/2,5.

4.1.5 Formulation de l'enrobé SMA sélectionné

Tableau XXIX

Formulation de l'enrobé SMA A OPTIMISER

Enrobé		SMA A OPTIMISER (L15,2_12,5)
Teneur en fibre d'amiante (%)		1,0
Type de bitume (PG)		58 – 28
Tamisat (%)	14 mm	100
	10 mm	91
	5 mm	30
	2,5 mm	21
	1,25 mm	20
	630 µm	19
	315 µm	18
	160 µm	17
	80 µm	12,3
Enrobés	Pierre 5/10 (%)	74,94
	Pierre 0/5 (%)	2,41
	Filler (%)	0,81
	Fibre (%)	0,93
	b (%)	6,61
	Vi (%)	2,73
	V _{be} (%)	15,2
	V _{p>5mm} (%)	74,94
	V _{p>5mm} (L/m ³)	658,17
	M _{p>5mm} (kg/m ³)	1741
	D _{mb}	2,323
	D _{mm}	2,402
Presse à cisaillement giratoire (PCG)	10 N	15,6 %
	60 N	7,0 %
	80 N	5,9 %
	100 N	5,1 %
	200 N	3,3 %

CHAPITRE 5

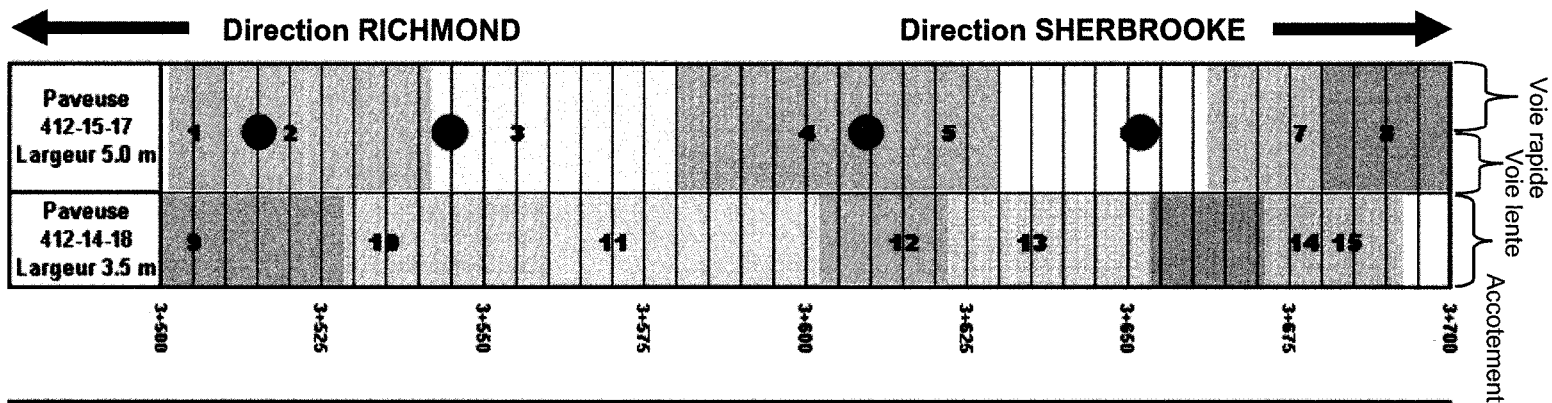
PHASE 2 : RÉALISATION D'UNE PLANCHE D'ESSAI D'ENROBÉ SMA EN CHANTIER

Ce chapitre décrit la production et l'analyse de l'enrobé SMA sélectionné en laboratoire et produit en chantier sur planche d'essai. Dans un premier temps, une brève description du site sélectionné sera présentée. Par la suite, la formulation sélectionnée sera exposée et finalement, les résultats obtenus, lors de la production, seront énumérés et synthétisés.

5.1 Description du site de la planche d'essai

Le site sélectionné pour la planche d'essai se situe dans la région administrative No. 5, l'Estrie, et plus spécifiquement à Richmond. L'autoroute ciblée fut l'autoroute provinciale 55, direction Nord. La planche d'essai a été effectuée du chaînage 3+500 au chaînage 3+700. Une production totale de 270 tonnes d'enrobé a été obtenue pour réaliser cette planche d'essai. L'usine d'enrobage était située à environ 35 km de la localisation de la planche d'essai et nécessitait un temps de transport d'environ 35 minutes. L'application de l'enrobé SMA a été faite sur une chaussée neuve de 8,5 mètres de largeur. Un total de 15 lots en chantier (2 échantillons de 10 kg pour chaque lot) ont été échantillonnés et analysés en laboratoire en plus de la cueillette de 1,5 tonnes d'enrobé, prélevée au site d'enrobage, pour fin d'analyses futures en laboratoire. Chaque lot prélevé en chantier a clairement été identifié par rapport au camion entrant et au chaînage de la planche d'essai. De plus, les températures de l'enrobé à la sortie de l'usine d'enrobage et à l'arrivée en chantier lors du déchargement dans la paveuse ont été répertoriées.

La Figure 26 illustre la localisation de chaque lot échantillonné ainsi que le/les types d'essais effectués à chaque location.



No	Échantillon #	Analyse et essais
1	L204499	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
2	L201960	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
3	L211574	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
4	L206498	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
5	L205104	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
6	L205078	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
7	L208821	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
8	L205444	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
9	L208013	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
10	L211558	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
11	LC68669	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
12	L205104	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
13	L180122	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
14	L208821	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
15	L205444	Prélèvement d'un échantillon pour analyse en laboratoire sur la granulométrie, la teneur en bitume et la PCG
●	S/O	Essais au nucléodensimètre en cours de compaction durant les travaux de pavage sur la voie rapide
●	S/O	Essais au nucléodensimètre en cours de compaction durant les travaux de pavage sur la voie rapide
●	S/O	Essais au nucléodensimètre en cours de compaction durant les travaux de pavage sur la voie rapide
●	S/O	Essais au nucléodensimètre en cours de compaction durant les travaux de pavage sur la voie rapide

Figure 26 Localisation des différents prélèvements effectués sur la planche d'essai

5.2 Formulation sélectionnée

Lors de la mise en place en chantier, la formulation illustrée dans le Tableau XXX fut sélectionnée. Il est à noter que la formulation diffère de la formulation établie a priori en laboratoire (section §4.1.5) puisque des nouvelles conditions ont été imposées à quelques jours de la mise en œuvre de la planche d'essai. En effet, compte tenu du dosage limité en sable (0,8 %) et en pierre 0-5 mm (2,5 %) dans la formulation en laboratoire, les responsables de la production nous ont indiqué leur incapacité de pouvoir produire un tel enrobé à débit constant avec leurs installations. La nouvelle restriction fut donc de concevoir un enrobé avec des proportions minimales de sable et/ou de pierre 0-5 mm à 5%. Le pourcentage de pierre 0-5 mm fut donc ajusté à 5,2 % et le volume de bitume effectif de 15,2 % à 15,8 %. Étant donné l'augmentation du dosage en pierre 0-5 mm, on décida de laisser tomber la proportion de sable, laquelle est à proscrire dans l'enrobé SMA selon les recommandations relevés dans la littérature.

5.3 Échantillonnage des lots

Deux types d'échantillonnage ont été utilisés dans le cadre de cette planche d'essai. Le premier type d'échantillonnage a consisté à prélever directement à l'usine plus de 1,5 tonnes d'enrobé SMA directement sortie de la centrale d'enrobage. Cet échantillonnage de masse a pour but de constituer une réserve de matériaux pour évaluer, si nécessaire, différentes performances de l'enrobé SMA mise en œuvre sur la planche d'essai. La Figure 27 illustre le procédé d'échantillonnage. Dans un premier temps, la benne de la chargeuse fut légèrement lubrifiée pour éviter une adhérence et une perte de bitume sur ses parois métalliques. Dans un second temps, des contreplaqués servant au coffrage du béton furent utilisés comme office de plancher. Ces contreplaqués furent sélectionnés à cause de leur surface non adhésive. Finalement, l'échantillonneur de 25 boîtes conçu au LUCREB, fut utilisé pour remplir les boîtes d'enrobés (total de 150 boîtes prélevées). Il est à noter que la répartition de l'enrobé à travers les 25 boîtes et la prise d'enrobé à différents endroits dans la réserve ont agi comme séparateur mécanique pour assurer un échantillonnage le plus homogène possible.

Tableau XXX

Formulation ciblée en laboratoire pour la planche d'essai

Enrobé		SMA _{SHER 55} (L15,8_11,6)
Teneur en fibre d'amiante (%)		1,3
Type de bitume (PG)		58 – 28
Tamisat (%)	14 mm	100
	10 mm	91
	5 mm	31
	2,5 mm	21
	1,25 mm	19
	630 µm	18
	315 µm	17
	160 µm	16
	80 µm	11,6
Enrobés	Pierre 5/10 (%)	74,18
	Pierre 0/5 (%)	4,84
	Filler (%)	12,82
	Fibre (%)	1,25
	b (%)	6,91
	V _i (%)	2,3
	V _{be} (%)	15,8
	V _{p>5mm} (%)	74,18
	V _{p>5mm} (L/m ³)	652
	M _{p>5mm} (kg/m ³)	1724
	D _{mb}	2,323
	D _{mm}	2,409
Presse à cisaillement giratoire (PCG)	10 N	15,2 %
	60 N	6,7 %
	80 N	5,5 %
	100 N	4,7 %
	200 N	2,9 %



Figure 27 Photos illustrant le premier type d'échantillonnage : échantillonnage de masse en usine

Le second type d'échantillonnage (illustré à la Figure 28) utilisé fut le prélèvement direct dans la paveuse sur chantier. Chaque camion entrant sur la planche d'essai fut identifié et échantillonné au moment où ce dernier effectuait son déchargement dans la paveuse. Il est à noter qu'un camion constituait une production d'enrobé de 4 gâchées distinctes de masse totale moyenne équivalente à 3 700 kg pour un total moyen de 14 800 kg par camion. Chaque gâchée produite en usine fut répertoriée et analysée. Deux lots d'environ 10 kg fut donc prélevés par camion. La température, l'heure du prélèvement, le chaînage ainsi que le numéro de la paveuse associée furent répertoriés.



Figure 28 Photos illustrant le deuxième type d'échantillonnage : échantillonnage en chantier

5.4 Présentation des résultats relatifs à l'homogénéité des échantillons du prélèvement de masse en usine

Afin de vérifier l'homogénéité des échantillons (150 boîtes de 10 kg) du prélèvement de masse en usine (1,5 tonnes d'enrobés SMA), un certain nombre de boîtes a été

analysé de façon détaillée. Un total de 10 échantillons (10 boîtes du lot de 150 boîtes) furent analysés en laboratoire. Pour chacun des lots échantillonnés, trois séries d'essai ont été effectuées :

- a. analyse de la teneur en bitume à l'aide du four à ignition;
- b. analyse granulométrique de l'échantillon séché au four à ignition;
Norme du MTQ, LC 21-040 *Analyse Granulométrique*;
- c. mesure de l'aptitude au compactage à l'aide de la PCG;
Norme du MTQ, LC 26-003 *Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire*).

La procédure établie pour effectuer ces essais fut la suivante. Dans un premier temps, un échantillon de 10 kg fut séparé en deux parties à l'aide d'un séparateur mécanique pour obtenir la masse nécessaire à l'essai PCG soit 4,879 kg. La deuxième portion fut, à nouveau, séparée mécaniquement à deux reprises dans le but d'obtenir une masse d'environ 1,000 kg pour fin d'essai au four à ignition tel que stipulé dans la norme LC 26-006.

Il est important de mentionner que la teneur en bitume a été déterminée à l'aide d'une procédure établie au LUCREB. En premier lieu, des échantillons d'une combinaison granulaire connue furent préalablement analysés au four à ignition afin d'étudier le comportement induit par le four à ignition. Les résultats montrèrent que les pertes engendrées par le four à ignition ne sont pas seulement causées par ignition du bitume mais aussi par une perte de masse associée aux granulats lors de la combustion à 540 °C. Un facteur de correction général fut donc calculé. Ce facteur comprend un facteur pour la perte de masse associée aux granulats et un facteur pour la perte de masse associée au bitume. Afin de déterminer le facteur de correction induit par la perte de masse associée aux granulats, des échantillons de granulométrie connue, sans bitume furent passés au four à ignition et analysés. Ce facteur fut par la suite soustrait au facteur de correction général afin d'obtenir le facteur de correction associé à la perte du bitume. L'Annexe 20 résume les différents calculs effectués à ce niveau.

Les analyses obtenues pour la teneur en bitume ainsi que pour l'analyse granulométrique sont donc le résultat de ces facteurs de correction.

Les sous-sections suivantes présentent en séquence les résultats de cette analyse d'homogénéité du lot prélevé en masse. Rappelons que l'échantillonnage de masse a pour but de constituer une réserve de l'enrobé SMA mis en place sur la planche d'essai en vue d'effectuer des essais de performance et de validation au besoin : l'homogénéité de ces échantillons doit être prise en compte dans les résultats des essais de performance conduits ultérieurement.

Finalement, sur les graphiques représentés dans cette section, les valeurs cibles (Tableau XXX) de formulation ainsi que la valeur moyenne des essais sont clairement identifiées pour fin de comparaison.

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

La teneur en bitume obtenue sur le lot servant à évaluer l'homogénéité de l'échantillonnage de masse varie entre 6,80 et 7,42% pour une valeur moyenne de 7,16% et un écart type de 0,18. La valeur moyenne est donc supérieure de 0,25% à la valeur visée dans la formulation de départ (6,91%) et représente une variation de 3,62% par rapport à cette valeur. Selon les règles de la statistique (loi de Student), on peut estimer à partir du résultat de cet échantillon constitué de 10 valeurs, que la moyenne de la population correspondante à l'ensemble de l'échantillonnage de masse (150 boîtes) est comprise entre 7,03% et 7,29% et ce, à un niveau de confiance de 95%. 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 (7,16%) que la valeur cible (6,91%), 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 1,9%). Il s'agit tout de même d'une variation qui mérite une attention puisque l'enrobé fut prélevé directement en usine. Par contre, de cette analyse on peut noter qu'effectivement le contrôle des quantités demeure ponctué d'une certaine imprécision. Les quantités réellement insérées dans les bennes de malaxage diffèrent des quantités prescrites initialement

par la tour de contrôle. La Figure 29 illustre la variation observée dans la teneur en bitume sur les échantillons prélevés à l'usine.

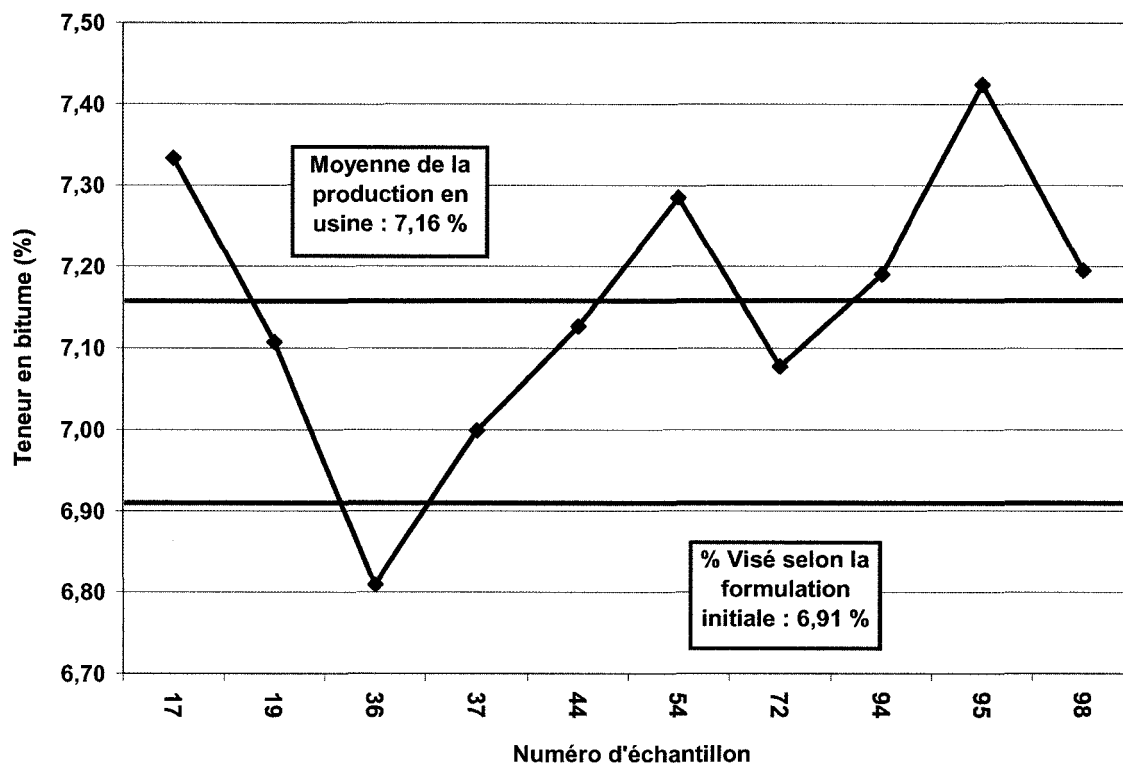


Figure 29 Relation illustrant la variation de la teneur en bitume en fonction du lot échantillonné en masse à l'usine

5.4.2 Variation de la teneur en pierre (> 5 mm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse

La teneur en pierre obtenue de l'analyse du lot servant à évaluer l'homogénéité des échantillons de masse en usine montre une variation dont la valeur moyenne se situe à 69,5% comparativement à 69,3% pour la valeur initiale ciblée. Quant à l'homogénéité de l'ensemble du lot de masse (la population), la teneur en pierre est comprise entre 68,82% et 70,21% (variation relative inférieure à 1,0%). La Figure 30 montre la variation observée sur l'ensemble de ces échantillons.

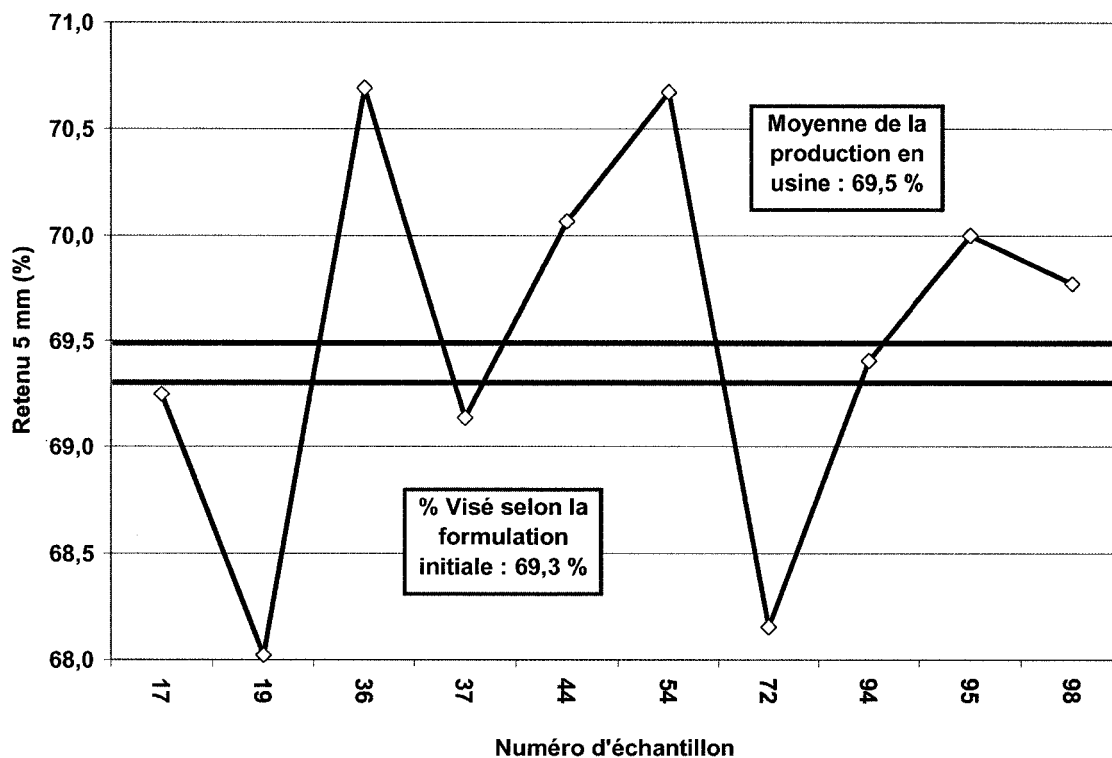


Figure 30 Relation illustrant la variation de la teneur pierre en fonction du lot échantillonné en masse à l'usine

5.4.3 Variation de la teneur en particules fines (< 80 μm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse

En ce qui concerne la teneur en particules fines, les échantillons prélevés à l'usine possèdent une variation relativement faible. La Figure 31 montre très bien la variation qui se situe en deçà d'un demi pourcent. Quant à l'homogénéité de l'ensemble du lot de masse (la population), la teneur en particules fines est comprise entre 13,11% et 13,65% pour une variation relative inférieure à 2,1%.

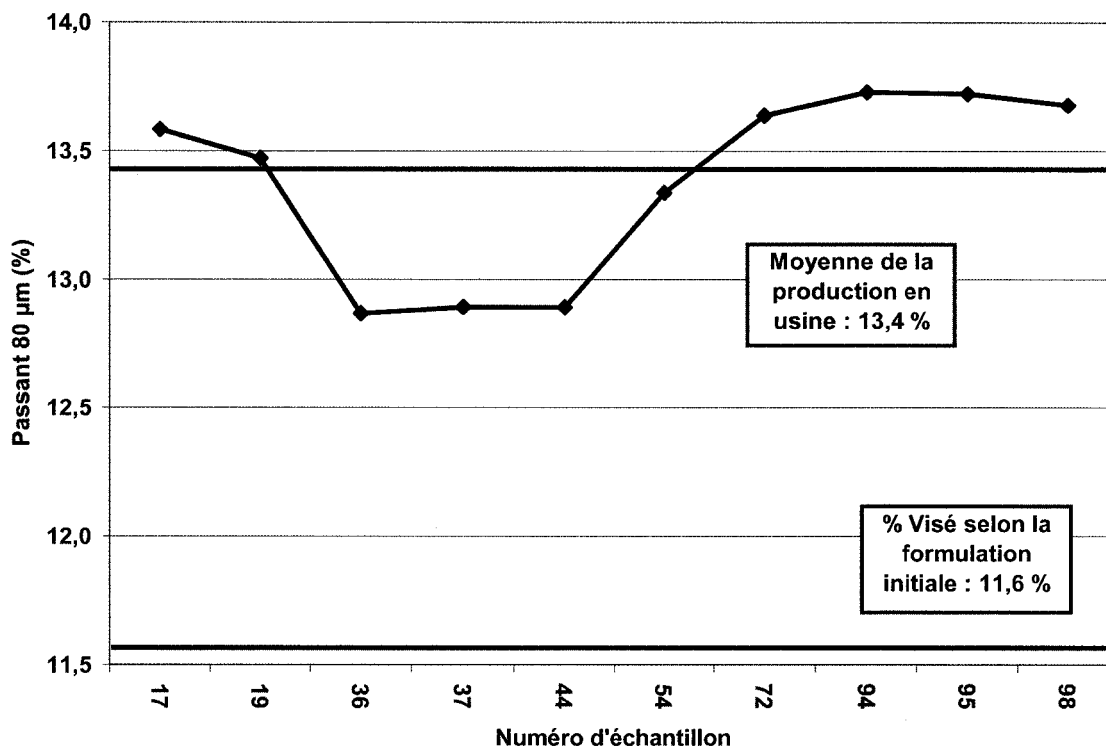


Figure 31 Relation illustrant la variation de la teneur en particules fines en fonction du lot échantillonné en masse à l'usine

5.4.4 Variation des résultats relatifs à l'aptitude au compactage à l'aide de la PCG des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse

Finalement, le dernier élément analysé sur les lots échantillonnés à l'usine est l'aptitude au compactage à l'aide de la PCG. Il est à noter que les valeurs étudiées ne sont présentées que pour le N_{design} soit, à 60 girations. Étant donné que la variation de la teneur en particules fines observée pour les lots échantillonnés en usine est beaucoup moins sévère que celle observée pour les lots échantillonnés en chantier, nous devrions observer une variation de la teneur en vides beaucoup moins grande que celle observée en chantier puisque la teneur en particules fines influence directement la teneur en vides de l'enrobé. La Figure 32 illustre très bien cette variation beaucoup moins prononcée que celle observée sur les lots en chantier. Quant à l'homogénéité de l'ensemble du lot de masse, la variation est comprise entre 7,25% et 7,86% pour une variation relative inférieure à 4,0%.

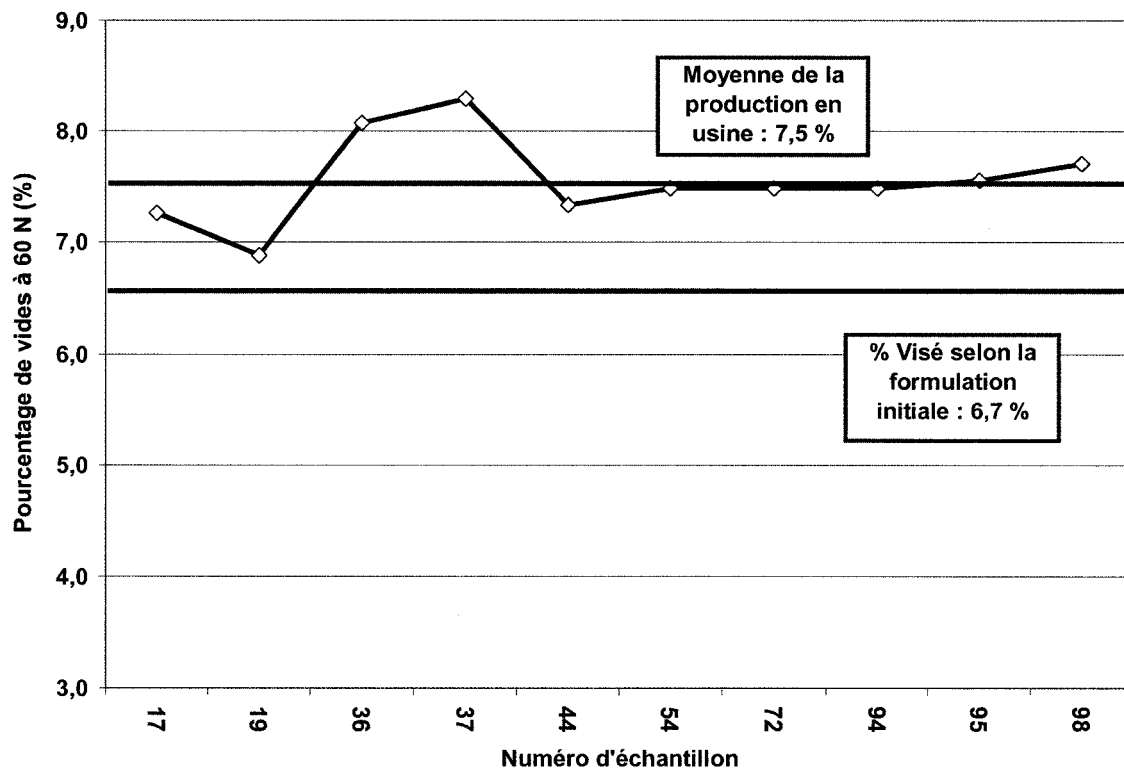


Figure 32 Relation entre la variation du pourcentage de vides à 60 girations à l'essai à la PCG et le numéro de lot échantillonné en masse à l'usine

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

Le Tableau XXXI résume les différentes variations observées sur les échantillons (10 boîtes) sélectionnés ainsi que celles calculées pour la population (150 boîtes) afin de vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse. Il est important de souligner que ces variations ont été mesurées sans que des dispositions particulières aient été prises à l'usine d'enrobage pour la fabrication de ce type d'enrobé.

Tableau XXXI

Variations mesurées pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage en masse à l'usine

		Bitume	Pierre (> 5mm)	Filler (< 80µm)	PCG (vides à N _{design})
Lots	Moyenne	7,16%	69,5%	13,4%	7,6%
	Écart-type (s)	0,18%	0,92%	0,36%	0,40%
	Nombre d'échantillons	10	10	10	10
Population interval de confiance : 95%	\bar{X} min ¹	7,02%	68,82%	13,11%	7,25%
	\bar{X} max ¹	7,29%	70,21%	13,65%	7,86%
	Taux de variation relative ²	1,85%	1,00%	2,04%	4,00%

Note 1 : $\bar{X} = \text{moyenne} \pm a * s$ avec $a = 0,754$ pour $n = 10$ selon la loi de Student

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

5.4.6 Formulation de l'enrobé prélevé à l'usine

Le Tableau XXXII résume les principales caractéristiques de l'enrobé échantillonné en masse (1,5 tonnes) à l'usine de production.

Tableau XXXII

Formulation ciblée en laboratoire pour la planche d'essai

Enrobé		SMA _{SHER 55} (#L18)	SMA _{SHER 55} USINE
Teneur en fibre d'amiante (%)		1,3	1,3
Type de bitume (PG)		58 – 28	58 – 28
Tamisat (%)	14 mm	100	100
	10 mm	91	87
	5 mm	31	29
	2,5 mm	21	20
	1,25 mm	19	19
	630 µm	18	18
	315 µm	17	17
	160 µm	16	17
Enrobés	Pierre 5/10 (%)	74,18	79,70
	Pierre 0/5 (%)	4,84	5,20
	Filler (%)	12,82	13,80
	Fibre (%)	1,25	1,30
	b (%)	6,91	6,43
	Vi (%)	2,3	3,0
	V _{be} (%)	15,8	15,8
	V _{p>5mm} (%)	74,18	79,18
	V _{p>5mm} (L/m ³)	651,64	655,01
	M _{p>5mm} (kg/m ³)	1724	1724
	D _{mb}	2,323	2,330
	D _{mm}	2,409	2,402
Presse à cisaillement giratoire (PCG)	10 N	15,2 %	14,8 %
	60 N	6,7 %	6,9 %
	80 N	5,5 %	5,8 %
	100 N	4,7 %	5,0 %
	200 N	2,9 %	3,0 %

Note 1 : Représentatif du lot échantillonné en masse à l'usine : 1,5 tonnes prélevés

5.5 Caractéristiques de la performance de l'enrobé SMA produit en usine d'enrobage

Afin d'analyser plus en détails l'enrobé SMA (fiche technique à l'Annexe 21) produit en chantier, des essais de performance plus poussés ont été réalisés à partir d'une gâchée d'enrobé produite en usine d'enrobage et échantillonnée en masse directement au site et ce, en cours de la mise en œuvre de la planche d'essai. Les essais réalisés pour évaluer les performances de l'enrobé SMA sont :

- a. la résistance à l'orniéreur LCPC;
- b. le coefficient de dilation thermique (α);
- c. l'essai de retrait thermique empêché (TSRST);
- d. le module complexe de l'enrobé (E^*).

Les résultats des différents essais sont illustrés dans les prochaines sous sections. De plus, les résultats obtenus pour l'enrobé SMA_{55 SHER USINE} sont directement comparés à ceux obtenus pour les enrobés EGA-10_{55 SHER USINE} et ESG-10_{USINE} et dont les fiches techniques sont disponibles aux Annexes 22 et 23.

Il est important de souligner que les matières premières utilisées pour la confection de l'enrobé EGA-10_{55 SHER USINE} sont de la même provenance que pour l'enrobé SMA_{55 SHER} : le même lot de bitume a servi pour la confection des enrobés SMA_{55 SHER} et EGA-10_{55 SHER USINE}. De plus, les deux enrobés ont été échantillonnés suivant la même procédure ($\pm 1\ 500$ kg) et à partir d'une gâchée complète réalisée en usine d'enrobage de $\pm 3\ 700$ kg : la planche d'essai a été réalisée dans le cadre d'une construction neuve pour laquelle l'enrobé de surface était l'enrobé EGA-10_{55 SHER USINE}, lequel est considéré comme l'enrobé de référence.

Par ailleurs, les matières premières utilisées pour la confection de l'enrobé ESG-10_{USINE} sont de natures différentes : le bitume utilisé est du grade PG 70-28. Également, l'enrobé ESG-10_{USINE} n'a pas été produit à la même usine d'enrobé que les deux autres (SMA_{55 SHER} et EGA-10_{55 SHER USINE}) mais par le même producteur. Par contre, la même

procédure d'échantillonnage de masse a été appliquée pour cet enrobé : prélèvement de 100 boîtes ($\pm 1\ 500$ kg) d'une fournée de $\pm 3\ 400$ kg.

5.5.1 Mesure de la résistance à l'orniéreur LCPC

L'évaluation de la résistance à l'orniérage a été effectuée à l'aide de l'essai à l'orniéreur. Deux plaques d'enrobés ont été confectionnées pour chaque type d'enrobé. La moyenne des deux plaques pour chaque enrobé est identifiée dans le Tableau XXXIII et à la Figure 33.

À partir de ces résultats, on constate que la performance à l'orniérage de l'enrobé SMA_{55 SHER CHANTIER} performe très bien comparativement aux autres enrobés. On constate également que l'enrobé EGA-10_{55 SHER USINE}, qui est également confectionné à partir de fibres d'amiante et d'un même grade de bitume PG (PG 58-28) que l'enrobé SMA_{55 SHER CHANTIER}, présente une moins bonne performance. Par ailleurs, la performance à l'orniérage de l'enrobé ESG-10_{USINE} se situe entre l'enrobé EGA-10_{55 SHER USINE} et SMA_{55 SHER USINE}. Par contre, il est important de tenir compte que l'enrobé ESG-10_{USINE} a été confectionné à partir d'un bitume supérieur soit un PG 70-28.

Lors de l'analyse des résultats d'orniérage, il est primordial de tenir compte du pourcentage de vides dans l'enrobé puisque ce dernier influence directement la performance de l'enrobé au test d'orniéreur. Il est donc possible que la compacité élevée mesurée sur les plaques de l'enrobé EGA-10_{55 SHER USINE} affecte sa performance à l'orniérage. Toutefois, il est important de mentionner que l'enrobé ESG-10_{USINE} a été confectionné à partir d'un bitume PG 70-28 et que les essais à l'orniéreur sont réalisés à 60°C peu importe le grade de bitume utilisé. Ainsi la performance observée à 30 000 cycles par l'enrobé ESG-10_{USINE}, dont le grade de bitume est un PG 70-28, n'est pas en soi surprenante puisque ce type de bitume demeure plus performant à 60°C étant donné que sa limite supérieure de température est fixée à 70°C comparativement à 58°C pour les enrobés SMA_{55 SHER USINE} et EGA-10_{55 SHER USINE}. Évidemment, le coût du bitume PG 70-28 est nettement plus important que celui du PG 58-28.

Tableau XXXIII

Résultats de l'essai à l'orniérage

Enrobé	Type de bitume	Plaque et Moy.	% des vides ¹	% d'orniérage							
				Après 100 cycles	Après 300 cycles	Après 1 000 cycles	Après 3 000 cycles	Après 10 000 cycles	Après 20 000 cycles	Après 30 000 cycles	Après 60 000 cycles
SMA ₅₅ SHER LABO	PG 58-28	1	5,11	2,13	4,37	5,98	6,30	7,97	8,31	8,88	10,26
		2	4,03	2,13	4,85	5,25	6,07	6,70	7,79	8,50	9,36
		Moy	4,57	2,13	4,61	5,62	6,19	7,34	8,05	8,69	9,81
SMA ₅₅ SHER USINE	PG 58-28	1	5,40	1,59	2,34	2,95	3,46	3,96	4,44	5,61	6,39
		2	5,30	1,61	2,12	2,83	3,63	4,76	5,56	6,52	7,78
		Moy	5,35	1,60	2,23	2,89	3,55	4,36	5,00	6,07	7,09
EGA-10 ₅₅ SHER USINE	PG 58-28	1	3,99	5,33	5,87	6,38	7,78	11,39	12,30	13,01	n/d
		2	3,32	3,83	5,12	6,02	7,60	8,20	9,64	10,52	n/d
		Moy	3,66	4,58	5,50	6,20	7,69	9,80	10,97	11,77	n/d
ESG-10 _{USINE}	PG 70-28	P1	5,00	2,72	2,66	3,79	5,21	4,38	5,00	5,50	n/d
		P2	4,98	2,22	3,09	3,12	3,76	4,66	4,53	4,95	n/d
		Moy	4,99	2,47	2,88	3,46	4,49	4,52	4,77	5,00	n/d

Note 1 : La teneur en vides est évaluée après la compaction des plaques et à partir de la mesure de la masse volumique apparente de chacune des plaques par pesée hydrostatique

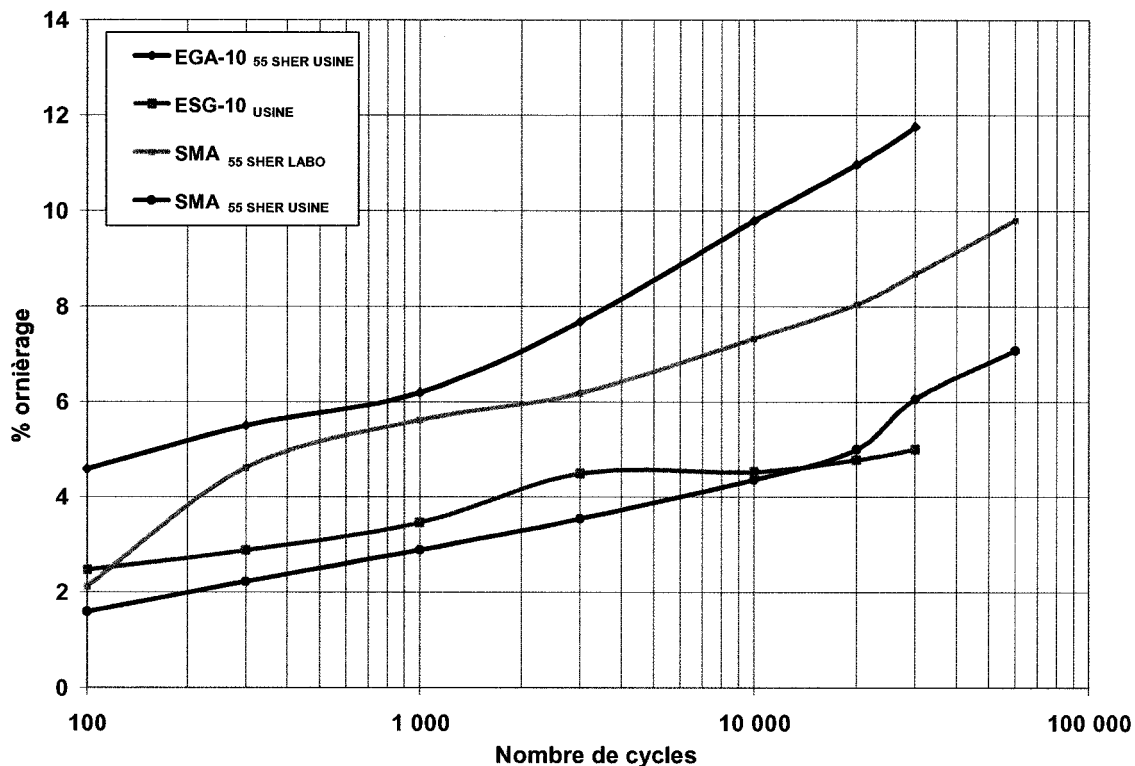


Figure 33 Graphique illustrant le pourcentage d'orniérage en fonction du nombre de cycles pour les trois enrobés échantillonnés en masse en usine d'enrobage et l'enrobé formulé en laboratoire

Le critère de performance fixé par le MTQ est un maximum de 20% de déformations à 3 000 cycles. La moyenne de tous les enrobés SMA produits en laboratoire et en usine ne dépassent même pas la valeur de 10% et ce, même après 60 000 cycles.

5.5.2 Mesure du coefficient de dilatation thermique

Les résultats obtenus pour l'essai de coefficient de dilatation thermique sont illustrés dans le Tableau XXXIV et à la Figure 34.

Exception faite des résultats obtenus pour le pallier de température de -5°C , les résultats indiquent que l'enrobés SMA_{55 SHER USINE} possèdent un coefficient de dilatation thermique supérieur aux enrobés EGA-10_{55 SHER USINE} et ESG-10_{USINE}. Ces résultats

sont tout à fait normaux puisque cet enrobé possèdent un taux de bitume supérieur qui lui permet de mieux réagir aux changements de température.

Tableau XXXIV

Résultats des coefficients de dilatation thermique en fonction de la température

Enrobé		Température d'essai (°C)			
		-5	-15	-25	-35
α (μ strain / °C)	SMA ₅₅ SHER CHANTIER	26,2	26,2	23,8	19,4
	EGA-10 ₅₅ SHER USINE	27,1	24,8	23,0	18,2
	ESG-10 _{USINE}	22,9	20,6	19,2	15,8

Par ailleurs, les résultats obtenus de nos essais sont tout à fait comparables aux résultats obtenus dans diverses études tel que montré à la section §3.3.5.

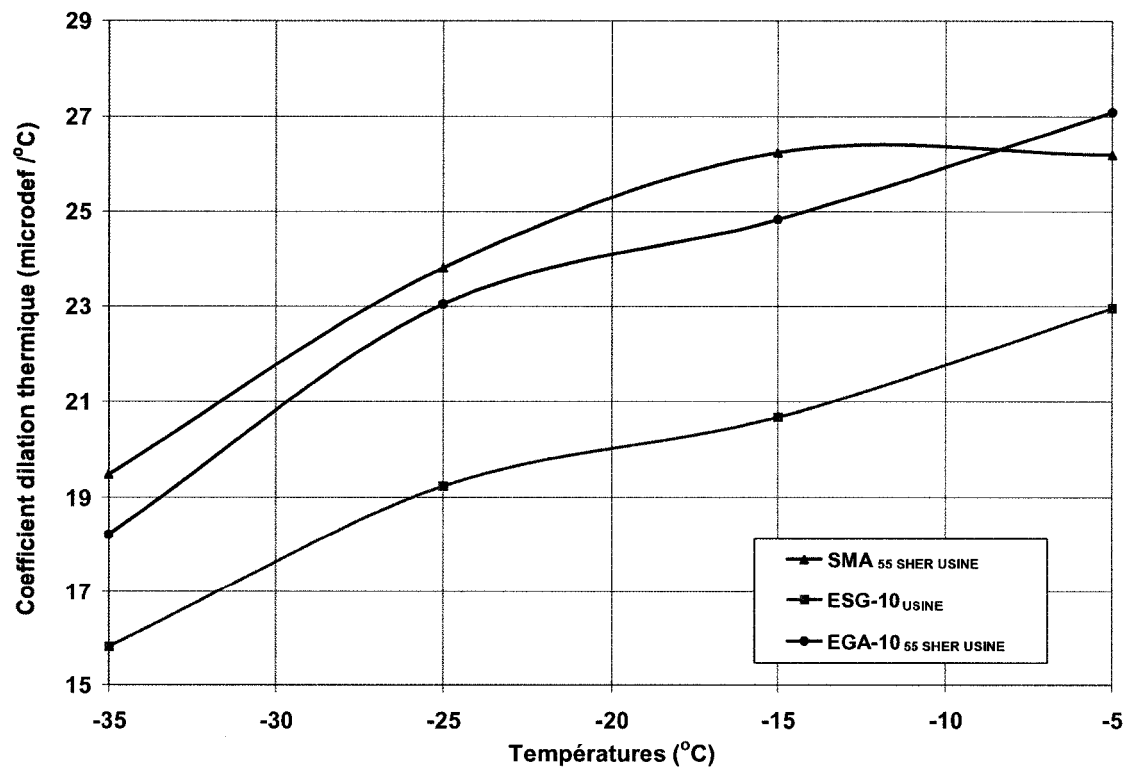


Figure 34 Graphique illustrant les résultats des coefficients de dilatation thermique

5.5.3 Essais de Retrait thermique empêché : TSRST

L'essai TSRST a été effectué sur les enrobés SMA₅₅ SHER USINE, EGA-10₅₅ SHER USINE et ESG-10_{USINE}. Les résultats de ces essais sont présentés dans le Tableau XXXV. Exception faite de l'enrobé ESG-10_{USINE}, trois éprouvettes ont été testées pour évaluer la performance à basse température de ces enrobés et ce, dans le but d'obtenir le résultat le plus représentatif possible et pour se conformer à la norme d'essai AASHTO TP10-93. Les moyennes des relations contrainte-température en cours d'essai sont illustrées à la Figure 35.

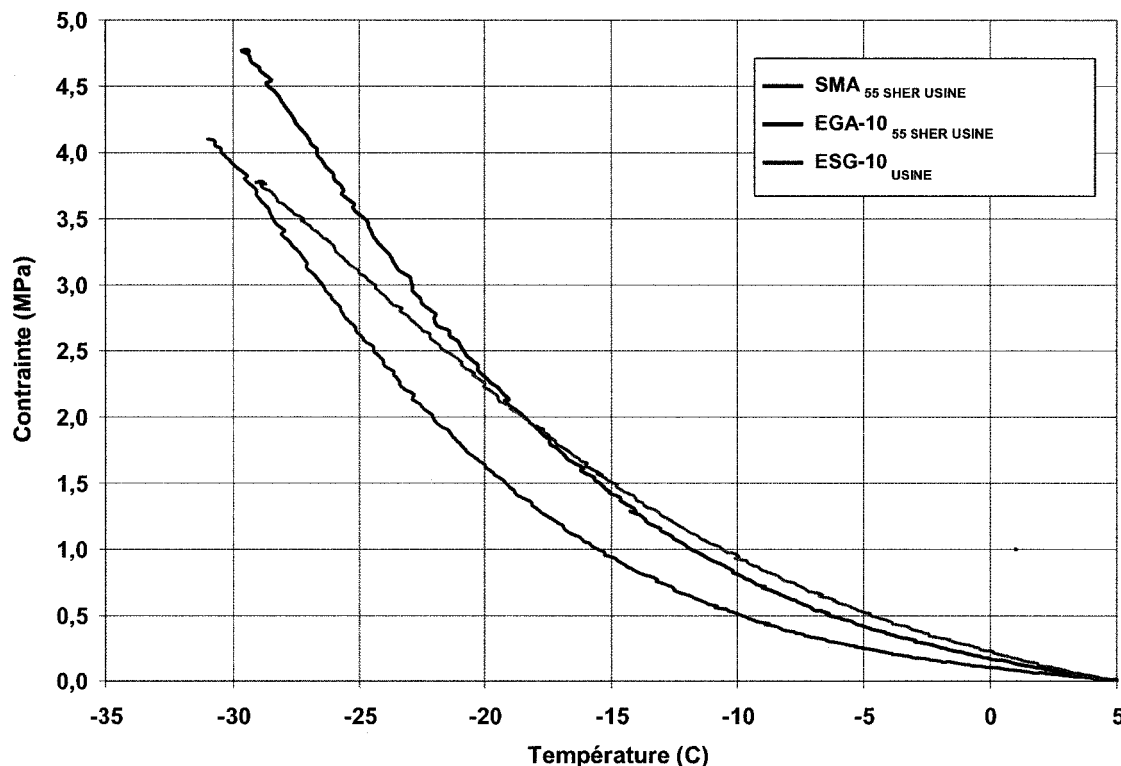
Les résultats obtenus sont tout à fait comparables aux résultats que l'on retrouve dans la littérature tel que présentés à la section § 1.7.4. Rappelons notamment qu'il a été montré que les enrobés SMA confectionnés de bitume sans polymères (composition comparable au bitume PG 58-28 que nous avons utilisé) et avec fibres de cellulose montrent une contrainte de rupture de l'ordre de 3,0 MPa mesurée à une température de -36,0 °C. Dans le cas d'enrobé SMA confectionné avec un bitume polymères et avec fibres de celluloses, la contrainte de rupture mesurée était de 4,4 MPa à une température de -30,6 °C.

En définitive, les températures associées à la contrainte de rupture que nous avons mesurées sont tout à fait dans l'ordre de grandeur pour les enrobés EGA-10₅₅ SHER USINE et ESG-10_{USINE} puisqu'ils ont été confectionnés à partir d'un bitume dont la limite de température inférieure est de -28°C. L'enrobé SMA₅₅ SHER USINE, également composé d'un bitume dont la limite inférieure est de -28°C, performe relativement mieux et rompt à une température moyenne de -31,2°C.

Tableau XXXV

Données recueillies lors de l'essai TSRST

Type d'enrobé	Type de bitume	Éprouvettes	T° de transition tangente (°C)	T° de transition bisectrice (°C)	Pente No.1 dS/dT -	Pente No.2 dS/dT -	Contrainte maximale de rupture MPa	T° associée à la contrainte maximale (°C)
SMA ₅₅ SHER USINE	PG 58-28	1	-22,59	-15,61	-0,0210	-0,2380	4,10	-31,0
		2	-22,49	-15,94	-0,0210	-0,2683	4,38	-30,6
		3	-22,79	-15,94	-0,0213	-0,2453	4,39	-32,0
		Moy	-22,62	-15,83	-0,0216	-0,2505	4,29	-31,2
		s	0,1243	0,1528	0,0007	0,0129	0,1324	0,5768
EGA-10 ₅₅ SHER USINE	PG 58-28	1	-20,53	-13,84	-0,0360	-0,2431	4,75	-30,5
		2	-20,57	-14,05	-0,0381	-0,2431	4,77	-29,4
		3	-20,83	-13,90	-0,0354	-0,2534	3,96	-26,9
		Moy	-20,64	-13,93	-0,0365	-0,2525	4,49	-28,9
		s	0,1323	0,0899	0,0012	0,0074	0,3801	1,5173
ESG-10 _{USINE}	PG 70-28	1	-15,47	-9,49	-0,0407	-0,1476	3,05	-25,7
		2	-15,57	-10,24	-0,0449	-0,1641	3,79	-29,0
		Moy	-15,52	-9,87	-0,0428	-0,1558	3,42	-27,4
		s	0,0469	0,3710	0,0021	0,0083	0,3683	1,6235



* Chaque courbe représente la moyenne de 3 éprouvettes

Figure 35 Relation entre la température et la contrainte induite au sein d'une éprouvette (\varnothing 60 mm X 250 mm; taux de gel : 10°C/hr) en retrait thermique empêché

5.5.4 Essais de module complexe

À partir des valeurs expérimentales obtenues pour chacun des trois enrobés étudiés, nous avons établi les paramètres du modèle de Huet-Sayegh. Le modèle d'Huet-Sayegh nous permet de mettre en évidence de façon plus spécifique la différentielle de performance entre ces enrobés. En effet, toute comparaison au niveau rhéologique d'un enrobé doit impérativement se faire à la même température et pour la même fréquence de sollicitation : autrement toute comparaison demeure futile puisque les propriétés de l'enrobé sont fortement influencées pas les conditions d'essai. Par ailleurs, le modèle de Huet-Sayegh va nous permettre d'extrapoler certaines propriétés rhéologiques inaccessibles par des mesures en laboratoire. Le module complexe sera alors extrait selon la performance recherchée pour un couple fréquence-température

donné. Le Tableau XXXVI résume les valeurs des paramètres du modèle établi pour les enrobés SMA₅₅ SHER USINE, EGA-10₅₅ SHER USINE et ESG-10_{USINE}, tandis que les courbes correspondantes sont présentées dans le plan Cole-Cole à la Figure 36.

Tableau XXXVI

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

Paramètres	Unités	SMA ₅₅ SHER USINE	EGA-10 ₅₅ SHER USINE	ESG-10 ₅₅ USINE
Type de Btume		PG58-28	PG58-28	PG70-28
E _{infini}	(MPa)	32175	37100	38700
E _{zéro}	(MPa)	90	10	5
Δ	n/a	2,296	3,016	2,857
'k'	n/a	0,164	0,171	0,144
'h'	n/a	0,439	0,408	0,347
$\tau = e^{(a + b \cdot T + c \cdot T^2)}$	a	-0,375	1,986	0,692
	b	-0,422	-0,442	-0,404
	c	0,002	0,002	0,004

5.6 Résultats obtenus lors de l'analyse de la stabilité de la production en chantier

Afin d'étudier la stabilité de la production en chantier, chaque lot échantillonné sur la planche d'essais (15 lots) fut analysé suivant les mêmes procédures établies à la section §5.4.

Tout comme pour les sections de l'évaluation de l'homogénéité de l'échantillonnage de masse, les graphiques représentés dans cette section présentent les valeurs cibles de formulation ainsi que la valeur moyenne des essais pour fin de comparaison.

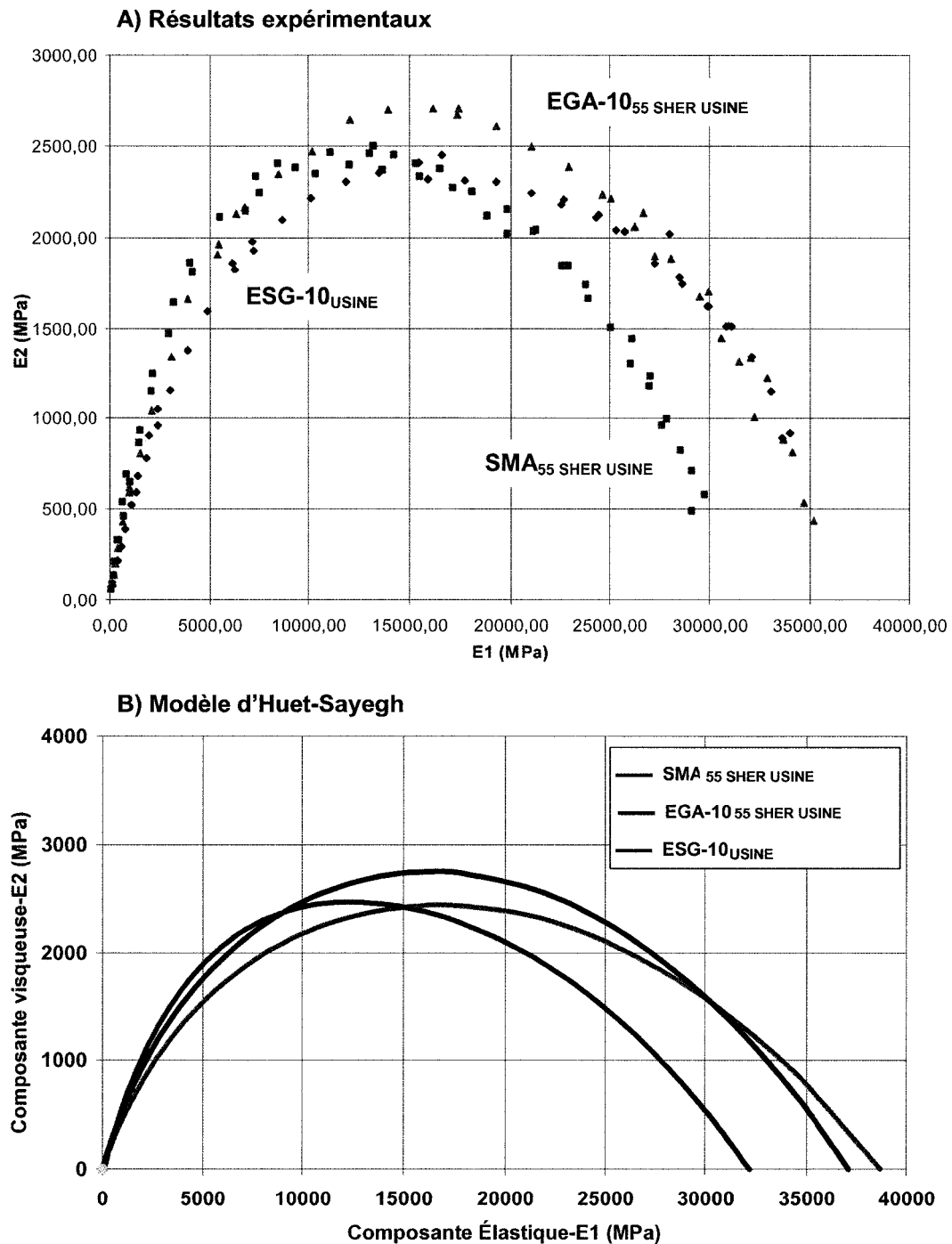


Figure 36 Représentation dans le plan Cole-Cole des résultats expérimentaux obtenus pour les 3 enrobés étudiés et des courbes obtenues de l'application du modèle de Huet-sayegh (\varnothing 80 mm X 120 mm; traction/compression alternée ($\epsilon_{\text{MOYEN}} = 0$))

5.6.1 Présentation des résultats relatifs à la teneur en bitume

Compte tenu du fait que la teneur en bitume a été évaluée à l'aide du four à ignition, la teneur en bitume de chaque lot fut analysée en tenant compte du facteur de correction obtenue à la section §5.4. Le Tableau XXXVII ainsi que la Figure 37 illustre l'ensemble des valeurs corrigées obtenues pour chaque lot testé.

On peut estimer à partir du résultat de cet échantillon constitué de 14 valeurs, que la moyenne de la population correspondante à l'ensemble de la production est comprise entre 6,90% et 7,05%. Malgré le fait que la valeur moyenne de la teneur en bitume produite en chantier (6,98%) soit légèrement supérieure à la valeur cible (6,91%), il n'en demeure pas moins que la plage de variation au sein du lot de masse est tout à fait acceptable (variation relative légèrement supérieure à 1%) et quelle s'apparente relativement bien à la valeur moyenne (7,16%) de l'ensemble des lots analysés pour l'échantillonnage de masse.

Tableau XXXVII

Résultats de l'essai au four à ignition

No. Lots ¹	Teneur en bitume	No. Lots	Teneur en bitume
L204499	6,99 %	L201960	7,09 %
L211574	6,79 %	L206498	6,83 %
L205104	6,98 %	L205078	7,14 %
L208821	6,98 %	L205444	5,06 % ²
L208013	7,01 %	L211558	6,83 %
LC68669	7,15 %	L205104	6,88 %
L180122	7,01 %	L208821	6,81 %
L205444	7,17 %		
Valeur Moyenne		6,98 %	
Valeur Maximale		7,22 %	
Valeur minimale		5,06 %	
Écart type		0,13	
% ciblé (Tableau XXXI section §5.3)		6,91 %	

Note 1 : La localisation de chacun des lots quant à son emplacement sur la planche d'essai est donnée à la Figure 24

Note 2 : Cette valeur ne fut pas considérée dans les calculs

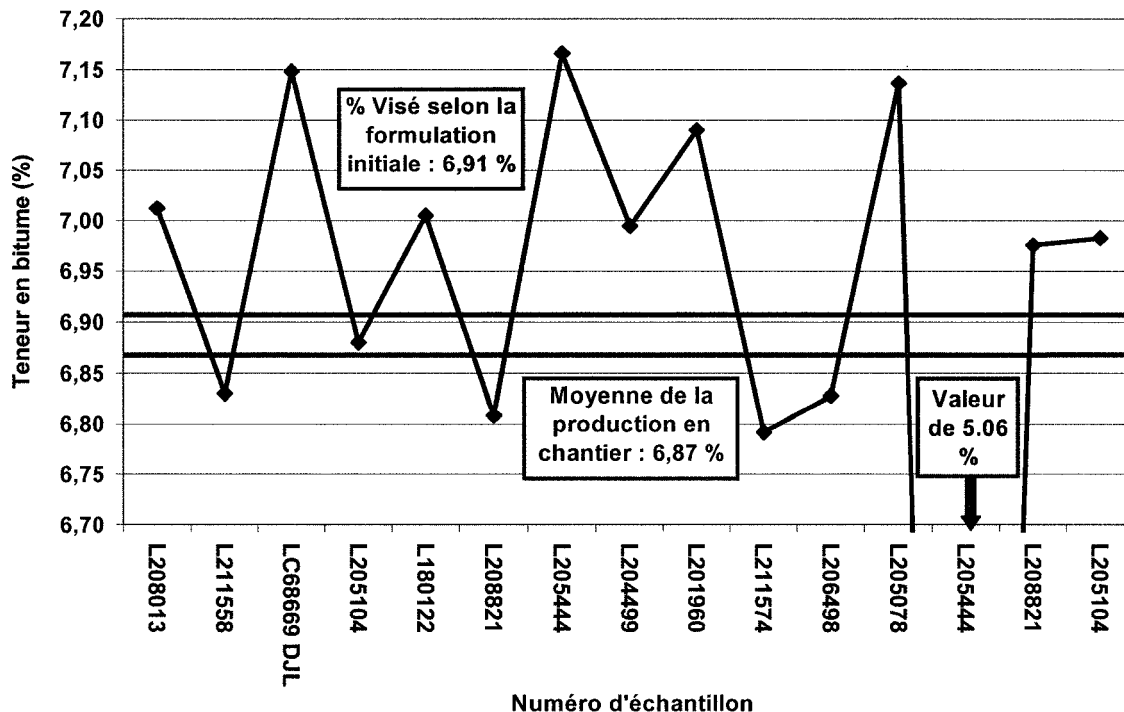


Figure 37 Relation illustrant la variation de la teneur en bitume en fonction du numéro de camion échantillonné

5.6.2 Présentation des résultats relatifs à la variation de la granulométrie de l'enrobé en cours de production

Afin d'établir la granulométrie de chaque lot échantillonné, une analyse granulométrique par lavage fut effectuée afin de déterminer avec exactitude le pourcentage de particules passant le tamis 80 μm . Le tout fut exécuté conformément à la norme LC 21-040. L'ensemble des données recueillies suite à l'analyse granulométrique est disponible au Tableau XXXVIII.

On remarque que les valeurs moyennes, à l'exception des valeurs observées au tamis 10 mm et au tamis 80 μm , se rapprochent étroitement des valeurs ciblées lors de la formulation en laboratoire.

Tableau XXXVIII

Résultats de la granulométrie et de l'essai au four à ignition

Tamis		% Passant au Tamis							
		10 mm	5 mm	2,5 mm	1,25 mm	630 µm	315 µm	160 µm	80 µm
No. Lot	L204499	87,4	29,3	20,2	18,2	17,1	16,1	14,7	11,0
	L201960	90,9	30,5	21,1	19,2	18,1	16,6	15,1	11,1
	L211574	90,0	30,1	20,3	18,4	17,4	16,8	16,0	12,4
	L206498	83,8	29,7	19,4	17,7	16,7	15,8	14,6	10,6
	L205104	89,9	31,7	21,2	19,1	18,0	17,1	16,0	12,2
	L205078	89,7	31,1	22,1	20,0	18,8	17,9	16,9	13,3
	L208821	88,8	30,0	20,9	19,0	17,9	17,3	16,1	11,8
	L205444	96,3	31,5	21,2	19,1	18,0	17,2	15,7	11,8
	L208013	88,2	30,1	19,6	17,9	16,8	16,2	15,4	12,0
	L211558	87,1	30,4	17,2	18,6	17,4	16,5	15,5	11,8
	LC68669	88,9	31,2	21,8	19,8	18,6	17,7	16,7	13,0
	L205104	88,2	31,7	22,5	20,2	18,9	18,2	17,4	14,0
	L180122	88,4	31,5	21,7	19,6	18,2	17,3	16,2	12,6
	L208821	89,7	31,3	22,1	19,9	18,8	18,2	17,2	13,8
	L205444	91,0	31,4	21,0	19,1	18,1	17,7	16,6	13,1
Moyenne		88,6	30,8	20,8	19,0	17,9	17,1	16,0	12,3
Maximum		91,0	31,7	22,5	20,2	18,9	18,2	17,4	14,0
Minimum		83,8	29,3	17,2	17,7	16,7	15,8	14,6	10,6
Écart type		2,64	0,79	1,35	0,77	0,71	0,76	0,86	1,01
% ciblé (Tableau XXXI section §5.3)		91,2	30,7	20,9	18,9	18,0	17,1	16,6	11,6

5.6.2.1 Variation de la teneur en pierre (> 5mm) dans l'enrobé

Le dosage en pierres demeure un point très important à étudier pour les enrobés SMA. Il a été observé qu'une variation de la proportion du gros granulat dans l'enrobé générerait directement une influence sur la compacité de l'enrobé. Pour une augmentation aussi faible que 5 % dans le dosage en gros granulat, l'enrobé devient nettement plus difficile à compacter (la teneur en vides augmente). Le phénomène inverse est tout aussi plausible, pour une diminution (de 5 %) de la proportion de gros

granulats, on observe une baisse du pourcentage de vides et ce, toujours au même nombre de girations (Tremblay, 2001). La Figure 38 illustre la synthèse des travaux de recherche de Tremblay (2001) sur le sujet.

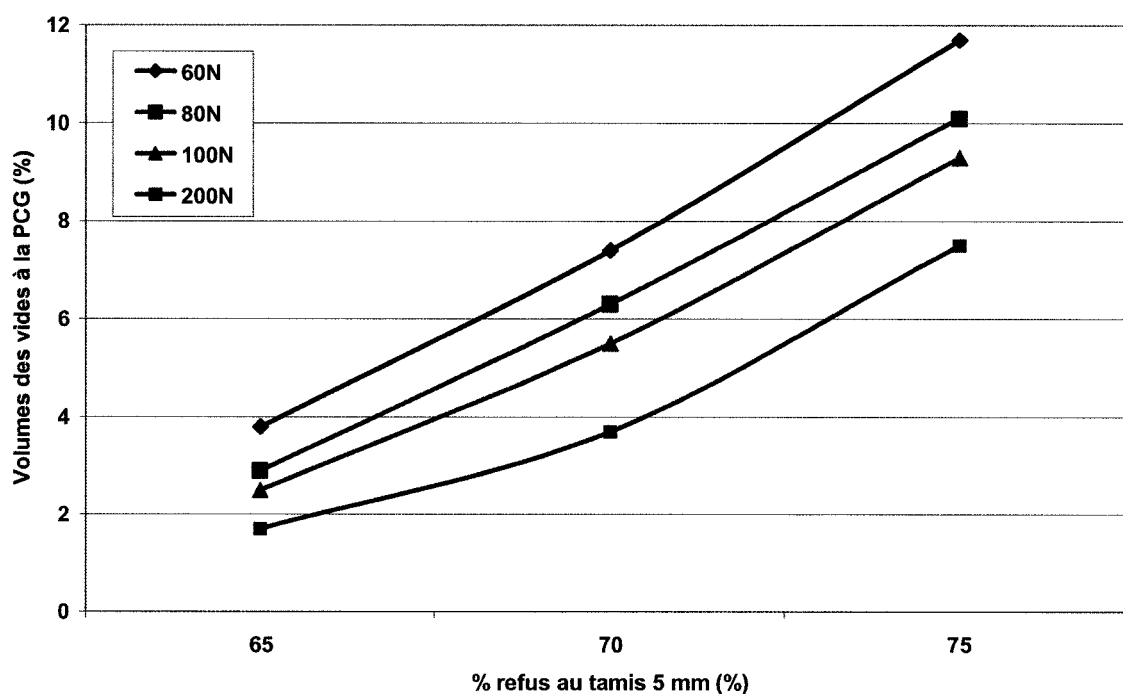


Figure 38 Influence de la proportion de gros granulat sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA évalué à la PCG à partir de l'enrobé confectionnées en laboratoire (adapté de Tremblay 2001)

Dans ce contexte, nous avons tracé (Figure 39) à partir des données du Tableau XXXVIII (transposé en valeur de % retenue (100-% passant)) la variation de la teneur en pierre (> 5 mm) en fonction des lots échantillonnés lors de la mise en œuvre de l'enrobé SMA de la planche d'essai. La valeur moyenne est de 69,2 % pour un écart type de 0,78%. Quant à l'homogénéité de l'ensemble des lots échantillonnés en chantier, on estime que la teneur en pierre est comprise entre 68,79% et 69,68% pour un intervalle de confiance de 95% et ce, avec une variation relative inférieure à 0,7%.

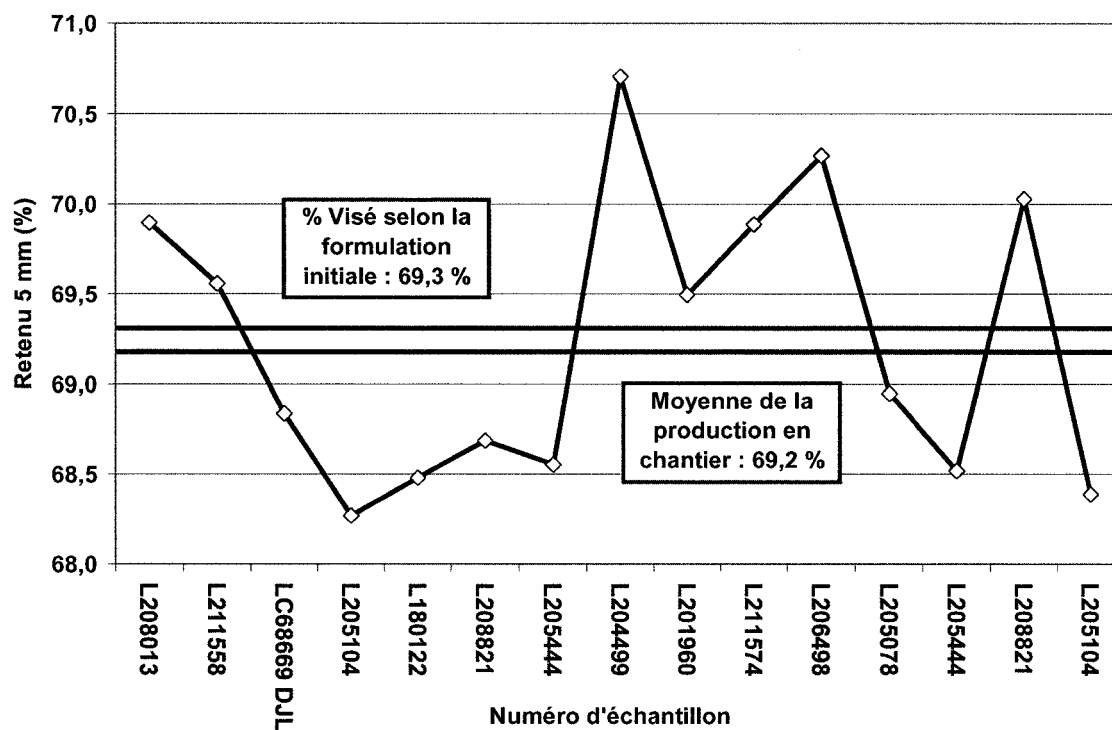


Figure 39 Relation entre la teneur en particules retenues au tamis 5 mm et le numéro de camion échantillonné en cours de mise en œuvre de la planche d'essai

5.6.2.2 Variation de la teneur en particules fines (< 80 μm) dans l'enrobé

Le dosage en particules fines tout comme le dosage en pierre est très important quant à l'aptitude au compactage (teneur en vides) de l'enrobé SMA. Comme nous l'avons souligné à la section §4.1.4, une variation d'environ 1% quant au dosage en filler peut avoir des effets néfastes au point de vue de la compacité de l'enrobé (Figure 23).

Rappelons que, suite à de nombreux essais réalisés en laboratoire (chapitre 4), nous avons mis en relief que selon les matières premières mises à notre disposition pour la confection de l'enrobé SMA, l'optimum en filler est situé à 11,6% pour un pourcentage de vides de 6,7%. Une variation en filler de 1% dans la production génère une augmentation des vides dans l'enrobé d'au moins 0,5% (Figure 23). Ce qui peut

généraliser plusieurs problèmes de compaction et de pose lors de la mise en place de l'enrobé en chantier.

À partir des analyses de la granulométrie effectuée sur l'ensemble des lots échantillonnés, la variation de la teneur en particules fines dans l'enrobé (filler : passant le tamis 80 μm) en fonction de chacun des camions échantillonnés est présentée à la Figure 40 (synthèse des analyses : Tableau XXXVIII). La valeur moyenne est de 12,3 % pour un écart type de 1,02%. Quant à l'homogénéité de l'ensemble des lots échantillonnés en chantier, on estime que la teneur en filler de la population est comprise entre 11,72 et 12,89 % suivant un intervalle de confiance de 95% et ce, pour une variation relative inférieure à 5%.

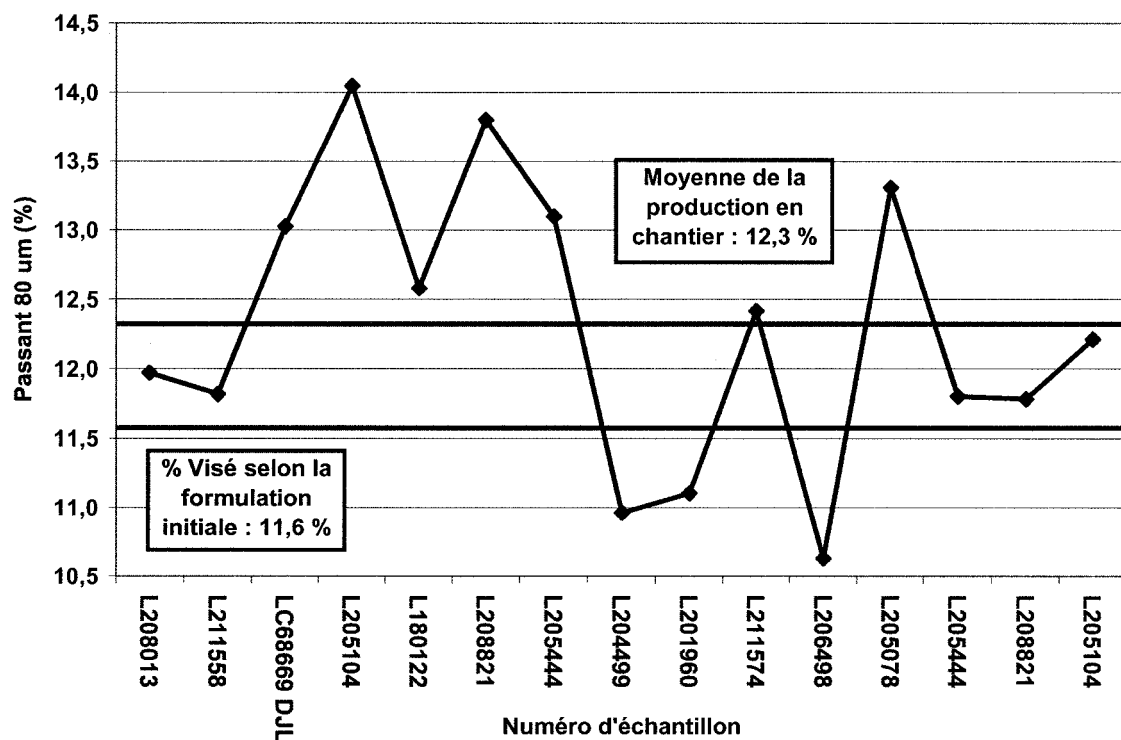


Figure 40 Relation entre la teneur en particules passant le tamis 80 μm et le numéro de camion échantillonné en cours de mise en œuvre de la planche d'essai

5.6.2.3 Présentation des résultats relatifs à la variation de l'aptitude au compactage en cours de production évaluée à l'aide de la PCG

Les variations de la teneur en vides en cours de compaction à l'essai de la PCG évaluées sur l'échantillon prélevé pour chacun des camions échantillonnés sont présentées au Tableau IXL. Les valeurs présentées correspondent respectivement aux résultats mesurés à 10, 60 et 200 girations. Les seuils de 10 et 200 girations sont des niveaux standard de contrôle pour le MTQ. À 10 girations, le pourcentage de vides doit être supérieur ou égal à 11 % et à 200 girations, il doit être supérieur à 2 %. De son côté, le seuil de 60 girations a été établi comme le N_{design} pour l'enrobé SMA et le pourcentage de vides doit se situer entre 4 et 7 %. La Figure 41 illustre les valeurs obtenues à 60 girations ainsi que les limites admissibles. La valeur moyenne observée est donc de 7,0 % pour un écart type de 0,80%.

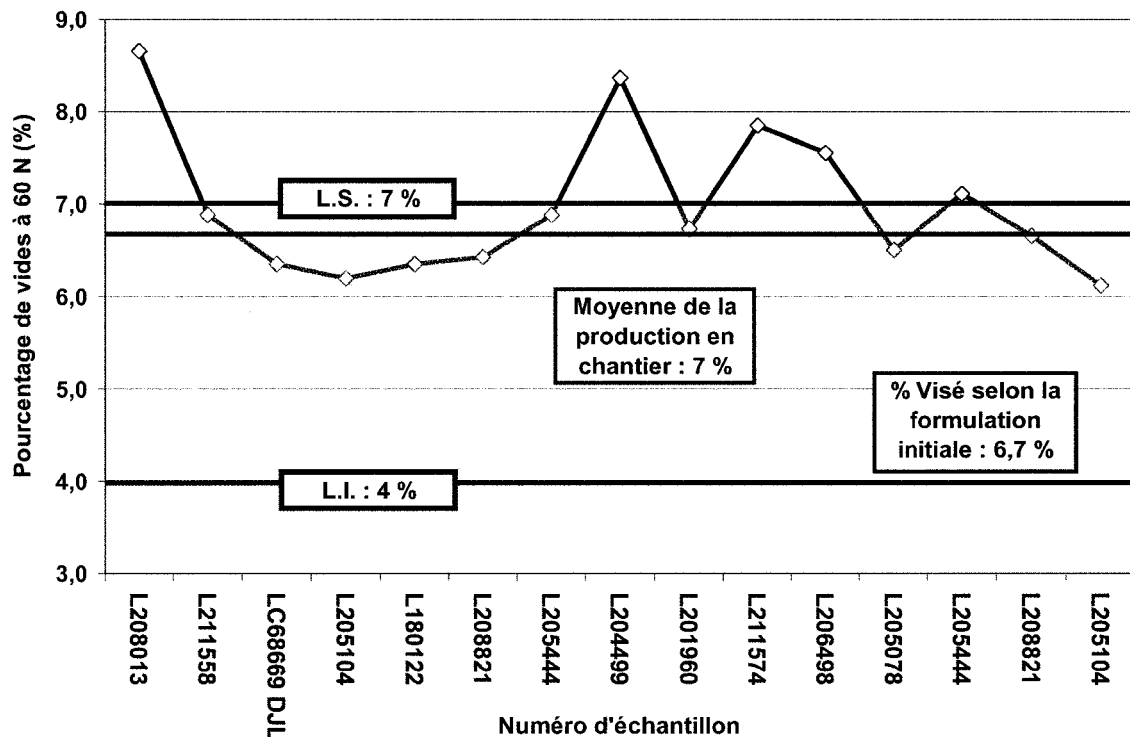


Figure 41 Relation entre la variation du pourcentage de vides à 60 girations à l'essai à la PCG et le numéro de camion échantillonné en cours de mise en œuvre de la planche d'essai

Quant à l'homogénéité de l'ensemble des lots échantillonnés en chantier, on estime que le pourcentage de vides à 60 girations est compris entre 6,53% et 7,43 % suivant un intervalle de confiance de 95% et ce, pour une variation relative inférieure à 7%.

Tableau IXL

Résultats de l'essai à la PCG

Nombre de giration : N		Pourcentages de vides dans l'enrobé (%)		
		10	60	200
No. Lot	L204499	16,5	8,4	4,5
	L201960	14,9	6,7	3,0
	L211574	16,1	7,9	4,0
	L206498	15,6	7,6	3,5
	L205104	14,4	6,1	2,5
	L205078	14,7	6,5	2,5
	L208821	15,0	6,7	2,8
	L205444	15,1	7,1	3,2
	L208013	16,6	8,7	4,9
	L211558	15,2	6,9	3,0
	LC68669	14,9	6,4	2,4
	L205104	14,6	6,2	2,5
	L180122	14,7	6,4	2,5
	L208821	14,6	6,4	2,5
	L205444	15,0	6,9	3,1
Moyenne		15,2	7,0	3,1
Maximum		16,6	8,7	4,9
Minimum		14,4	6,1	2,4
Écart type		0,69	0,80	0,78
% ciblé (Tableau XXXI section §5.3)		15,2	6,7	2,9

5.6.2.4 Tableau récapitulatif des variations mesurées des échantillons prélevés sur la planche d'essai

Le Tableau XL résume les différentes variations observées sur les échantillons (15 camions) prélevés sur la planche d'essai.

Tableau XL

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

		Bitume	Pierre (> 5mm)	Filler (< 80µm)	PCG (vides à N _{design})
Lots	Moyenne	6,98%	69,2%	12,3%	7,0%
	Écart-type (s)	0,13%	0,78%	1,02%	0,79%
	Nombre d'échantillons	14	15	15	15
Population Intervalle de confiance : 95%	\bar{X} min ¹	6,90%	68,79%	11,72%	6,53%
	\bar{X} max ¹	7,05%	69,68%	12,89%	7,43%
	Taux de variation relative ²	1,12%	0,65%	4,72%	6,46%

Note 1 : $\bar{X} \pm a \cdot s$ = moyenne $\pm a \cdot s$ avec $a = 0,600$ pour $n = 14$ et $a = 0,572$ pour $n = 15$ selon la loi de Student

Note 2 : $\left[\left(\frac{\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}}{2} \right) / \text{moyenne} \right] \cdot 100 \%$

5.6.3 Tableau comparatif des différentes formulations des enrobés SMA

Le Tableau XLI représente l'ensemble des données relatives aux enrobés SMA. L'enrobé SMA conçu en laboratoire, l'enrobé SMA₅₅ SHER USINE ainsi que l'enrobé SMA₅₅ SHER CHANTIER sont tour à tour identifiés ainsi que leurs caractéristiques respectives pour fin de comparaison.

Tableau XLI

Formulation ciblée en laboratoire pour la planche d'essai

Enrobé		SMA _{SHER 55} (#L18)	SMA _{SHER 55} USINE ₁	SMA _{SHER 55} CHANTIER ₂
Teneur en fibre d'amiante (%)		1,3	1,3	1,3
Type de bitume (PG)		58 – 28	58 – 28	58 – 28
Tamisat (%)	14 mm	100	100	100
	10 mm	91	87	88
	5 mm	31	29	31
	2,5 mm	21	20	21
	1,25 mm	19	19	19
	630 µm	18	18	18
	315 µm	17	17	17
	160 µm	16	17	16
Enrobés	Pierre 5/10 (%)	74,18	79,70	79,70
	Pierre 0/5 (%)	4,84	5,20	5,20
	Filler (%)	12,82	13,80	13,80
	Fibre (%)	1,25	1,30	1,30
	b (%)	6,91	6,43	6,43
	Vi (%)	2,3	3,0	3,1
	V _{be} (%)	15,8	15,8	15,8
	V _{p>5mm} (%)	74,18	79,18	79,18
	V _{p>5mm} (L/m ³)	651,64	655,01	655,01
	M _{p>5mm} (kg/m ³)	1724	1724	1724
	D _{mb}	2,323	2,330	2,328
	D _{mm}	2,409	2,402	2,402
Presse à cisaillement giratoire (PCG)	10 N	15,2 %	14,8 %	15,2 %
	60 N	6,7 %	6,9 %	7,0 %
	80 N	5,5 %	5,8 %	5,9 %
	100 N	4,7 %	5,0 %	5,1 %
	200 N	2,9 %	3,0 %	3,1 %

Note 1 : Représentatif du lot échantillonné en masse à l'usine : 1,5 tonnes prélevées

Note 2 : Représentatif de la moyenne des lots mise en place sur la planche d'essai

5.7 Résultats quant au degré de compacité de l'enrobé SMA en chantier

Il est important de mentionner que l'épaisseur de mise en place de l'enrobé, qui devait être originalement de 35 mm, a été changée dans les jours précédents la mise en place. En effet, l'épaisseur de la couche de roulement en enrobé SMA à mettre en œuvre sur la planche d'essai devait facilement pouvoir s'agencer à l'épaisseur de l'enrobé constituant l'enrobé de surface utilisé sur l'autoroute, soit le EGA-10. Or, l'épaisseur de ce dernier étant fixée à 48 mm, en conséquence, dans la perspective d'éviter la mise en place d'un enrobé de correction (EB-C de 18 mm) pour assurer le couplage SMA (30 mm) au EGA-10 (48 mm), il a été convenu d'augmenter l'épaisseur de pose du SMA de 30 mm à 48 mm.

Les équipements utilisés lors du contrôle de la pose et de la compaction de l'enrobé SMA en chantier sont décrits au Tableau XLII.

Tableau XLII

Données relatives aux équipements de chantier

Fonction	Endroit	Type
Prise des données de température	À l'usine d'enrobage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sonde thermique contrôlée à l'usine
	En chantier : 1. dans la benne des camions et 2. sur la chaussée	<ul style="list-style-type: none"> ▪ OAKTON InfraPro® 3 Standard Model 35629-20 Infrared Thermometer ▪ Sonde thermique
Prise des données de compaction	En chantier : 1. sur la chaussée	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nucléodensimètre ▪ TROXLER 4640-B
Équipement de compaction en chantier	En chantier : 1. sur la chaussée	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CATERPILLAR ▪ CB-634D

L'utilisation du nucléodensimètre fut nécessaire afin de déterminer le niveau de compaction observé in situ. Étant donné que l'appareil de lecture, le nucléodensimètre, la source radioactive et le détecteur sont situés sur un même plan horizontal et à la surface de la chaussée, le principe de fonctionnement utilisé fut le mode de lecture en rétrodiffusion. Ce mode consiste principalement à mesurer, à l'aide des détecteurs inclus dans le nucléodensimètre, l'intensité du rayonnement émis par la source radioactive qui est rédirigée par le matériau de surface. Il est important de mentionner que ce mode peut être utilisé seulement si la couche de base demeure identique et homogène tout au long du projet, ce qui fut le cas avec notre planche d'essai. La masse volumique est donc déterminée par la suite à l'aide de la formule suivante :

$$MV = \text{Moyenne des lectures} + \text{Facteur de correction} \quad (5.1)$$

Où le facteur de correction est égal à :

$$F.C. = \text{Moy des } \rho \text{ mesurée sur carottes} - \text{Moy des lectures au nucléodensimètre à l'endroit de la carotte}$$

Lors de la prise de données, un minimum de cinq lectures doit être pris à chaque endroit. L'essai est entièrement effectué selon la norme LC 26-510 Détermination de la masse volumique in situ des enrobés à l'aide d'un nucléodensimètre. Il est important de procéder à l'étalonnage de l'appareil au début de la journée à l'aide du bloc de référence et de la procédure fournie par le distributeur pour s'assurer de l'exactitude des données.

Avant d'illustrer les données relatives à l'évolution de la compaction de l'enrobé en cours de mise en œuvre de la planche d'essai, les données concernant la variation de la température seront présentées simultanément (Figure 42). En effet, la compaction en chantier est fortement tributaire de la stabilité de la température de l'enrobé à cette étape. Pour ce faire, nous avons enregistré les températures des enrobés à l'usine d'enrobage et celles au moment de la prise des échantillons dans la benne de la paveuse. Également, lors des opérations de compaction, nous avons enregistré la

température, à chaque passe de rouleau compacteur, pour effectuer un suivi rigoureux de la compacité en fonction de la température.

Dans un premier temps, il convient de souligner que les directives de la norme LC 26-003 spécifient que la température d'enrobage pour un bitume de grade PG 58-28 doit être comprise entre 158 et 162°C. Par ailleurs, cette même norme spécifie que la température au compactage doit être comprise entre 143 et 147°C.

Les températures de l'enrobé mesurées à l'enrobage étaient en moyenne de 155°C et comprises entre 140 et 173°C. Également, la moyenne des températures de l'enrobé au moment du déchargement dans la paveuse était de 144°C pour une plage comprise entre 130 et 152°C.

L'ensemble des données recueillies lors de la compaction est illustré dans le Tableau XLIII ainsi qu'à la Figure 43 (note : localisation des prises de mesure au nucléodensimètre a été illustrée dans la Figure 26 de la section § 5.1). Il est important de rappeler qu'une « passe » de rouleau est considérée comme un aller-retour de rouleau compacteur.

On constate, au Tableau XLIII et à la Figure 43, que l'enrobé SMA a été surcompacté en chantier par rapport aux plages limites de 92 à 96%. Cette observation met en évidence l'importance qu'il faut accorder à l'élaboration d'une planche de convenance préalable à la mise en place de l'enrobé SMA en chantier. Lors de la mise en œuvre de cette planche de convenance, il est très important d'accorder une attention particulière aux conditions de mise en place pour que ces dernières soient le plus représentatives des conditions réelles de la mise en chantier de l'enrobé. Les conditions climatiques et le niveau d'ensoleillement sont particulièrement critiques et doivent être impérativement pris en compte puisque ces conditions affectent directement le niveau de compacité de l'enrobé lors de sa mise en place.

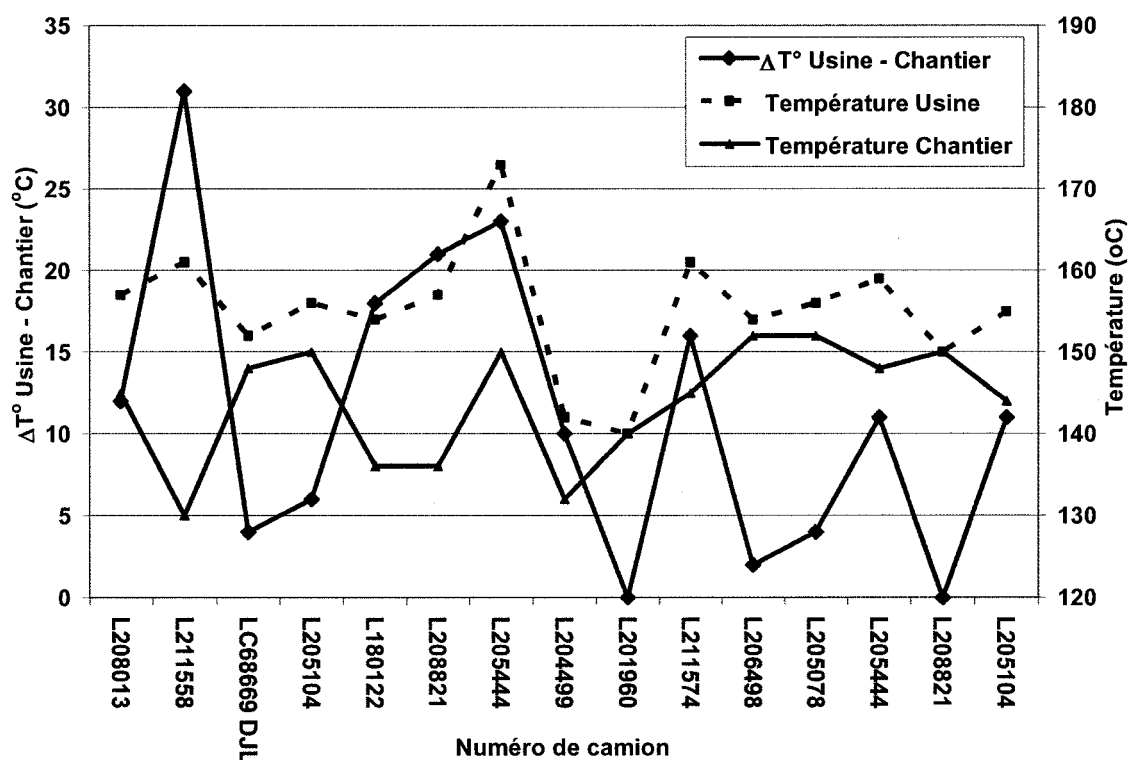


Figure 42 Variation des températures mesurées directement dans le malaxeur (sonde thermique) à l'usine d'enrobage, dans la benne de la paveuse (sonde thermique) au moment de l'échantillonnage à la réception en chantier

Autre point à noter, il est très anormal d'observer une dé-compaction de l'enrobé en cours de compaction. Ce phénomène est peut-être induit par une fragmentation des granulats étant donné que l'enrobé SMA possède comme principale caractéristique un contact pierre sur pierre et que les problèmes de variation du taux de compaction sont induits lorsque l'enrobé se situe dans la plage de compaction ciblée

Des efforts supplémentaires de compaction peuvent engendrer une fragmentation des gros granulats dans un premier temps, donc une dé-compaction de l'enrobé et, par la suite, une re-compaction de l'enrobé suite à de nouvelles passes de rouleau compacteur. Il est à noter que ces actions ne sont pas souhaitables puisqu'elles

induisent un changement au niveau de la granulométrie de l'enrobé. Ce qui affecte indubitablement les caractéristiques et les performances de l'enrobé SMA.

Tableau XLIII

Données recueillies lors de la compaction de l'enrobé SMA₅₅ SHER CHANTIER

Nombre de passes	A Chaînage (3+516)		B Chaînage (3+545)		C Chaînage (3+608)		D Chaînage (3+651)	
	Taux de compaction	T° infra rouge de compaction	Taux de compaction	T° infra rouge de compaction	Taux de compaction	T° infra rouge de compaction	Taux de compaction	T° infra rouge de compaction
	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)
1	81,9	118	83,2	122	n/d	n/d	88,8	80
2	89,5	116	89,8	112	88,1	97	91,8	80
3	91,9	n/d	92,5	84	91,9	85	91,8	75
4	94,1	n/d	94,8	83	93,1	73	95,6	65
5	94,1	111	95,9	89	94,7	89	93,1	63
6	94,0	n/d	97,0	n/d	95,5	74	97,3	65
7	97,0	94	99,0	79	94,3	68	94,4	65
8	98,0	n/d	98,0	80	95,0	65	98,2	65
9	-	-	-	-	95,6	n/d	96,8	n/d
10	-	-	-	-	96,5	50	98,1	51

Note : Une passe équivaut à un aller-retour du rouleau compacteur
 Les valeurs de compaction sont des valeurs corrigées.
 Les valeurs brutes sont disponibles à l'Annexe 24

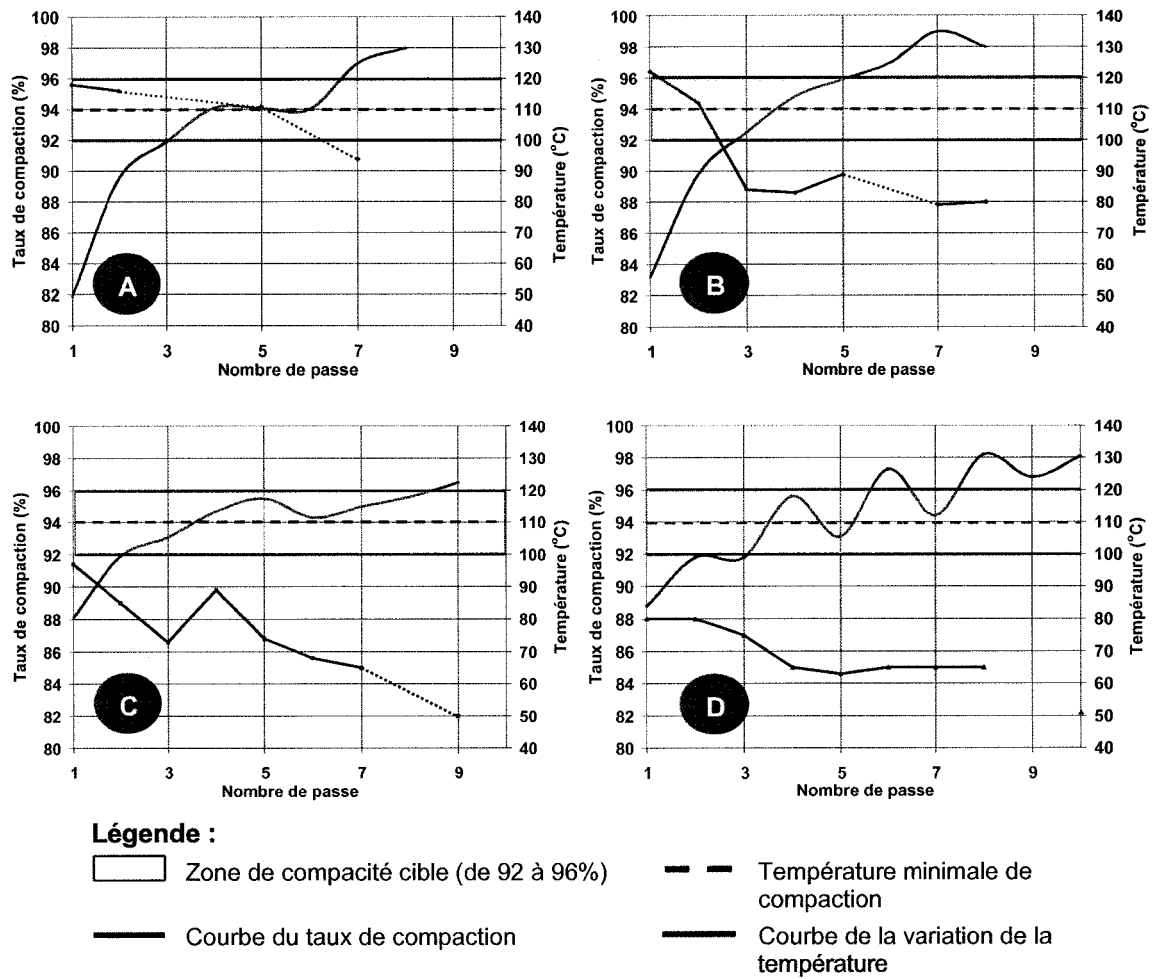


Figure 43 Graphiques illustrant la variation de la température et le degré de compaction en chantier à différent chaînage (A : 3+516 ; B : 3+545 ; C : 3+608 ; D : 3+651)

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS

L'analyse des résultats sera présentée dans quatre sections distinctes. Dans un premier temps, nous traiterons de la pertinence de la valeur du V_{be} fixée quant aux performances escomptées pour l'enrobé SMA à grosseur nominale maximale de 10 mm, SMA-10. Dans un second temps, nous analyserons les résultats de manière à faire ressortir les limites acceptables de cet enrobé SMA pour la production en chantier. Dans un troisième temps, nous voulons apporter quelques éléments de réflexion issus de ce programme de recherche en ce qui a trait à la valeur du N_{design} , paramètre clé quant à la formulation en laboratoire de l'enrobé SMA à l'aide de la PCG. Finalement, une dernière section brossera la synthèse des différents aspects reliés à la production et à la mise en œuvre de l'enrobé SMA.

6.1 Sélection d'un V_{be} approprié

Afin de se rattacher au principe de la formulation élaborée par le MTQ, il convient d'analyser les résultats obtenus avec la perspective de mettre en relief une valeur du V_{be} la plus réaliste possible : le fait de fixer un V_{be} initial nous amène à nous interroger sur la pertinence de fixer des balises minimum et maximum. Évidemment, la pierre angulaire d'une telle analyse réside dans une notion de coût-performance : un surdosage en V_{be} fait croître considérablement le coût de l'enrobé qui doit impérativement se justifier par un accroissement au niveau de ses performances in situ.

6.1.1 Éléments de réflexion

Certes un V_{be} minimum est requis pour assurer la durabilité de l'enrobé au niveau du désenrobage et de l'arrachement tout en permettant d'assurer une bonne cohésion entre les grains du squelette granulaire. Bien que, pour les enrobés conventionnels, la valeur du V_{be} doit être limitée de manière à éviter les risques d'orniérage de l'enrobé tout en limitant le risque de ressuage et de ségrégation excessive. Néanmoins, pour un enrobé fortement chargé en particules grossières, les enrobés pierreux, tel que l'enrobé

SMA, la limite supérieure du V_{be} demeure nettement moins critique : le contact pierre sur pierre assure une excellente stabilité à l'orniérage de l'enrobé (Tableau VL). D'autre part, l'ajout de fibres, au sein des enrobés SMA, a pour but d'enrayer le risque de saignement (« draindown »).

Il demeure tout de même essentiel de fixer un V_{be} minimum. A quel niveau doit-il être fixé pour assurer un enrobé SMA durable et de qualité ? Étant donné que le bitume est le matériau le plus coûteux de l'enrobé, il est très important de sélectionner un critère de design économique sans toutefois altérer et nuire aux performances à atteindre quant à sa durabilité à long terme.

Dans la perspective d'apporter des éléments d'analyse additionnels, un programme d'essai complémentaire a donc été effectué sur des SMA à différentes teneurs en V_{be} soit : 15,2%, 15,8% et 16,5%. Pour chaque valeur de V_{be} , le dosage optimal en filler fut sélectionné (voir Figure 44). Les mêmes matières premières ont été utilisées pour l'ensemble de ces enrobés. Également, le même lot d'un bitume PG 58-28 a été utilisé pour tous les enrobés de ce programme d'étude.

La composition détaillée des différents SMA étudiés est présentée au Tableau XLIV. À partir de ces résultats, une première constatation s'impose : plus le V_{be} augmente dans l'enrobé, plus la teneur optimale en filler diminue. D'autre part, il est intéressant de noter que malgré que la teneur en filler diminue, avec une augmentation du V_{be} , la teneur en vide minimale que l'on peut atteindre diminue également (Figure 44).

Pour fin de comparaison, des essais réalisés pour évaluer les performances de ces différents enrobés SMA ont été effectués : la résistance à l'orniérage, la mesure du coefficient de dilatation thermique ainsi que la mesure du retrait thermique empêché (TSRST). Les résultats sont illustrés dans le Tableau VL ainsi qu'à l'Annexe 25 .

Tableau XLIV

Détails de formulation des enrobés sélectionnés

		L15,2_12,0	SMA ₅₅ SHER LABO	L16,5_11,0
Bitume PG		58-28	58-28	58-28
Refus au 5 mm (%)		68,6	69,3	69,6
Tamisat au 80 µm (%)		12,0	11,6	11,0
V_{be} (%)		15,2	15,8	16,5
Teneur en fibre (%) ⁽¹⁾		0,94	1,25	1,20
Teneur en bitume (%) ⁽¹⁾		6,62	6,91	7,22
Tamis (mm)	14 mm	100,0	100,0	100,0
	10 mm	91,2	91,3	91,0
	5 mm	30,0	30,7	28,7
	2,5 mm	21,0	20,9	19,5
	1,25 mm	19,7	19,1	18,3
	630 µm	18,9	17,9	17,3
	315 µm	18,0	16,9	16,3
	160 µm	17,3	16,3	15,6
	80 µm	12,0	11,6	11,0

Note 1 : Le dosage est établi en fonction du dosage total du mélange incluant les granulats, la fibre et le bitume

Afin de comparer les résultats obtenus, nous présenterons les résultats de performance en fonction du V_{be} .

Tableau VL

Tableau récapitulatif des essais effectués sur les enrobés sélectionnés

Type d'enrobé		L15,2_12,0	SMA ₅₅ SHER USINE	L16,5_11,0
Caractéristiques distinctes	Type de bitume	PG 58-28	PG 58-28	PG 58-28
	Vbe (%)	15,2	15,8	16,5
	Tamisat au 80 μ m (%)	12,0	11,6	11,0
	Refus au 5 mm (%)	68,6	69,3	69,6
	Teneur en fibre (%)	0,94	1,25	1,20
	Teneur en bitume (%)	6,62	6,91	7,22
Orniérage (%)	3 000 cycles	4,36	6,19	6,73
	10 000 cycles	5,58	7,34	8,06
	30 000 cycles	7,06	8,69	10,45
	60 000 cycles	7,96	9,81	13,06
Coefficient de dilatation thermique (μ def/°C)	À - 5 °C	24,34	26,20	27,11
	À - 15 °C	25,11	26,25	28,11
	À - 25 °C	23,31	23,81	26,17
	À - 35 °C	19,21	19,49	21,44
Résistance à basse température (TSRST)	$\sigma_{RUPTURE}$ (MPa)	4,07	4,29	4,39
	T° associé à $\sigma_{RUPTURE}$ (°C)	-32,4	-31,2	-31,7
	T° de transition tangente (°C)	-25,08	-22,62	-23,60
	T° de transition bisectrice (°C)	-18,29	-15,83	-17,02
	Pente No.1 dS/dT (MPa/°C)	-0,0155	-0,0216	-0,0155
	Pente No.2 dS/dT (MPa/°C)	-0,2619	-0,2505	-0,2746

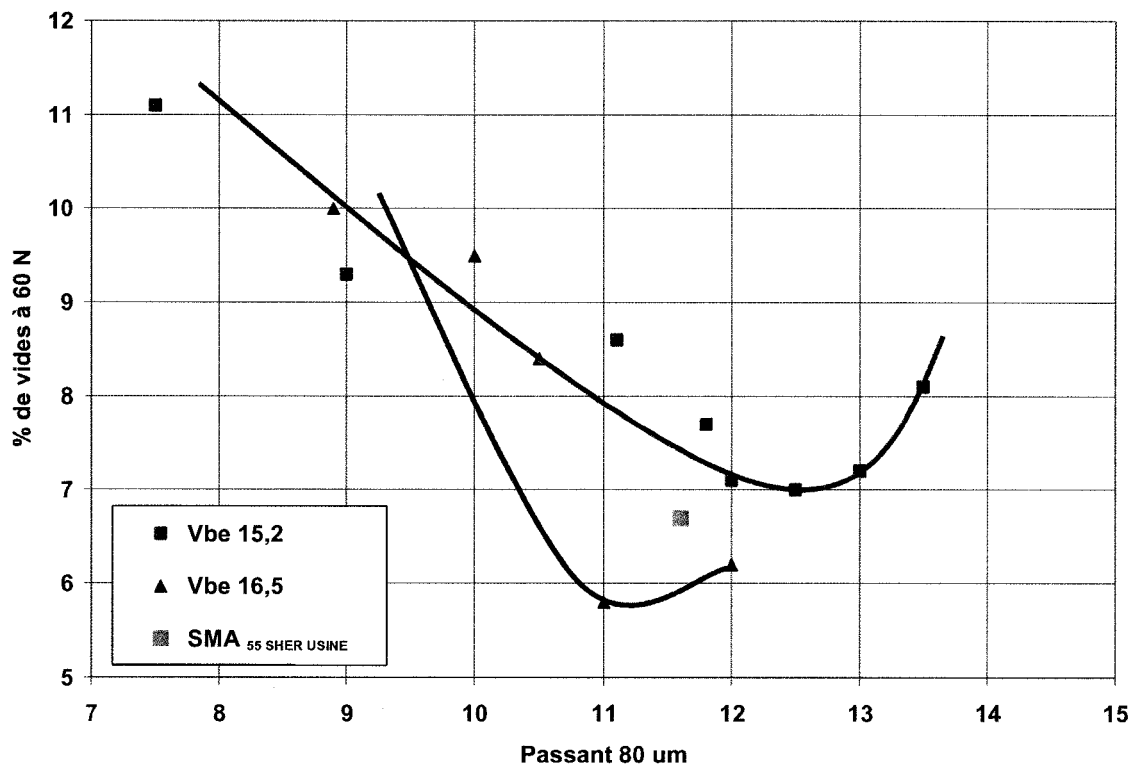


Figure 44 Relation entre la teneur en vides à 60 girations à la PCG et le pourcentage de particules passant le tamis 80 µm pour différents dosages en V_{be}

6.1.1.1 Performance à l'orniérage pour les enrobés SMA de différents dosages en V_{be}

La première analyse consiste à voir l'évolution du taux d'orniérage en fonction de la teneur en V_{be} de l'enrobé SMA tel que présentée à la Figure 45. On s'aperçoit rapidement que le fait d'augmenter le V_{be} génère une augmentation au niveau de l'orniérage. Ce résultat est tout à fait cohérent avec ceux de la littérature. Par contre, il n'en demeure pas moins que le taux d'orniérage observé demeure, pour tous les enrobés testés, largement en deçà des limites des spécifications usuelles à cet effet. De plus, on s'aperçoit qu'à 60 000 cycles, on commence à observer des ornières de fluage pour l'enrobé à haut dosage en bitume ($V_{be} = 16,5\%$) (changement de courbure à $V_{be} = 16,5\%$ à 60 000 cycles).

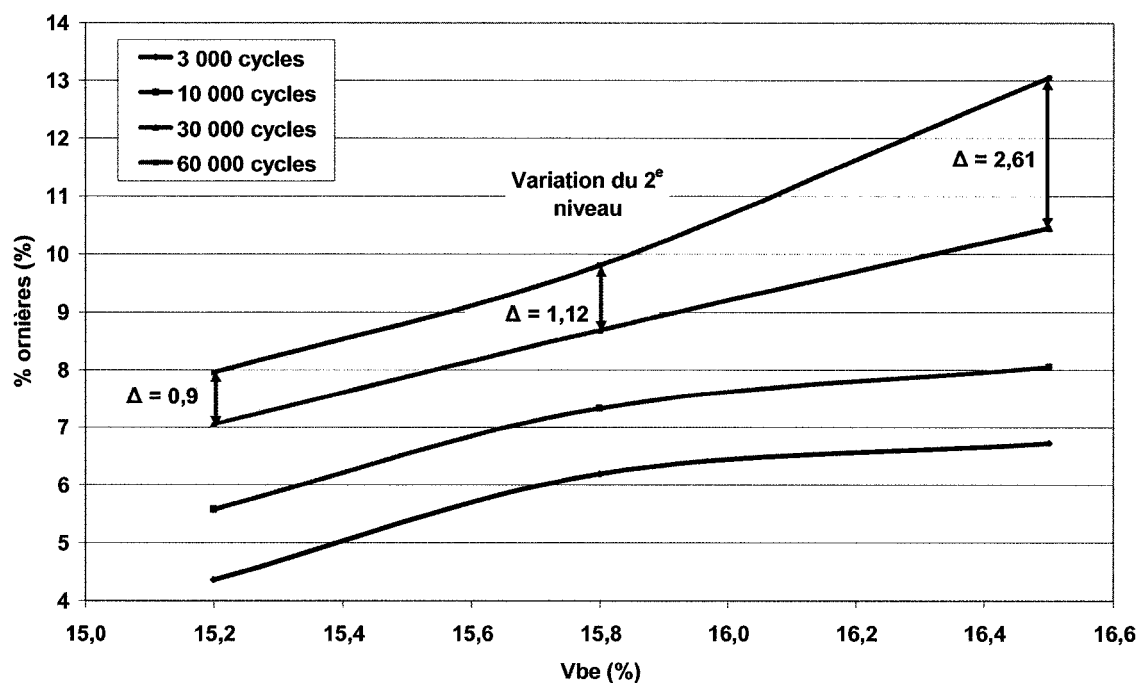


Figure 45 Graphique illustrant les résultats à l'orniérage pour les différents V_{be} sélectionnés

6.1.1.2 Évolution du coefficient de dilatation thermique pour les enrobés SMA de différents dosages en V_{be}

La seconde analyse porte sur l'évolution du coefficient de dilatation thermique des enrobés SMA tel qu'illustrée à la Figure 46. On remarque, encore une fois que les résultats sont cohérents avec la littérature : plus la quantité de bitume dans l'enrobé est grande ($V_{be} \uparrow$) plus le coefficient de dilatation thermique augmente.

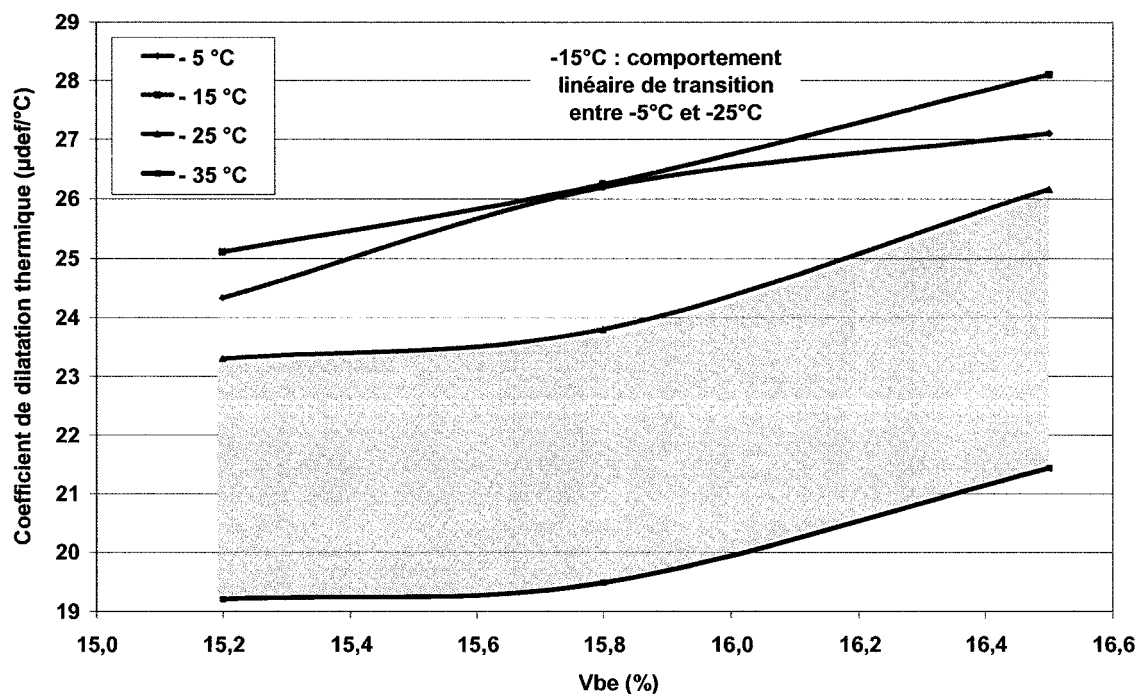


Figure 46 Graphique illustrant les résultats du coefficient de dilatation thermique pour les différents V_{be} sélectionnés

6.1.1.3 Évolution de la performance à basse température pour les enrobés SMA de différents dosages en V_{be}

Finalement, la dernière analyse porte sur la contrainte maximale générée par un changement climatique à l'essai TSRST. À partir des résultats présentés à la Figure 47, on peut constater que plus le dosage du V_{be} est élevé, plus la contrainte à la rupture est importante et ce, pour une température de rupture relativement inchangée.

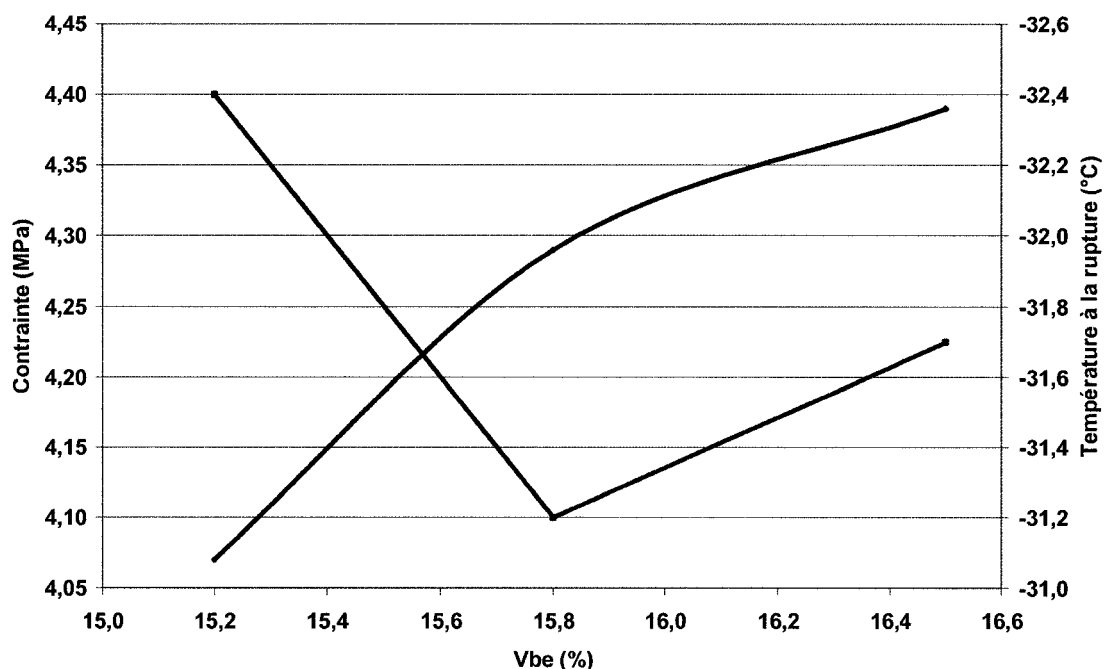


Figure 47 Graphique illustrant les résultats de l'essai TSRST pour les différents V_{be} sélectionnés

6.1.2 Conclusions

Suite à l'analyse des différents résultats présentés à la section § 6.1.1, les essais tendent à montrer qu'une variation de la teneur en V_{be} n'engendre pas de changement de comportement important pour les plages ciblées. Selon les trois essais effectués, les résultats montrent que peu importe la variation du V_{be} , l'enrobé SMA présente un comportement relativement similaire pour les trois dosages sélectionnés. Cette conclusion demeure essentiellement valable pour ces essais et ne tient pas compte notamment du comportement des enrobés à la fatigue.

En définitive, le premier critère de sélection du V_{be} optimal demeure les performances des enrobés aux différents essais. Or, des trois dosages en V_{be} étudiés, aucun ne se démarque des autres. En conséquent, le dosage possédant le V_{be} le plus faible et présentant d'excellentes performances par rapport aux autres dosages, demeure le choix le plus judicieux d'un point de vue économique.

Donc, suivant la plage de V_{be} recensée à travers plusieurs pays (section § 2.2) dont les valeurs varient entre 14,1 et 15,9 %, il serait judicieux et très approprié de rejeter les valeurs extrêmes et de sélectionner la valeur moyenne soit la valeur de 14,7 ou 14,8 %. Par contre, des essais complémentaires s'avèrent nécessaires pour statuer de façon définitive.

6.2 Évaluation des limites acceptables lors de la production en chantier

Dans le but d'optimiser la production et la performance des enrobés SMA en chantier, il est essentiel d'établir des limites acceptables lors de la production en usine afin de maximiser nos chances d'avoir un enrobé de qualité et d'offrir de très bonnes performances sur routes.

Plusieurs experts du N.C.A.T. recommandent comme limite acceptable les tolérances décrites dans le Tableau VLI. Ces limites sont similaires à celles des enrobés à module élevé. Les résultats issus de notre campagne expérimentale en chantier nous permettent de valider les exigences du N.C.A.T. Par ailleurs, nous avons montré précédemment que la variation du dosage en pierre et en filler influence fortement l'aptitude au compactage de l'enrobé et ce, avec des variations de dosages relativement faibles, soit de l'ordre du pourcent.

Tableau VLI

Tolérances de production en usine selon N.C.A.T.

Critères de production	Tolérances
% retenu au tamis 5 mm	± 4,0
% passant le tamis 80 µm	± 2,0
Teneur en bitume (%)	± 0,3

Dans ce contexte, à partir de l'ensemble des résultats cumulés de la campagne expérimentale, nous sommes en mesure, à partir d'une analyse détaillée d'établir des limites acceptables de contrôle de qualité plus strictes que celles du N.C.A.T.

6.2.1 Analyses des tolérances admissibles en production

Les quatre principaux critères pris en considération pour évaluer la stabilité en production d'un enrobé SMA sont : le pourcentage retenu au tamis 5 mm, le pourcentage passant le tamis 80 μm , la teneur en bitume et le pourcentage de vides au N_{design} (60 girations). Le critère retenu, pour établir les tolérances admissibles à l'analyse était de pouvoir rassembler dans une marge de variation les deux tiers de la production analysée. Les marges de variation sont établies en fonction du pourcentage visé selon la formulation initiale établie en laboratoire pour le mélange initial de départ. De cette façon, on vérifie la capacité en usine de reproduire la formulation ciblée.

1. Pourcentage retenu au tamis 5 mm : Dosage en pierre

Rappelons qu'une forte variation de la teneur en pierre a un effet direct sur la teneur en vide à la PCG. En se référant à l'analyse du pourcentage retenu sur le tamis 5 mm, on remarque, selon la Figure 48, que la tolérance de plus ou moins 1,0 % regroupe 14 des 15 lots analysés, soit plus de 93 % des résultats et que cette variation génère une variation de $\pm 0,8$ % dans la teneur en vides mesurée à 60 girations (soit 11,9% de la valeur initiale de formulation de 6,7%). Cette variation s'avère relativement faible et acceptable contenu qu'il s'agit d'un matériau 5-10 mm.

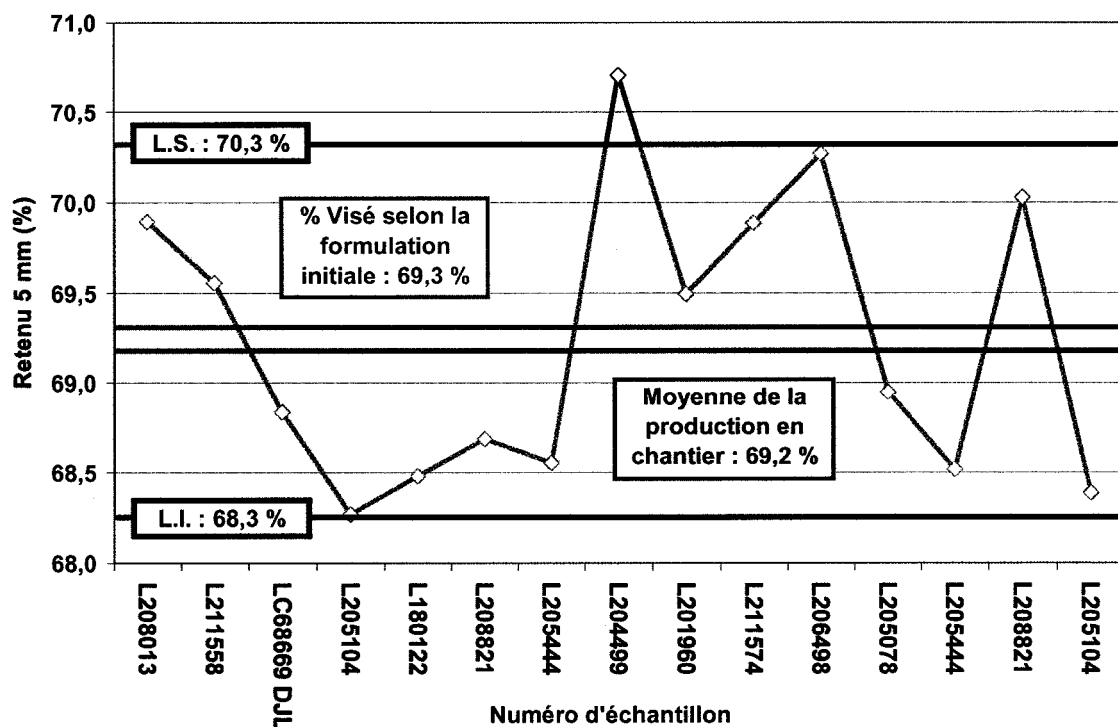


Figure 48 Graphique illustrant les limites de tolérance proposées sur l'analyse du dosage de la pierre (particules > 5 mm)

2. Pourcentage de particules passant le tamis 80 μm

En ce qui concerne le pourcentage passant le tamis 80 μm , l'analyse demeure identique. On observe selon la Figure 49, qu'une tolérance de $\pm 1,0$ % regroupe 10 lots sur 15. De plus, suivant les notions vues précédemment (section § 2.2.5 et § 4.1.4) et sachant fort bien que la teneur en filler constitue un critère de formulation très pointilleux, cette tolérance de $\pm 1\%$ s'avère tout de même relativement bonne et ce en tenant compte qu'aucune mesure supplémentaire de contrôle fut apporté à l'usine d'enrobage pour améliorer le suivi du dosage en particules fines. Par ailleurs, étant donné que l'ajout de filler dans les mélanges se fait souvent selon l'utilisation d'un système indépendant et que les matériaux d'origine proviennent du silo de filler ainsi que d'une autre source d'approvisionnement pour palier à la forte teneur formulée, ce point demande donc un contrôle plus strict et plus rigoureux.

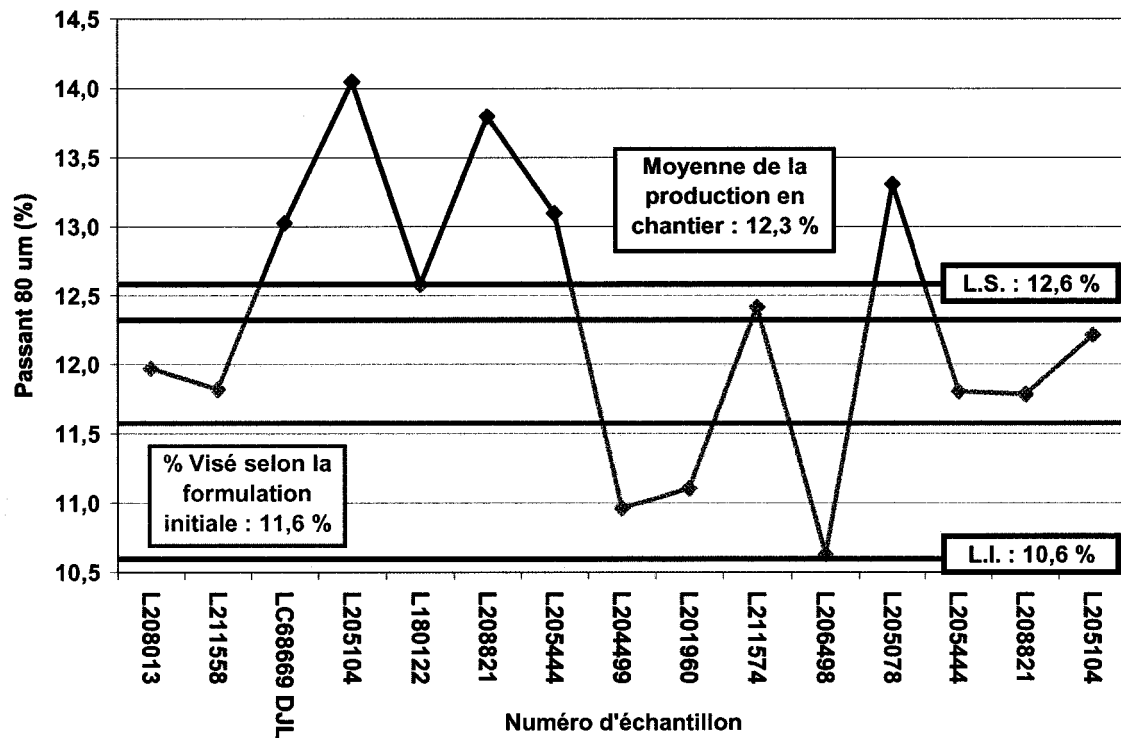


Figure 49 Graphique illustrant les limites de tolérance proposées sur l'analyse du dosage sur le tamis 80 µm

3. Teneur en bitume

Lorsqu'on on touche à la question de la teneur en bitume, non seulement on intervient sur les critères de performance de l'enrobé mais également sur les facteurs économiques de production. Il est donc important de minimiser la tolérance permise pour ce facteur de contrôle. La Figure 50 illustre la variation observée en production. En se référant à la variation mesurée au sein du lot échantillonné en masse (voir section § 5.4.5), on établit que la variation acceptable devrait être de $\pm 0,2\%$. Un peu plus de 78 % des lots échantillonnés en chantier, lors de la mise en œuvre de la planche d'essai, sont compris à l'intérieur de cette plage de variation. Il est important de ne pas permettre une plage de valeur trop grande puisque ce facteur a directement une incidence sur le V_{be} . Il est à noter que la valeur de 5,06% fut rejetée dans le calcul de la moyenne. Cette valeur semble complètement incohérente et hors de la plage de valeurs et doit être le fruit d'une erreur de manipulation.

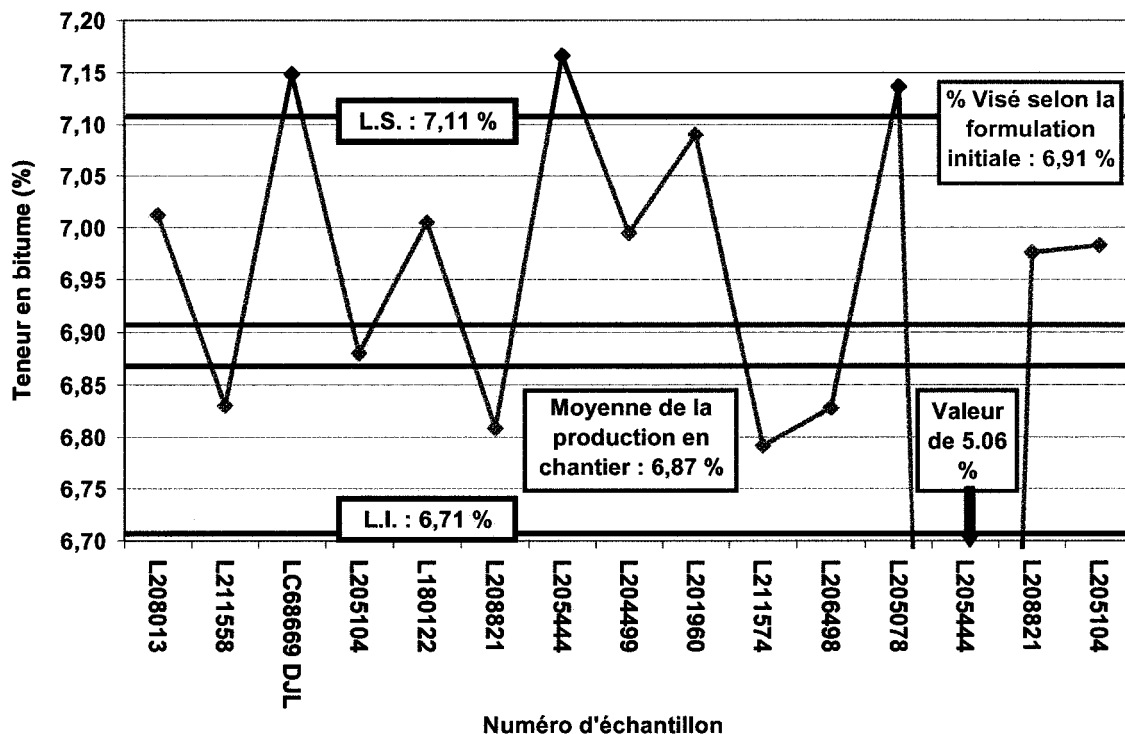


Figure 50 Graphique illustrant la variation observée sur l'analyse de la teneur en bitume ainsi que la limite de tolérance proposée

4. Pourcentage de vides à 60 girations

En ce qui touche la performance à la PCG au N_{design} , il est important de mentionner que la plage de tolérance au N_{design} est fixe et qu'elle ne doit pas être modifiée. Elle se situe entre 4 et 7 % de vides. Nos résultats indiquent que certains lots analysés ne rencontrent pas les limites ciblées (Figure 51).

Il est important de mentionner que la valeur ciblée en laboratoire (le volume des vides à 60 girations de l'enrobé #L18 est de 6,7%) se situe pratiquement déjà à la limite supérieure de la fenêtre admissible. Étant donné que certaines tolérances induisent des variations dans la teneur en vides, il est tout à fait normal d'observer, dans la production, des valeurs au-delà de la plage recommandée.

De plus, il est important de rappeler que l'enrobé a été confectionné à partir de la valeur optimale de la teneur en vides en fonction du dosage en pierre 5-10 mm et en particules passant le tamis 80 μm . Il n'est donc pas surprenant d'observer des valeurs situées autour de la limite supérieure puisqu'il s'agit d'un enrobé confectionné aux valeurs optimales.

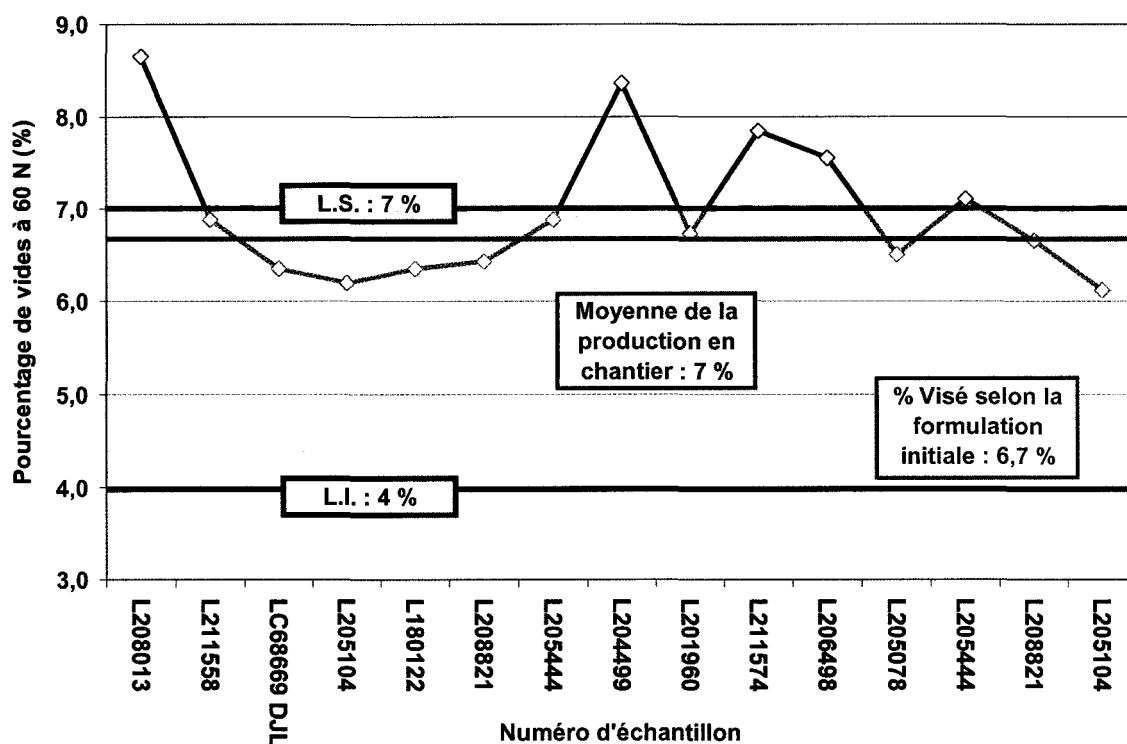


Figure 51 Graphique illustrant la variation du pourcentage de vides observée sur les lots analysés au N_{design} (60 girations)

Il n'en demeure pas moins que les résultats obtenus sont au-dessus de la norme stipulée par le MTQ pour la confection des enrobés au Québec. Néanmoins, il est bon de souligner que des études visant à mettre en relief la teneur optimale en vides vis-à-vis la performance à l'orniérage de l'enrobé ont montré qu'une teneur en vides résiduelle après compactage avoisinant 6-7% est optimale (voir Figure 52).

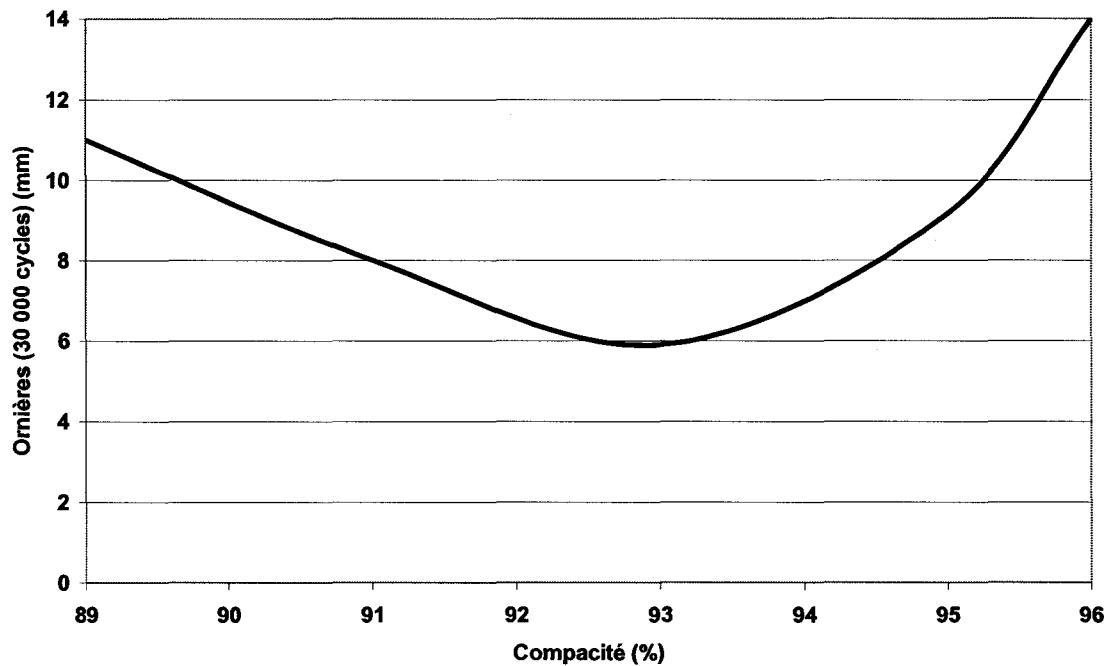


Figure 52 Influence de la compacité sur la résistance à l'orniérage, essai à l'orniéreur (adapté de Proteau et Paquin, 2000)

En dépit de celà, il est envisageable d'ajuster la formulation de départ (6,7%) pour obtenir une valeur moyenne située dans la plage voulue de 4 à 7%. À ce titre, les résultats des essais effectués par Tremblay (2001) sur les SMA apportent des éléments de référence intéressants puisqu'il a été montré que la fluctuation de l'aptitude au compactage est fortement tributaire de la fluctuation au dosage en pierre dans l'enrobé. Cette constatation n'est pas en soit dénuée de sens compte tenu de la forte proportion de pierre dans les enrobés SMA. Pour valider l'énoncé de Tremblay, nous avons porté en graphique à la Figure 53 la variation du nombre de vides en fonction du dosage en pierre.

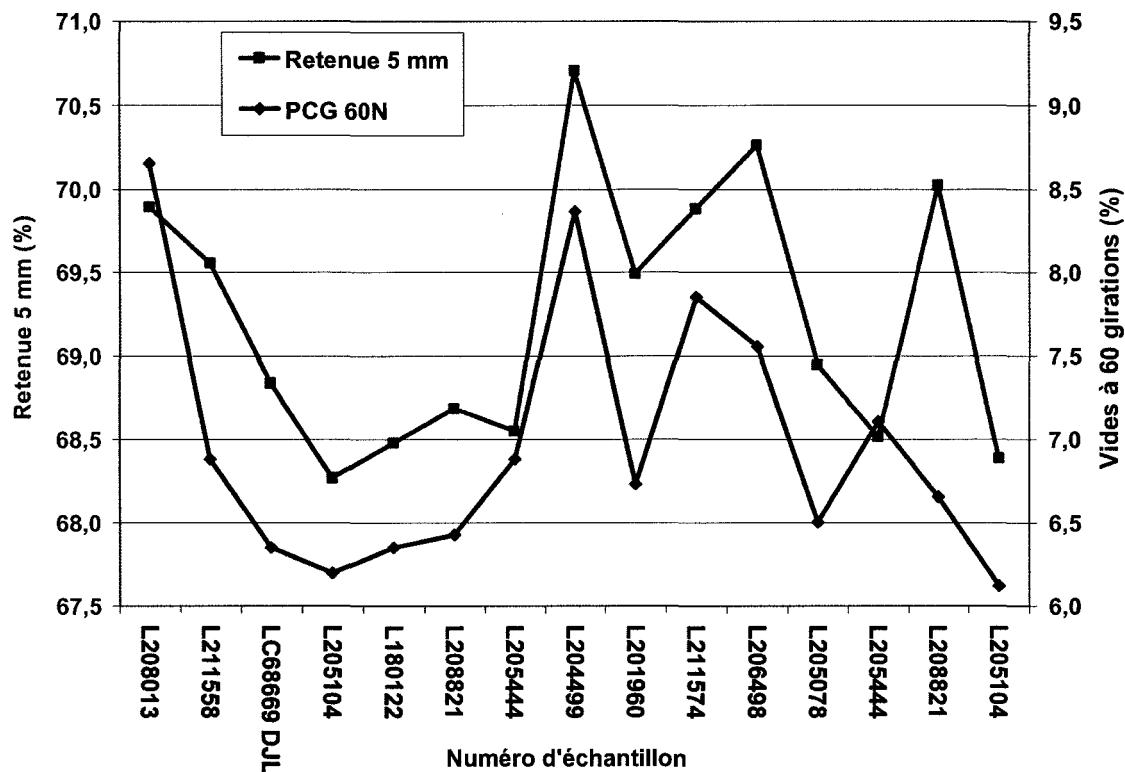


Figure 53 Graphique illustrant la variation du pourcentage de vides observée sur les lots analysés au N_{design} (60 girations)

Les résultats présentés à la figure 53 sont clairs : le comportement de l'enrobé à la PCG (vides à 60 girations) est fortement relié à la variation du dosage en pierre dans l'enrobé. La courbe du comportement à la PCG à 60 girations est pratiquement une translation de la courbe illustrant la variabilité du dosage en pierre dans l'enrobé mesuré en chantier !

Si à priori, on établit une variation acceptable de 0,8 % (valeur induite par la variabilité du dosage en pierre mesurée en chantier) à la teneur en vides générée par la fluctuation du dosage en pierre, on s'aperçoit que la nouvelle plage de référence se situe entre 4,8 et 7,8 % tel qu'illustrée à la Figure 54. Cette nouvelle plage regroupe alors 12 des 15 lots analysés pour une valeur de 80%.

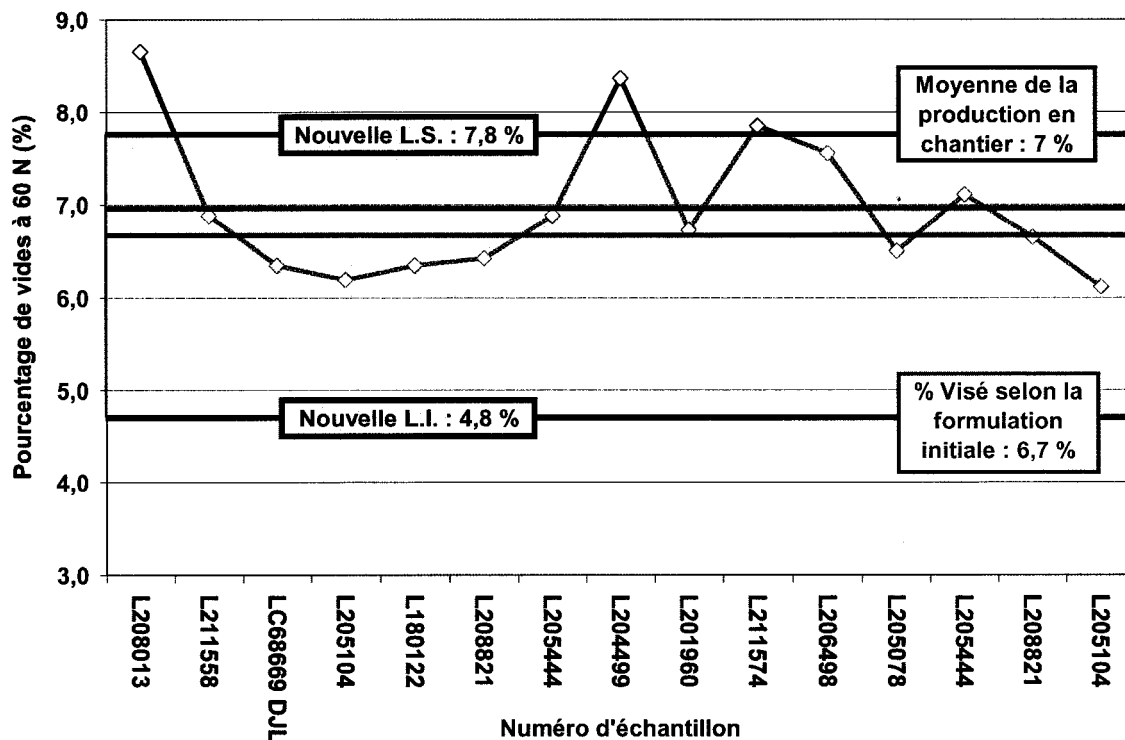


Figure 54 Graphique illustrant la variation du pourcentage de vides observée sur les lots analysés au N_{design} (60 girations) en fonction des limites ajustées en fonction des tolérances de production

6.2.2 Conclusions

En résumé, selon les analyses effectuées sur l'enrobé produit en usine et des analyses rigoureuses en laboratoire, nous arrivons à la conclusion que les plages de tolérance établies par le N.C.A.T. sont trop généreuses et peuvent mener à des résultats beaucoup trop variables. Les nouvelles plages de variations obtenues suite à nos analyses sont illustrées au Tableau VLII et devraient faire office de critères à respecter lors de la production de l'enrobés SMA de grosseur nominale maximale de 10 mm au Québec afin d'obtenir un produit de qualité et une production stable et performante.

Tableau VLII

Tolérances de production élaborées suite à nos résultats et analyses

Critères de production	Tolérances LUCREB	Tolérances NCAT
% retenu au tamis 5 mm	± 2,0	± 4,0
% passant le tamis 80 µm	± 1,0	± 2,0
Teneur en bitume	± 0,2	± 0,3

6.3 Sélection / Validation du N_{design} pour la formulation en laboratoire

Les suivis de performance sur chantier, quant à l'évolution de la compacité de l'enrobé SMA₅₅ SHER en cours de mise en œuvre, représentent la clé pour valider la valeur de N_{design} établi à priori à la section § 2.3. Trois procédés nous permettront d'étudier le processus de sélection / validation du N_{design} . 1) La méthode du MTQ qui définit le N_{design} simplement en fonction de leur expérience acquise (section § 1.9.1) 2). La méthode Superpave qui définit le N_{design} en prenant en compte l'ampleur de la circulation (ÉCAS) et le type de route (Tableau XVII, section § 1.9.3). Et finalement, 3) la méthode Française basée sur une formule (définie à la section § 1.9.2) qui prend en compte plusieurs facteurs relatifs au chantier et à la mise en place. Dans cette section, la sélection / validation du N_{design} sera donc évaluée selon ces trois méthodes.

6.3.1 Analyse des méthodes de sélection du N_{design}

Pour fin d'analyse, nous avons utilisé les données recueillies en chantier. Nous avons ensuite comparé les différentes méthodes pour arriver à définir un procédé qui déterminerait le bon N_{design} approprié à la formulation de l'enrobé SMA de GNM égale à 10 mm et, ultérieurement, pour l'associer aux spécificités d'un projet donné.

La méthode MTQ

La méthode de sélection du N_{design} établie par le MTQ, ne prend pas en considération les conditions d'un projet : le N_{design} est établi uniquement en fonction du type d'enrobé.

Ce dernier est décrit dans la nouvelle méthode de formulation LC à l'aide de la PCG. Il varie selon l'utilisation de l'enrobé et de sa classe granulaire mais il n'est pas directement associé aux conditions propres à chaque projet. Donc, pour les fins de comparaison, le N_{design} est établi à 60 girations pour l'enrobé SMA et à 80 girations pour l'enrobé EGA-10.

La méthode Superpave

La méthode Superpave base sa sélection du N_{design} en fonction du niveau de circulation et du type de route. Cette méthode demeure relativement jeune et déjà elle a été sujette à des changements depuis son apparition. Étant donné que l'emplacement de la planche d'essai est sur une autoroute provinciale à 2 voies, de bonne envergure, le N_{design} se situe selon les critères de Superpave, au niveau 3 et correspond à 100 girations (Tableau XVII, section § 1.9.3). Il est important de souligner que les exigences de la méthode Superpave ne permettent pas de faire de distinction entre l'enrobé SMA et l'enrobé EGA-10 : étant donné qu'il s'agit d'enrobés de surface, le facteur n'est pas modifié. Rappelons que si l'enrobé se situe en deçà de 100 mm par rapport à la surface finale, le N_{design} correspondant est celui du premier niveau inférieur. Par contre, Brown et coll. (1998) propose, sur la base de nombreuses expériences de chantier, de modifier la valeur du N_{design} pour les enrobés SMA, passant de 100 girations à 80 girations. Selon ces auteurs, le nombre de girations pourrait même être diminué jusqu'à la valeur de 70 dépendamment de la qualité des granulats utilisés (section § 1.6.1.1, valeur à l'essai LA > 30). Notons que ces recommandations ont été formulées à la suite de projets où l'enrobé SMA était utilisé comme couche de roulement.

La méthode Française

La méthode Française, consiste, à relier le nombre de girations de contrôle en laboratoire, N_{design} , aux facteurs influents en chantier. La relation proposée est :

$$N_{\text{design}} = K * e * n_p \quad (6.1)$$

ou

$$N_{\text{design}} = \text{nombre de girations de contrôle en laboratoire } (n_g)$$

K	=	facteur dépendant de l'énergie développée par le compacteur
e	=	épaisseur de mise en œuvre du mélange bitumineux en cm
n_p	=	nombre de passes du compacteur

Dans le cadre de la planche d'essai, nous avons suivi les performances liées à l'aptitude au compactage (évolution de la compacité de l'enrobé en cours de compactage) pour 2 enrobés : l'enrobé EGA-10 et l'enrobé SMA-10. Les mêmes équipements ont été utilisés lors de leur mise en place. Puisque les expériences acquises en chantier par le MTQ ont démontré qu'un N_{design} de 80 girations ($n_g = N_{\text{design}}$) pour l'enrobé EGA-10 donne de très bon résultats en chantier, nous pouvons par rétro calculs déduire la valeur du facteur K de l'énergie du compacteur associé aux équipements utilisés et ce, de manière à pouvoir l'exploiter pour valider le N_{design} de l'enrobé SMA.

Les données recueillies en chantier concernant la variation de la compaction de l'enrobé EGA-10 sont illustrées au Tableau VLIII et à la Figure 55. Il est à noter que l'épaisseur de pose en chantier de l'enrobé EGA-10 était de 4,8 cm. Le degré de compaction obtenu en chantier a été établi en fonction du nombre de passes n_p . Pour établir la valeur de N_{design} applicable au SMA selon la relation décrite dans la méthode Française, il convient de cerner le nombre exact de passes requis pour atteindre la compacité cible en chantier pour l'enrobé EGA-10. Le nombre de passes correspondant est de 6 (puisque 3 passes équivaut à 6 allées).

Un point litigieux demeure. Les températures mesurées au compactage et présentées au Tableau VLIII portent à confusion puisque le degré de compaction de l'emplacement A augmente plus rapidement que celui de l'emplacement B et ce, malgré une température observée largement inférieure (moyenne autour de 110°C) à la température de pose recommandée (135 ± 2°C).

Tableau VLIII

Données recueillies lors de la compaction de l'enrobé EGA-10₅₅ SHER CHANTIER

Nombre de passe	A Chaînage (3+785) ⁽¹⁾		B Chaînage (3+906) ⁽¹⁾	
	Taux de ⁽²⁾ compaction (%)	T° infra rouge de compaction (°C)	Taux de ⁽²⁾ compaction (%)	T° infra rouge de compaction (°C)
1	86,3	127	90,0	100
2	90,7	121	91,9	97
3	93,7	122	95,7	80
4	97,6	105	95,5	80
5	98,5	104	97,5	67
6	n/d	n/d	97,8	65

Note 1 : Chaînages : voir Figure 24 section § 5.1

Note 2 : Les valeurs de compaction sont des valeurs corrigées.
Les valeurs brutes sont disponibles à l'Annexe 24

Après vérification auprès d'un représentant technique de la compagnie OAKTRON, fournisseur de l'appareil de mesure de la température par infrarouge, il semble que, a priori, le vent et la température extérieurs ne peuvent pas être à la source de ces écarts. Cette divergence dans les résultats nous laisse particulièrement perplexe. Des analyses complémentaires devront être faites sur d'autres chantiers de manière à valider la procédure proposée pour évaluer la valeur du facteur K à considérer. En dépit de cette ambiguïté, nous avons tout de même calculé la valeur du facteur K correspondant au parc d'équipement utilisé sur la planche d'essai, cette valeur, établie à partir des données de l'enrobé EGA-10, correspond à :

$$K = (80 \text{ girations}) / (4,8 \text{ cm} * 6 \text{ passes de rouleau compacteur}) \quad (6.2)$$

soit $K = 2,78$.

Il est important de mentionner qu'originellement, l'enrobé SMA-10 formulé en laboratoire devait être posé en chantier à une épaisseur d'environ 3,5 cm. Puisque nous voulons en quelque sorte valider la valeur de N_{design} utilisée en laboratoire pour la formulation d'enrobés SMA-10 pour des épaisseurs de pose de l'ordre de 3,0 à 3,5 cm, nous effectuerons donc dans un premier temps, le calcul avec une épaisseur de 3,5 cm. Dans un deuxième temps, nous vérifierons les résultats pour une épaisseur de 4,8 cm. En ce qui à trait au nombre de passes requis et à prendre en considération dans le calcul du N_{design} selon la méthode Française, nous proposons de prendre le même nombre de passes que celui ayant servi à atteindre la compacité cible pour l'enrobé EGA-10₅₅ SHER CHANTIER, en l'occurrence 6 passes. En fait, nous aurions pu nous référer au bilan de l'évolution de la compacité de l'enrobé SMA mesuré sur la planche d'essai (voir Figure 43). Cependant, étant donné que la procédure de compaction en chantier n'était pas représentative de la procédure recommandée pour les enrobés SMA lors de la mise en place de l'enrobé SMA sur la planche d'essai, nous avons convenu que le nombre de passes ayant été requis pour atteindre la compacité cible est en soit non représentatif.

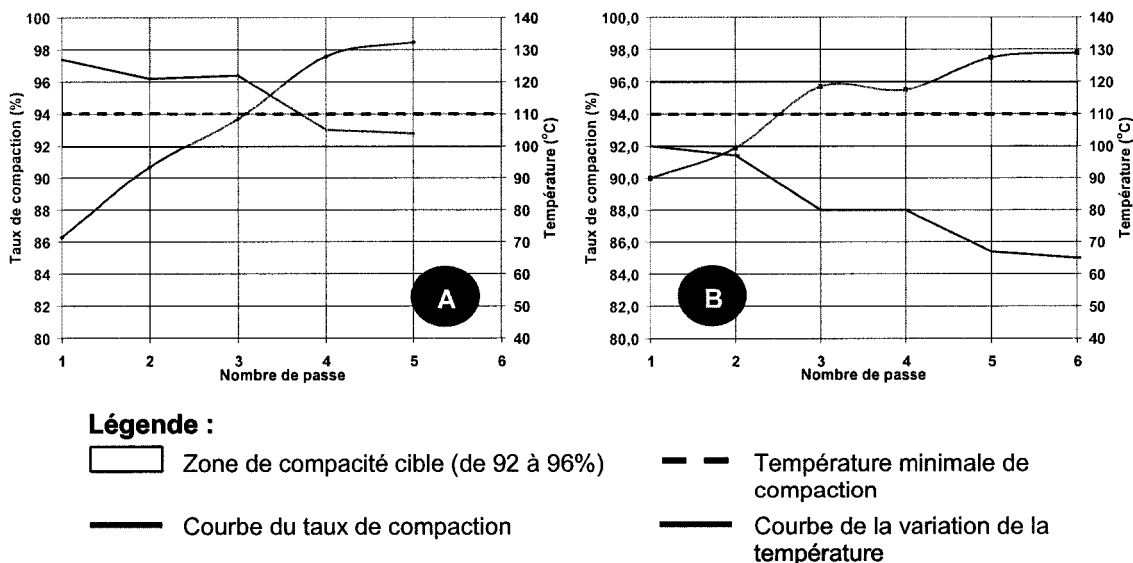


Figure 55 Graphique illustrant la variation de la température et du niveau de compaction en chantier à différent chaînage (A : 3+785 ; B : 3+906) pour l'enrobé EGA-10₅₅ SHER CHANTIER

En effet, la revue de la littérature souligne que la performance en compaction des parcs d'équipement demeure la même pour un enrobé SMA que pour un enrobé conventionnel, dans la mesure où la procédure de compaction est mise en œuvre de façon beaucoup plus sévère et agressive.

En définitive, le Tableau IL présente, en référence à la méthode Française, les valeurs de N_{design} calculées pour l'enrobé SMA-10 suivant les deux épaisseurs ciblées (3,5 et 4,8 cm).

Tableau IL

Valeurs de N_{design} obtenues selon la méthode Française

Épaisseur de l'enrobé (cm)	N_{design} (n_g)	Valeur de $K_{(1)}$	Nombre de passes
3,5	58	2,78	6
4,8	80	2,78	6

Note 1 : Déterminé référence à la mise en œuvre de l'enrobé EGA-10

L'augmentation de la valeur de N_{design} pour une application de l'enrobé en couches plus épaisses est tout à fait conforme à la revue de la littérature puisque l'enrobé tend à perdre plus lentement sa chaleur. Par conséquent, ce phénomène permet l'atteinte de la compacité voulue sur une période de temps légèrement plus longue.

6.3.2 Conclusions

En fonction des trois méthodes de sélection du N_{design} énumérées précédemment et suite à nos analyses, la formulation Française se démarque. Le Tableau L résume les résultats obtenus pour chaque méthode.

Tableau L

Synthèse des N_{design} en fonction de la méthode

	Méthode MTQ	Méthode Superpave		Méthode Française	
		L A < 30	L A > 30	e = 3,5 cm	e = 4,8 cm
N_{design}	60	100	70	58	80
Remarques	<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer à l'aide de l'expérience et des connaissances 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de distinction entre les types d'enrobés • Modification du niveau en fonction du type de couche : roulement ou de base 	<ul style="list-style-type: none"> • Valeur modifiée pour des granulats de plus faible résistance à l'essai Los Angeles 	<ul style="list-style-type: none"> • Les valeurs sont obtenues par l'estimation de la valeur de K en fonction du suivi de compaction de l'enrobé EGA-10 <p>e = épaisseur de pose</p>	

La méthode Superpave est encore jeune. De plus, elle sera très certainement assujettie à des modifications. Toutefois, elle demeure difficilement applicable pour de nouveaux enrobés dans la perspective de l'aptitude au compactage puisqu'elle ne tient pas compte d'aucun facteur relié à la mise en place et de l'énergie de compaction développée par les équipements utilisés. Le seul facteur pris en considération, autre que la circulation, est la position de l'enrobé au sein de la structure de la chaussée : enrobé utilisé en couche de roulement (surface) ou en couche de base (à plus de 10 cm sous la surface). En couche de base, la valeur du N_{design} est abaissée d'un niveau. Il est à noter que la procédure de formulation Américaine utilise la PCG comme méthode de prédiction du niveau d'orniérage des enrobés comparativement à la méthode Française et LC du MTQ qui utilisent la PCG comme moyen de déterminer l'aptitude au compactage d'un enrobé.

En ce qui concerne la méthode du MTQ, encore une fois cette méthode est non seulement empirique mais fortement subjective. Tout comme la méthode Superpave, elle ne tient compte ni de l'énergie de compaction utilisée ni des données reliées à la mise en place. Elle est le fruit de l'expérience et nécessite la validation par l'application de planche de convenance avant chaque chantier.

La méthode Française, de son côté, demeure la méthode qui permet une meilleure adaptation aux conditions propres à chaque chantier. Cette méthode tient compte de l'énergie de compaction utilisée, de la procédure de compaction mais avant tout de l'épaisseur de l'enrobé qui constitue un facteur déterminant à l'application et à la mise en œuvre d'un enrobé sur route. Par contre, il peut être difficile de déterminer le facteur de compaction, K , associé à chaque type de rouleau compacteur. Bâtir une banque de données à ce sujet serait sans doute très pertinent. Cette dernière remarque est d'autant plus à propos du fait qu'actuellement le laboratoire LC du MTQ connaît bien et maîtrise bien les valeurs de N_{design} pour plusieurs types d'enrobés couramment mis en œuvre sur le réseau routier québécois. Un suivi de performance rigoureux de l'évolution de la compacité en cours de mise en œuvre sur divers projets, tel que nous l'avons fait dans le cadre de cette planche d'essai, permettrait rapidement de tabuler les facteurs K représentatifs des scénarios usuels quant aux différents parcs d'équipement utilisés au Québec.

CONCLUSION

Suite au programme d'essais élaboré dans le cadre de cette recherche, dans le but de préciser les exigences requises pour la formulation en laboratoire d'un enrobé SMA-10 suivant la méthode LC du MTQ, plusieurs éléments de conclusion peuvent être énoncés. Dans un premier temps, le bilan de notre démarche nous conduit à proposer un V_{be} de 15,2%. Les résultats de nos essais en laboratoire ont montré qu'une valeur supérieure en V_{be} a peu d'influence quant au gain de performance observé sur l'enrobé SMA.

Dans un deuxième temps, nous avons élaboré une méthodologie simple pour déterminer la valeur optimale en pierre (> 5 mm) à utiliser de manière à assurer un contact pierre sur pierre du squelette granulaire. À ce sujet, rappelons sommairement que nous avons proposé de limiter le dosage en sable (fraction 0/2,5) dans l'enrobé de manière à éviter tout risque d'interférence quant à l'agencement des particules grossières au sein du squelette granulaire. Également, c'est essentiellement à partir d'un essai de contrôle à la PCG que l'on détermine de façon rigoureuse la teneur optimale en pierre dans l'enrobé et ce à partir de la confection d'un seul mélange!

Finalement, nous avons mis en relief l'importance de cibler un dosage optimum en filler selon l'analyse des vides dans l'enrobé. Cette étape est cruciale puisque de part et d'autre de cet optimum, le pourcentage des vides dans l'enrobé croît exponentiellement. Le volume de filler optimum est variable et est fixé en fonction des granulats utilisés d'un projet donné.

Le deuxième volet de notre recherche, associé au suivi de la mise en œuvre de l'enrobé SMA en chantier, identifie les variations acceptables au niveau de la production en usine de l'enrobé SMA-10. Suite à l'analyse de plusieurs lots produits en usine dans le cadre d'une planche d'essai, les facteurs de variation suivants ont été établis :

1. % retenu au tamis 5 mm : $\pm 2,0$ %
2. % passant le tamis 80 μm : $\pm 1,0$ %
3. Teneur en bitume : $\pm 0,2$ %

Ces limites de variation permettent d'obtenir un enrobé de qualité sans tout autant nécessiter des ajustements extraordinaires en production : un minimum de contrôle de qualité permet l'atteinte de ces objectifs.

Le troisième volet de cette recherche montre que la relation laboratoire-chantier à l'aide de la PCG s'avère très bonne en prenant en considération la méthodologie du N_{design} développée par l'approche Française. Cette méthode s'avère très représentative de la réalité puisqu'elle tient compte de l'épaisseur de pose de l'enrobé et de l'énergie de compaction nécessaire pour l'atteinte de l'objectif en terme de pourcentage de vides visés.

Finalement, suite à la revue de la littérature, et aux expériences acquises en chantier et en laboratoire, nous avons élaboré 5 tableaux synthèses adaptés à la formulation des enrobés bitumineux au Québec suivant la méthode LC qu'il convient de mettre en application pour la production d'enrobés SMA-10 utilisés en couche de roulement.

La synthèse comporte 5 thèmes :

- les matériaux (Tableau LI);
- les critères de formulation (mix design) (Tableau LII);
- la méthodologie proposée de formulation des enrobés SMA (Tableau LIII);
- les performances recherchées (Tableau LIV);
- les recommandations de mise en œuvre (Tableau LV).

Par ailleurs, certains points demandent une attention particulière lors de la mise en place des enrobés SMA :

1. l'importance et la nécessité de concevoir une planche de convenance avant tout travaux afin de sensibiliser les intervenants à ce type d'enrobé, pierreux, pour lequel la procédure de mise en place diffère sensiblement de celle pour les enrobés conventionnels;
2. la stratégie de compaction des enrobés SMA se doit d'être beaucoup plus agressive et sévère que pour les enrobés conventionnels : agir vite, sans délai et de façon continue avec un nombre adéquat d'engins de compaction;
3. l'importance accordée à la température de compaction assurer un enrobé de qualité : tous les travaux se doivent d'être terminés avant que l'enrobé atteigne 110°C pour éviter la fragmentation des granulats en cours de compaction;
4. compacter l'enrobé SMA à l'aide de rouleaux d'acier en mode statique ou en mode vibration uniquement sous supervision et sous contrôle afin d'éviter la fragmentation des granulats.

En guise de conclusion, les enrobés SMA sont des enrobés de qualité et de haute performance. Par contre, peu importe les caractéristiques développées par ces enrobés en laboratoire, il est primordial et fondamental d'informer et de former non seulement les inspecteurs mais avant tout les maîtres d'ouvrage, les entrepreneurs et surtout les responsables de la mise en œuvre afin de les sensibiliser à l'importance de la mise en place pour obtenir les performances voulues qui sont, nous le rappelons, tout à fait exceptionnelles.

Tableau LI

Spécifications des matériaux pour les enrobés SMA utilisés en couche de roulement

Matériaux	Spécifications
▪ Bitume	▪ PG 58-28
▪ Gros Granulat	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Catégorie : 1-a ▪ Granulométrie : 5-10 ▪ Absorption : $\leq 1,2$ % ▪ 100 % concassés
▪ Criblure	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Catégorie : 1 ▪ Granulométrie : 0-2,5 ▪ 100 % concassés ▪ Vides non compactés (n%) : > 45 %
▪ Filler	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Matières minérales (granulat concassé, cendres volantes) ▪ Matière parfaitement sèche ▪ Indice de limite de plasticité : ≤ 4 % ▪ Indice des vides : ≤ 50 % ▪ 80 μm : de 70 à 100 % passant ▪ Aucun changement en cours de production
▪ Agent stabilisant	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fibres minérales ou organiques (amiante, cellulose...) ▪ Dosage : éviter ressuage (ex : 1 % d'amiante; 0,3% de cellulose)

Tableau LII

Critères de formulation (*mix design*) pour les enrobés SMA

Critères	Spécifications
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teneur en bitume ▪ V_{be} ▪ Teneur minimale en bitume... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 15,2 % ▪ 6,6 %⁽¹⁾
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compacité à la PCG ▪ 10 girations..... ▪ 60 girations..... ▪ 200 girations..... 	Pourcentage des vides (%) <ul style="list-style-type: none"> ▪ > 11,0 % ▪ 4,0 % à 7,0 % ▪ > 2,5 %⁽²⁾
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Granulométrie spécifique ▪ Tamis 14 mm..... ▪ Tamis 10 mm..... ▪ Tamis 5 mm..... ▪ Tamis 2,5 mm..... ▪ Tamis 80 μm..... 	Pourcentage passant (%) <ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 ▪ 90 – 100 ▪ 25 – 35 ▪ 15 – 25 ▪ 8 – 11
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tenue à l'eau (% minimum) 	70
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Résistance à l'orniérage sur plaques de 50 mm à 60°C à 3 000 cycles..... à 10 000 cycles *..... (% maximum de déformation) 	Profondeur d'ornière (%) <ul style="list-style-type: none"> ▪ 10 % ▪ 15 %
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tenue à l'eau (minimum) 	70
<ul style="list-style-type: none"> ▪ TSRST 	À déterminer
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Résistance à la fatigue 	À déterminer

⁽¹⁾ $D_{gb} = 2,65; D_b = 1,015; M_{ba} = 0,40\%$

⁽²⁾ Aucun ressuage ne doit être observable à ce critère de performance

Tableau LIII

La méthodologie proposée de formulation des enrobés SMA

<p>La démarche pour déterminer la formulation des enrobés SMA se résume aux étapes suivantes :</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ On fixe le volume de bitume effective : V_{be} (en l'occurrence à 15,2 en référence aux recommandations de la section § 6.1.2)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ On estime une masse de pierre (> 5 mm) à partir de la masse volumique pilonnée à sec (exemple : 2^{ème} planche, $\rho_{sec} = 1484 \text{ kg/m}^3$)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ On définit la masse de particules intermédiaires (0/2,5) Suivant le niveau d'interférence désiré et en fonction d'un dosage initial de filler (8%) et d'agent stabilisant on sélectionne la masse de particules intermédiaires de telle sorte qu'elle n'engendre pas le desserrement des particules grossières (la pierre). Dès lors, on a une formulation de départ : SMA_{DÉPART}
<ul style="list-style-type: none"> ▪ On détermine la masse optimale en pierre (> 5 mm) à partir d'un essai à la presse à cisaillement giratoire Cette étape permet en fait de cibler <u>la teneur optimale en pierres réelles</u>, laquelle est évaluée par rétro calcul des proportions réelles. Pour ce faire, on doit connaître <u>la masse volumique</u> de l'enrobé après compactage. <p>NOTE : <i>La notion de teneur optimale en pierre fait référence au concept de base propre aux enrobés à matrice de pierres, les SMA : une teneur en pierre élevée au sein du squelette granulaire</i></p> <p>NOTE : <i>Après seulement un essai, on détermine le volume optimal de pierre retenu sur le tamis 5 mm de l'enrobé SMA. Évidemment, cette teneur en pierre est tributaire de la texture et de la forme des particules des matières premières.</i></p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ensuite, on cherche à déterminer le dosage optimum en filler : on évalue l'aptitude au compactage à la PCG en variant le dosage en filler dans l'enrobé SMA <p>NOTE : <i>Le volume de bitume étant fixé de même que celui de la pierre (retenu 5 mm), la seule voie pour accroître l'aptitude à la compaction, c'est-à-dire de réduire le pourcentage de vide de l'enrobé, demeure l'addition de filler !</i></p>

Tableau LIV

Les performances recherchées pour les enrobés SMA

Critères de performances	Spécifications
▪ % de compaction cible en chantier (%)	92 -94
▪ Stabilité en cours de production : ▪ Retenue 5 mm..... ▪ % passant 80 µm..... ▪ teneur en bitume.....	Limites supérieure (LS) et inférieure (LI) admissibles quant aux valeurs ciblées ▪ +/- 2,0 % ▪ +/- 1,0 % ▪ +/- 0,2 %
▪ Hauteur de sable cisaillement	> 0,90 mm
▪ Essai de cisaillement in-situ – $\phi = 150$ mm	> 15 kN (à valider)
<p>NOTE : <i>Avant la mise en place d'un tel enrobé, il est impératif que soit exigée la mise en œuvre d'une planche de validation et ce, quelques jours (5 à 7) avant de procéder à la mise en œuvre de la planche d'essai proprement dite sur le site choisi. La planche de validation vise une production en usine d'au moins 50 tonnes d'enrobés et de la mise en place d'une planche de validation d'au moins 80 mètres linéaires (1,75 mètres linéaires par tonnes d'enrobé – d'une chaussée de 8,5 mètres de largeur pour une épaisseur de 30 millimètres). Dans ces conditions, l'entrepreneur pourra évaluer de façon détaillée les coûts liés à la mise en œuvre et de juger des effectifs nécessaires pour la réalisation d'une planche d'essai de qualité.</i></p>	

Tableau LV

Les recommandations de mise en oeuvre pour les enrobés SMA

Critères de mise en oeuvre
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Fabrication en usine</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 lieu d'entreposage pour chaque granulat ▪ Plusieurs bennes froides pour fournir à la demande : minimiser la variabilité des granulats ▪ L'ajout de filler d'appoint doit être effectué <u>par souffleur</u> ▪ L'introduction du filler d'appoint doit se faire entre 2 séries d'introduction de granulats pour éviter son absorption par le récupérateur de particules fines ▪ L'ajout de filler d'appoint dicte le niveau et le taux de production de l'usine ▪ La calibration de l'usine doit se faire au même rythme que la production réelle envisagée ▪ Tous les travaux de pavage devront être précédés d'une planche d'essais ▪ La température de production en usine ne devra jamais être supérieure à 170 °C, elle devra être déterminée en fonction du grade de bitume et des agents stabilisants utilisés ▪ Malaxage à sec de 15 secondes; malaxage mouillé de 30 à 35 secondes
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Température de pose</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Température minimale de pose : 10 °C, aucun travail ne devra être exécuté sous cette limite ▪ Conditions climatiques : <u>clémentes, sans précipitation</u>, Arrêt des travaux <u>en cas de précipitation</u>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Transport de l'enrobé</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Le temps de transport devra être le plus court possible ▪ L'utilisation d'agent de lubrification devra être employé pour lubrifier les bennes de camions afin d'éviter l'adhérence du mélange à ces dernières ▪ L'utilisation de bennes chauffantes est fortement recommandée ▪ L'utilisation de toiles thermiques est obligatoire ▪ La température d'arrivée en chantier devrait être aux alentours de 140 à 160 °C selon le type de liant et d'agent stabilisant utilisé
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Calibration de la paveuse</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ L'utilisation de véhicule de transfert est fortement recommandée pour assurer une homogénéité et une bonne température de pose du mélange ▪ La calibration de la paveuse devra permettre un roulement des visse hélicoïdales de 85 à 90 % du temps ▪ La vitesse de roulement de la paveuse devra être de ± 5 km / hre

Tableau LV (suite)

Les recommandations de mise en oeuvre pour les enrobés SMA (suite)

Critères de mise en oeuvre
<ul style="list-style-type: none">▪ <u>Travaux de compaction</u><ul style="list-style-type: none">▪ Le % de compaction cible devra être de ± 95 %▪ La température limite de compaction devra être de 110 à 115 °C (127 °C avec polymères)▪ La stratégie de compaction devra être très agressive▪ Les rouleaux compacteurs devront être maintenus le plus près de la paveuse et ce en tout temps lors des travaux de compaction▪ 2 à 3 rouleaux compacteurs sont nécessaires (3 fortement recommandés)▪ La vitesse des rouleaux compacteurs devra être de ± 5 km / h▪ Si les rouleaux compacteurs ne sont pas en fonction, ils devront être retirés de la chaussée▪ Masse minimale des rouleaux compacteurs = 9 kg▪ L'utilisation du mode vibration devra se faire sous contrôle et sous supervision afin d'éviter la fragmentation des granulats▪ Lubrification des cylindres requis pour éviter l'adhérence du mélange aux cylindres▪ Les compacteurs à pneus sont à proscrire

RECOMMANDATION

Après une année de mise en place, un suivi de performance a permis d'observer la surface de l'enrobé SMA. Notamment, la texture grenu de l'enrobé et l'absence de déformation majeures tels que l'arrachement et l'apparition d'ornières. Par contre, certains défauts localisés qui s'apparentent à un certain désenrobage furent notés. Bien que ces observations sont très ponctuelles, elles témoignent d'un degré d'enrobage et/ou de compactage insuffisant. À ce titre, il faut spécifié que l'enrobé SMA exige des procédures de mise en œuvre spécifique et propre à cet enrobé. En effet la mise en place des enrobés SMA exige une stratégie de compaction beaucoup plus agressive et sévère tout en étant effectué sous contrôle afin d'éviter une surcompaction. Cette surcompaction générerait alors une fragmentation des granulats et une perte de la principale propriété des enrobés SMA soit le contact pierre sur pierre.

Par ailleurs nous rappelons l'importance d'effectuer au préalable une planche de convenance afin d'être en mesure d'évaluer le niveau d'énergie de compaction nécessaire afin d'obtenir le pourcentage de compaction ciblé en chantier. De plus à l'aide de cette planche d'essai, l'entrepreneur serait à même de constater les principales différences induites par la mise en place des enrobés SMA comparativement aux enrobés conventionnels, notamment en ce qui attrait à la texture et la cohésion de l'enrobé.

Finalement il serait envisageable d'effectuer un suivi à long terme de la planche d'essai afin d'évaluer les différentes propriétés des enrobés SMA à long terme pour fins de comparaison avec des enrobés conventionnels utilisés au Québec.

ANNEXE 1

Description de la méthode de formulation HVEEM

Description de la méthode de formulation HVEEM

Historique

La méthode HVEEM fut développée dans le début des années 20 (Roberts et coll., 1996) par Francis Hveem en Californie suite à des travaux sur des mélanges d'huile et de granulats. Avec l'apparition des paveuses mécaniques en 1937, HVEEM avait remarqué qu'il y avait une corrélation entre l'étendue granulaire d'un granulat et le taux d'huile nécessaire pour obtenir un mélange consistant et de bonne qualité. Il a perfectionné la méthode de calcul de la surface spécifique d'un granulat mise au point par l'ingénieur canadien L.N. Edwards. HVEEM serait arrivé à la conclusion suivante : le film effectif d'une particule décroît lorsque le diamètre de cette particule diminue. Cette conclusion amène donc HVEEM à développer une méthode de contrôle mécanique soit le « stabilomètre » qui sert à évaluer la stabilité des mélanges produits.

En 1934 (Vallerga et Lovering, 1985) la méthode Hveem prend forme et comporte les éléments suivants : la méthode de surface spécifique pour déterminer le taux de liant nécessaire, le « stabilomètre » pour évaluer l'aptitude du mélange à la déformation induite par la circulation ainsi que le test de susceptibilité au gonflement, emprunté de l'état de l'Arizona. Ce dernier test sert notamment à rejeter les mélanges sensibles à l'eau. La fin des années 30 amène ainsi deux développements majeurs, la standardisation et la méthode officielle de calibration du « stabilomètre » HVEEM.

En 1942, le « Centrifuge Kerosene Equivalent » (CKE) est développé pour améliorer la méthode de surface spécifique afin d'évaluer plus précisément le taux de liant nécessaire.

En 1946, le test de susceptibilité à la vapeur d'eau (MVS) est introduit. En 1954 le test d'équivalence au sable (SE) permet d'améliorer la technique d'analyse. Le test MVS sert alors à évaluer l'effet indésirable de la vapeur d'eau transpirant au travers la section compactée du mélange. Cette technique est utilisée puisqu'il a été prouvé que l'utilisation de vapeur d'eau au travers le mélange bitumineux représentait un effet

dévastateur plus insidieux que de faire pénétrer un débit d'eau au travers les vides de l'enrobé.

La méthode Hveem connaît finalement son apogée en 1959 et son utilisation est surtout concentrée dans l'ouest américain (Roberts et coll., 1996). Cette méthode demeure plus ou moins inchangée depuis.

Descriptions et caractéristiques

La méthode HVEEM comporte les principales étapes suivantes (Roberts et coll. 1996) :

- a. évaluation des granulats;
- b. évaluation du bitume et de ses propriétés;
- c. détermination de l'essai CKE du granulat;
- d. détermination de la capacité surfacique du granulat grossier;
- e. estimation de la teneur optimale de bitume;
- f. préparation des éprouvettes pour le test de stabilité;
- g. calibration du « stabilomètre Hveem »;
- h. évaluation des éprouvettes au « stabilomètre Hveem »;
- i. évaluation et analyse de la densité et du pourcentage de vides des échantillons;
- j. analyse des résultats.

Suite à l'analyse des propriétés des granulats et du liant, la formulation HVEEM, se base fondamentalement sur l'utilisation de la méthode CKE (Wallace et Martin, 1967). L'utilisation de plusieurs graphiques et de facteurs de correction fait en sorte d'optimiser la teneur en liant suivant les caractéristiques obtenues. Par la suite, suit la confection d'éprouvettes (6,35 cm X 10,16 cm) compactées par pétrissage à l'aide d'une dame de compaction en forme de section de cercle (diamètre approximatif de 2,52 cm) (Langlois, 2004; Fortin, 1996). La section de la dame ne représente qu'une fraction, soit plus ou moins 30%, de l'éprouvette. L'évaluation de l'enrobé produit par la méthode HVEEM s'effectue en analysant la performance de ce dernier suivant les critères élaborés dans le Tableau 1.1. Plusieurs analyses sur différents enrobés ont fait

en sorte que les différents critères de performance identifiés au Tableau 1.1 s'avèrent tout à fait satisfaisants lorsqu'il sont atteints et qu'ils produisent des mélanges de bonne qualité (Wallace et Martin, 1976).

Tableau 1.1

Critères de performances selon la méthode de formulation HVEEM

	Circulation légère	Catégorie de circulation autre que légère
Résultat au stabilomètre	30 et +	35 et +
Résultat au cohésiomètre	50 et +	50 et +
Résultat au test de foisonnement	Moins de 0,762 mm	Moins de 0,762 mm

(Source : Wallace et Martin, 1967; Woods et coll., 1960)

Suivant la comparaison des résultats obtenus selon le Tableau 1.1, le mélange sélectionné sera celui offrant le plus haut taux de liant sans toutefois engendrer une perte au niveau de la stabilité. Cependant, il demeure essentiel de vérifier le pourcentage de vide qui devra toujours être égal ou supérieur à 4%.

Avantages et désavantages

Les principaux avantages (Langlois 2004) de la méthode HVEEM sont premièrement qu'elle tient compte des vides, de la résistance et de la durabilité du mélange. De plus, elle nécessite un compactage par pétrissage, ce qui fait en sorte de simuler le compactage en chantier.

D'un autre côté, son principal désavantage est que les instruments et le matériel de contrôle sont très coûteux (Roberts et coll 2002) et très lourds. Ce qui en limite son utilisation. Finalement, elle possède une échelle de stabilité restreinte et ne permet que l'utilisation de granulats dont le diamètre est inférieur ou égal à 25,4 mm (Wallace et Martin 1967).

ANNEXE 2

Description du « stabilomètre » HVEEM

Description du « stabilomètre » HVEEM

Le « stabilomètre » de HVEEM (voir Figure 2A) est un dispositif triaxial consistant essentiellement en un manchon en caoutchouc dans un cylindre métallique contenant un liquide. La pression horizontale développée par une éprouvette préalablement compactée est alors enregistrée suivant l'application d'une charge verticale.

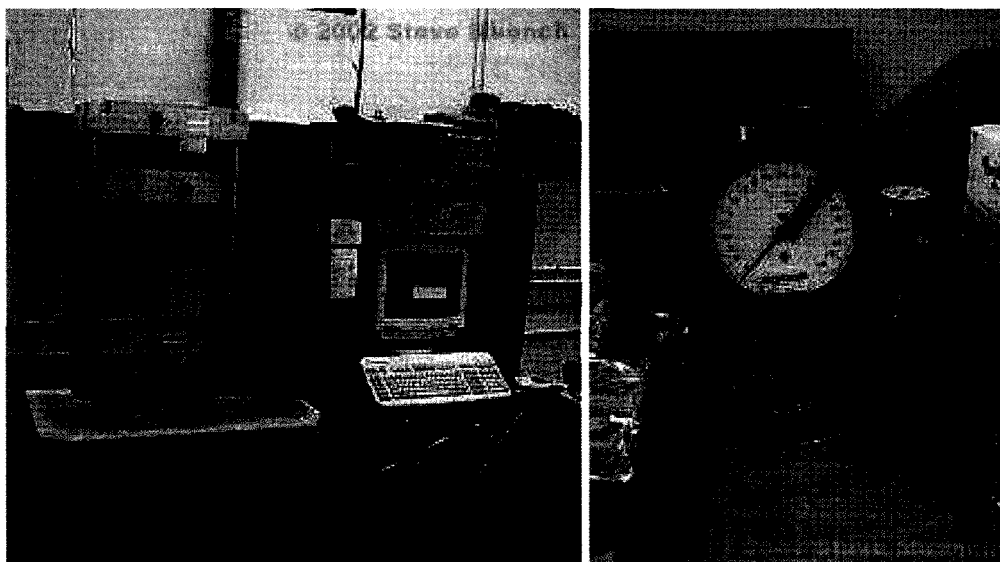


Figure 2A Illustration du « stabilomètre » HVEEM (source Washington Asphalt Pavement Association)

L'essai consiste à appliquer une charge sur le haut de l'éprouvette à un taux prédéterminé. Au fur et à mesure que le taux de charge augmente, la pression latérale est lue à des intervalles spécifiques. La valeur de stabilité obtenue est calculée selon la formule suivante :

$$S = \frac{22.2}{\left[\frac{P_h \times D}{P_v - P_h} \right] - 0.222}$$

où S = Valeur de stabilité HVEEM

P_v = Pression verticale appliquée (typiquement de 2800 kPa)

P_h = Pression horizontale correspondante à la pression verticale appliquée en kPa

D = Déplacement de l'éprouvette en incrémentation de 0,25 mm

Note : une correction doit être apportée à la valeur de stabilité obtenue si la hauteur de l'éprouvette est supérieure à 64 mm

De cette équation, la valeur de stabilité obtenue peut varier de 0 à 90. La valeur 0 représentant la condition selon laquelle la pression latérale est égale à la pression verticale (exemple : un liquide). La valeur 90 de son côté représente la condition à laquelle aucune pression latérale n'est mesurée indépendamment de la pression verticale induite (exemple : solide incompressible). En définitive, plus la valeur de S est élevée, meilleure est la stabilité de l'enrobé sous charge.

ANNEXE 3

Description de la méthode de formulation MARSHALL

Description de la méthode de formulation MARSHALL

Historique

La méthode Marshall fut élaborée à la fin des années 30, par Bruce G. Marshall pour le Mississippi Highway Department (Roberts et coll. 1996) Par la suite, durant la période de la deuxième guerre mondiale jusqu'à la fin des années cinquante, elle fut améliorée par le U.S. Army Corps of Engineers. Leur ambition était de mettre au point une méthode de design pouvant permettre de répondre à l'évolution et l'augmentation des charges induites (initialement de 690 kPa à la fin des années 40 à 1380 kPa au début des années 50) par les pneus des avions militaires de l'époque. De plus, étant donné que leur utilisation primaire était le design de d'enrobés servant à la construction d'aérogare, leur but était de développer une méthode de design qui soit compacte, transportable manuellement et facile d'accès. Ils se concentrèrent donc sur l'évaluation de l'effort de compaction et ses principales caractéristiques, soit le nombre de frappes, la forme et le poids de la dame ainsi que le nombre de coups par surface.

De plus, durant les années 50 (Roberts et coll 2002), le taux d'orniérage sur plusieurs projets s'est avéré croissant dû en grande partie, au dosage élevé en sable naturel dans la combinaison granulométrique. Dans le but de solutionner ce problème, l'exigence à la stabilité fut haussé à 8000 Newtons. Néanmoins, en dépit de cette action, le problème ne fut pas enraillé. Les ingénieurs militaires américains optèrent donc pour diminuer la quantité admissible de sable naturel dans l'enrobé à une valeur maximale de 10%. Cette mesure fut par la suite réévaluée à 15%.

Description et caractéristiques

La méthode Marshall utilise comme principe de base l'écrasement diamétral d'une éprouvette placée entre deux mâchoires cylindriques. Les exigences de base essentiellement recherchées sont : la stabilité, la déformation (fluage) ainsi que le

volume des vides. Cette méthode, (Roberts et coll. 1996) telle que décrite dans la norme ASTM D1559, se décompose en sept grandes étapes :

- a. évaluation des granulats;
- b. évaluation du type de liant;
- c. préparation des éprouvettes;
- d. analyse de la densité et du pourcentage de vides des éprouvettes;
- e. analyse des essais de stabilité et de fluage;
- f. préparation des tableaux d'analyse et de résultats;
- g. détermination du taux de liant optimum.

Tout comme la méthode de formulation HVEEM, les toutes premières étapes de formulation consistent à sélectionner et à évaluer les granulats selon les critères recherchés et à déterminer un taux de liant approximatif en fonction de la localité géographique et du type d'enrobé sélectionné (Roberts et coll. 1996). Il est important de déterminer le fuseau granulométrique et de s'assurer qu'il réponde bien à la plage de granulométrie établie selon les normes. Finalement, il faut établir (Roberts et coll. 1996, Fortin 1996) la surface spécifique de la masse granulaire associée au fuseau ciblé, le taux d'absorption ainsi que la densité apparente. Les températures de malaxage et de compactage seront alors déterminantes pour la sélection du liant.

Ensuite, on procède à la préparation des éprouvettes (6,35 cm X 10,16 cm) selon la procédure de compaction Marshall et on détermine la densité maximale (densité Rice) de l'enrobé. Les éprouvettes sont obtenues par damage selon laquelle une masse de 4,54 kg chute d'une hauteur de 45,72 cm (Woods et coll. 1967). La méthode prévoit la fabrication d'une série d'éprouvettes à partir de différents dosages en bitume.

Après compaction, on évalue pour chacune des éprouvettes la densité brute de l'enrobé (D_{mb}) et le pourcentage de vides.

Le noyau de la méthode consiste à déterminer la teneur optimale en bitume en se référant à l'évolution des caractéristiques des enrobés confectionnés (densité, stabilité, volume des vides) pour différents dosages en bitume. Les principales analyses de

données consistent à illustrer sur un diagramme la teneur en bitume en fonction de (Roberts et coll. 1996) :

- a. la densité;
- b. la stabilité;
- c. le pourcentage de vide du mélange;
- d. la masse volumique,
- e. le fluage; et
- f. le pourcentage de vides intergranulaires.

La teneur en liant optimale est sélectionnée suite à l'analyse des différentes relations établies et correspondant à la moyenne arithmétique des teneurs en bitume obtenues selon la stabilité maximale, la masse volumique maximale ainsi que le pourcentage de vide visé (Fortier, 1996). De plus, la valeur optimale obtenue doit être validée quant aux exigences relatives à l'indice de fluage et le pourcentage des vides du squelette granulaire (V.A.M. : voids in aggregate mineral).

Avantages et désavantages

Le fait que cette méthode soit simple et rapide pour évaluer le contrôle de qualité lui confère un des avantages les plus notoires. De plus, en considérant les vides, la résistance (stabilité) et la durabilité des enrobés, cette méthode s'avère relativement complète. Enfin, il ne faut pas oublier de mentionner qu'il s'agit d'un procédé de formulation peu coûteux et de grande mobilité (Langlois 2004).

Toutefois, certains bémols sont apportés sur la méthode de compaction qui s'effectue par impacts et dont la charge de compaction est appliquée perpendiculairement à l'axe de compaction, laquelle ne permet pas de reproduire efficacement la densité en chantier (Roberts et coll 2002). Finalement, il faut noter que cette méthode de formulation ne tient pas compte de la résistance au cisaillement de l'enrobé, associée à l'orniérage, puisqu'il s'agit d'un écrasement diamétral.

ANNEXE 4

Description de la méthode de formulation SUPERPAVE

Description de la méthode de formulation SUPERPAVE

Historique

Au début des années quatre-vingt le besoin se faisait sentir pour mettre au point une nouvelle méthode de formulation qui pouvait de façon rationnelle répondre aux nouvelles charges et volumes de circulation ainsi qu'aux changements environnementaux et climatiques. Le but premier de cette nouvelle tentative était de pouvoir prédire le comportement des enrobés à l'orniérage, à la fissuration thermique ainsi qu'à la fissuration par fatigue.

C'est donc avec cet objectif que le Strategic Highway Research Program (SHRP) entreprit des recherches en 1988 (Roberts et coll. 1996). Initialement, cette étude visait à évaluer les types de liants utilisés, les critères de design des mélanges bitumineux ainsi que les analyses à effectuer suite au design. Étonnamment, aucune attention n'était portée spécifiquement aux granulats. Mais les chercheurs ont dû décider en cours de recherche d'inclure un volet directeur sur les granulats étant donné leur importance dans les mélanges bitumineux.

Descriptions et caractéristiques

Le résultat de ce programme de recherche fut l'élaboration d'un nouveau système de classification des bitumes selon leur grade de performance (performance grade (PG)), la mise au point de critères et de propriétés des granulats, l'élaboration d'une nouvelle procédure de design de l'enrobé ainsi que des procédures élaborées d'analyse de mélange d'enrobé bitumineux.

La première étape concerne la sélection des matériaux soit leur angularité, leur pourcentage de particules plates et allongées et leur teneur en argile. La seconde touche la provenance des granulats et impose des critères de sélection en ce qui

concerne leur dureté et leur solidité ainsi que le pourcentage induit de substances délétères tels que les mottes d'argile et les argiles schisteuses, les particules de bois et de mica, etc. Finalement la dernière catégorie traite de la combinaison du squelette granulaire induit par le mélange de plusieurs granulats. Les combinaisons recommandées sont en fonction de la valeur nominale des granulats et chacune d'entre elles comportent des points de contrôle ainsi que des zones de restrictions. Cette étape comporte la reproduction de la courbe granulométrique du squelette granulaire en comparaison avec la courbe de densité maximale sur un graphique pourcentage passant en fonction des tamis à la puissance 0,45 tel que décrit par Fuller-Thompson. Le Tableau 4.1 présente les combinaisons granulaires établies selon la méthode Superpave. Ces combinaisons granulaires furent produites suite à différentes analyses et aux critères de performance des granulats fixés précédemment.

Tableau 4.1

Fuseaux granulométriques en fonction de la grosseur nominale des granulats

Granulat de grosseur nominale de 37,5 mm				
Tamis (mm)	Points de contrôle		Limite – Zone de restriction	
			Minimum	Maximum
50		100,0		
37,5	90,0	100,0		
25				
19				
12,5				
9,5				
4,75			34,7	34,7
2,36	15,0	41,0	23,3	27,3
1,18			15,5	21,5
0,600			11,7	15,7
0,300			10,0	10,0
0,150				
0,075	0,0	6,0		

Tableau 4.1 (suite)

Fuseaux granulométriques en fonction de la grosseur nominale des granulats

Granulat de grosseur nominale de 25 mm				
Tamis (mm)	Points de contrôle		Limite – Zone de restriction	
			Minimum	Maximum
37,5		100,0		
25	90,0	100,0		
19				
12,5				
9,5				
4,75			39,5	39,5
2,36	19,0	45,0	26,8	30,8
1,18			18,1	24,1
0,600			13,6	17,6
0,300			11,4	11,4
0,150				
0,075	1,0	7,0		

Granulat de grosseur nominale de 19 mm				
Tamis (mm)	Points de contrôle		Limite – Zone de restriction	
			Minimum	Maximum
25		100,0		
19	90,0	100,0		
12,5				
9,5				
4,75				
2,36	23,0	49,0	34,6	34,6
1,18			22,3	28,3
0,600			16,7	20,7
0,300			13,7	13,7
0,150				
0,075	2,0	8,0		

Tableau 4.1 (suite)

Fuseaux granulométriques en fonction de la grosseur nominale des granulats

Granulat de grosseur nominale de 12,5 mm				
Tamis (mm)	Points de contrôle		Limite – Zone de restriction	
			Minimum	Maximum
19		100,0		
12,5	90,0	100,0		
9,5				
4,75				
2,36	28,0	58,0	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,150				
0,075	2,0	10,0		

Granulat de grosseur nominale de 9,5 mm				
Tamis (mm)	Points de contrôle		Limite – Zone de restriction	
			Minimum	Maximum
12,5		100,0		
9,5	90,0	100,0		
4,75				
2,36	32,0	67,0	47,2	47,2
1,18			31,6	37,6
0,600			23,5	27,5
0,300			18,7	18,7
0,150				
0,075	2,0	10,0		

La seconde étape comporte la sélection du squelette granulaire optimum. Lors de cette étape, la presse à cisaillement giratoire (PCG) sera utilisée afin d'évaluer les différentes combinaisons possibles. Un minimum de trois combinaisons est alors nécessaire en fonction du fuseau granulométriques sélectionné lors de l'étape 1. Généralement on procède à la confection de deux fuseaux selon les limites minimales et maximales et d'un troisième situé à mi-chemin entre les limites précédentes. La teneur en bitume initiale est alors déterminée à l'aide de la formule suivante pour chaque combinaison granulaire :

$$P_{bi} = \frac{d_b * (V_{be} + V_{ba})}{(d_b * (V_{be} + V_{ba})) + M_g} * 100$$

Où

$$1. \quad V_{be} = 0,176 - 0,0675 * \log(S_n)$$

où S_n = tamis (mm) de la grosseur nominale maximale du mélange

$$2. \quad V_{ba} = \frac{P_s * (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{d_b} + \frac{P_g}{D_{se}}\right)} * \left(\frac{1}{D_{gb}} - \frac{1}{D_{ge}}\right)$$

où P_g = Pourcentage de granulats $(1 - P_b)$

$$3. \quad D_{ge} = D_{gb} + 0,8 * (D_{app} - D_{gb})$$

$$4. \quad M_g = \frac{P_g * (1 - V_{air})}{\left(\frac{P_b}{d_b} + \frac{P_g}{D_{ge}}\right)}$$

Par la suite deux éprouvettes sont confectionnées et testés à l'aide de la PCG et deux autres sont reproduits pour déterminer la densité maximale du mélange et ce, pour chaque combinaison granulaire déterminée. Finalement chaque combinaison est étudiée selon une analyse volumétrique. Les caractéristiques obtenues de chaque combinaison sont comparées aux critères de design établis par la méthode Superpave. Tous les mélanges répondant à ces critères peuvent être sélectionnés comme squelette granulaire potentiel. Les critères de design de la méthode Superpave sont illustrés au Tableau 4.2.

La troisième étape, la sélection de la teneur optimale en bitume nécessite la confection d'au moins quatre mélanges suivant la combinaison optimale sélectionnée à l'étape 2 mais selon des teneurs en bitume différentes. Ces quatre teneur sont : la teneur originellement estimée (P_{bi}), $P_{bi} + 0,5\%$, $P_{bi} - 0,5\%$ et $P_{bi} + 1,0\%$. Un minimum de deux échantillons doit être produits à chaque teneur et chacun d'entre eux doit être évalué à la PCG. Deux autres échantillons sont également produits afin de déterminer la densité

maximale du mélange. Chaque essai à la PCG se fait en fonction du nombre de girations de design, maximum et minimum établis en fonction du niveau de la circulation à laquelle la chaussée sera soumise. L'analyse de ses résultats établira des relations entre le pourcentage d'air, le VAM et le VCB en fonction de la teneur en bitume.

Tableau 4.2

Critères de design selon la méthode de formulation SUPERPAVE

Teneur en air	
Plage de la teneur en air	3 à 5 %
Teneur en air optimum à N_{design}	4 %

Vides intergranulaires (VAM)	
Grosseur nominale des granulats	VAM minimum (%)
9,5 mm	15,0
12,5 mm	14,0
19 mm	13,0
25 mm	12,0
37,5 mm	11,0

Vides comblés par le bitume (VCB)	
Niveau de circulation (ÉCAS)	VCB de design (%)
$< 3 \times 10^5$	70 - 80
$< 1 \times 10^6$	65 - 78
$< 3 \times 10^6$	65 - 78
$< 1 \times 10^7$	65 - 75
$< 3 \times 10^7$	65 - 75
$< 1 \times 10^8$	65 - 75
$> 3 \times 10^8$	65 - 75

Critère de ratio de poussière (Dust proportion criteria)	
Plage de design	0,6 à 1,2
Ratio de calcul	$\frac{\% \text{ massique passant le tamis } 0,075\text{mm}}{P_{be}}$

La quatrième et dernière étape consiste à évaluer le mélange sélectionné à l'essai de la tenue à l'eau selon la norme AASHTO T283.

Par la suite, deux niveaux sont disponibles afin d'évaluer la performance à long terme de ces enrobés par des essais accélérés. Le niveau 2 s'adresse à des enrobés soumis à un niveau de circulation maximum de 10 millions d'ÉCAS tandis que le niveau 3 est utilisé pour des enrobés dont le niveau de circulation sera supérieur à 10 millions d'ÉCAS. Ces nouveaux niveaux de contrôle font en sorte d'introduire de nouveaux appareils de contrôle du bitume tels qu'identifié au Tableau 4.3, facilitant ainsi l'analyse et la prédiction des performances de l'enrobé. Le Tableau 4.4 de son côté identifie les étapes nécessaires qui sont induites pour chaque niveau supplémentaire requis en fonction de la circulation.

Tableau 4.3

Appareils de contrôle du bitume introduit par la méthode Superpave

Appareils	But	Propriétés de performance associée
Étuvage accéléré en couche mince (RTFO)	Simuler le vieillissement à court terme	
Vieillissement sous pression (PAV)	Simuler le vieillissement à long terme	
Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR)	Mesurer les propriétés du bitume à haute température et à des températures intermédiaires	<ul style="list-style-type: none"> • Déformations permanentes – orniérage • Fissuration de fatigue – fissuration structurale
Rhéomètre à flexion de poutre (BBR)	Mesurer les propriétés du bitume à basse température	<ul style="list-style-type: none"> • Fissuration par retrait thermique – fissuration à basse température
Traction directe (DT)	Mesurer les propriétés du bitume à basse température	<ul style="list-style-type: none"> • Fissuration par retrait thermique – fissuration à basse température
Viscosimètre rotationnel (RV)	Mesurer les propriétés du bitume à haute température	<ul style="list-style-type: none"> • Manutention et pompage – viscosité et écoulement

(Source : Tourangeau, 2004)

Avantages et désavantages

Les principaux avantages de la méthode Superpave sont l'augmentation de la corrélation entre la performance d'une chaussée et les caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que le potentiel d'économie sur la durée de vie de chaussée plus durable puisque la conception des enrobés se fait en prenant en considération les conditions environnementales locales (Kuennen, 2004).

Par contre, il s'agit d'une méthode de design beaucoup plus coûteuse (Tremblay, 2004) et qui est encore relativement récente. Les expériences futures seront le meilleur moyen de juger de son efficacité.

Tableau 4.4

Tests de performances Superpave niveau 2 et 3 sur enrobés

Niveau de design	Type de déformation		
	Déformation permanente	Fissuration par fatigue	Fissuration thermique
2	<ul style="list-style-type: none"> • Test de cisaillement simple à hauteur constante et à T_{eff}; • Test de balayage de fréquences à hauteur constante et à T_{eff} 	<ul style="list-style-type: none"> • Test de cisaillement simple à hauteur constante et à T_{eff}; • Test de balayage de fréquences à hauteur constante et à T_{eff} • Test indirect de résistance à la traction à T_{eff} 	<ul style="list-style-type: none"> • Test indirect de fluage par traction à 0, -10 et -20 °C; • Test indirect de résistance à la traction à -10 °C; • Test de rigidité et taux de fluage
3	<ul style="list-style-type: none"> • Test de balayage de fréquences à hauteur constante à 4, 20 et 40 °C; • Test volumétrique à 4, 20 et 40 °C; • Test de cisaillement simple à hauteur constante à 4, 20 et 40 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • Test indirect de résistance à la traction à T_{eff} à -10, 4 et 20 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • Test indirect de fluage par traction et de rigidité à 0, -10 et -20 °C; • Test de rigidité et taux de fluage

(Source Asphalt Institute, 1995)

ANNEXE 5

Description de la méthode de formulation FRANÇAISE

Description de la méthode de formulation FRANÇAISE

Historique

Durant les années 60, les experts français remarquent que leur réseau routier présente plusieurs défauts de faïençage et d'orniérage. Un groupe de recherche et de réflexion est alors mis sur pieds afin d'évaluer les mesures à prendre pour améliorer le réseau routier français. Le groupe de travail décide donc de :

- a. augmenter l'épaisseur des enrobés pour renforcer les chaussées souples;
- b. maximiser le rendement à l'orniérage et l'imperméabilité de la chaussée sans toutefois affecter la résistance à la fatigue de la chaussée; et
- c. développer et mettre au point des laboratoires et de l'équipement pour répondre aux besoins précédents.

Les experts français mettent donc au point plusieurs nouveaux critères pour répondre à la nouvelle demande puisqu'on se rend compte que les enrobés en service ne répondent plus aux nouveaux critères de performance. Les nouveaux critères sont (Moutier 1996):

- a. une masse granulaire constituée entièrement de particules concassées;
- b. une teneur en bitume et une proportion de sable beaucoup plus faible;
- c. un pourcentage de particules fines avoisinant le 7 à 8 %; et
- d. des catégories de bitume plus dur (40/50 et 60/70).

Pour pallier à ces nouvelles demandes, les experts décident également d'élaborer une liste de critères et d'objectifs associés à la mise en place et à l'évaluation en laboratoire des nouveaux enrobés. L'utilisation d'atelier de compactage lourd, l'augmentation du niveau de surveillance des moyens de fabrication et de compactage sont les éléments reliés à la mise en place. Quant à la recherche de nouvelles fractions granulaires, afin

de pallier aux vides inter-granulaires et aux problèmes d'imperméabilité, elle se concentre aux activités en laboratoire (Moutier,1996).

Suite à de nombreux travaux, deux appareils de contrôle font alors leur apparition : la presse à cisaillement giratoire et l'ornièreur. Ces deux nouveaux appareils constituent désormais la base du système de formulation français : la PCG servant à estimer l'aptitude au compactage de l'enrobé et l'ornièreur permettant d'évaluer la performance à l'orniérage de l'enrobé.

Descriptions et caractéristiques

La méthodologie Française de formulation des enrobés exige depuis les années 70, l'usage exclusif de granulats concassés. Les classes granulaires suivantes peuvent être utilisées : 0/2 – 0/4 – 2/6,3 – 2/4 – 4/6,3 – 4/10 – 6,3/10 et 10/14.

Dans cette méthode de formulation, la teneur en liant est également établie en fonction du module de richesse (M_{richesse}), du coefficient correcteur de la masse volumique (α) et de la surface spécifique des granulats (Σ) selon l'équation suivante :

$$\text{Teneur en liant} = M_{\text{richesse}} * \alpha * (\Sigma)^{1/5}$$

Le module de richesse étant directement relié à la grosseur nominale maximale de l'enrobé.

L'étape suivante consiste à évaluer l'aptitude au compactage de l'enrobé à l'aide de la presse à cisaillement giratoire. La valeur du N_{design} est alors déterminée en tenant compte des facteurs de mise en place.

Ces facteurs sont :

- a. l'énergie de compaction générée par les appareils de compaction utilisés en chantier;

- b. l'épaisseur de pose de l'enrobé; et
- c. le nombre de passe de rouleau compacteur (1 passe équivaut à un aller-retour de rouleau au même endroit).

L'évolution des vides dans l'enrobé en fonction du nombre de girations sélectionné pour fin de contrôle va servir de critère d'évaluation de l'aptitude au compactage de l'enrobé. Le comportement de l'enrobé est évalué et la décision est prise de continuer le processus de formulation ou de l'adapter.

Advenant, que l'enrobé soit jugé conforme, l'étape suivante consiste à évaluer le comportement du mélange à l'orniéreur pour évaluer la profondeur des ornières. Suite à la mesure des ornières à un nombre prédéterminer de cycles (sélectionné en fonction de l'enrobé) si la valeur obtenue est supérieure au seuil fixé par la norme, le mélange est refusé et doit retourner à l'étape d'optimisation.

Avantages et désavantages

La formulation Française constitue une méthodologie de travail efficace et basée sur plusieurs essais. Ce qui représente assez fidèlement le comportement en chantier et l'usure générée par la circulation.

Par contre, il s'agit d'un procédé qui nécessite des équipements très dispendieux et d'envergure. De plus, les caractéristiques de fonctionnement de ses appareils sont propres aux équipements français et nécessitent certains ajustements et modifications afin d'être compatibles aux équipements utilisés dans les autres procédés de formulation, principalement en Amérique du Nord.

Il est toutefois important de noter que la nouvelle génération de presse à cisaillement giratoire, la PCG III, possède des critères de fonctionnement variables tant du point de vue angle de giration, vitesse de rotation que de la pression qui la rendront compatible aux autres pays notamment en Amérique du Nord.

ANNEXE 6

Description de la méthode de formulation LC du MTQ

Description de la méthode de formulation LC du MTQ

Historique

En 1991, suite à la nouvelle formulation Française, le Ministère des transports du Québec entreprend des recherches pour mettre au point sa propre méthode de formulation. Mais, la venue, en 1993, de la méthode Superpave, laquelle est utilisée dans toutes les provinces et états adjacents au Québec, forcent les experts à mettre au point une méthodologie de travail qui s'apparente à la méthode Superpave. Par contre, les intervenants remarquent que la méthodologie Superpave peut générer une formulation d'enrobé de faible rendement. Dans un premier temps, des enrobés à faible teneur en bitume, engendrant des performances relativement faibles, sont observés. Des enrobés à teneur en bitume trop élevée sont également observés. Ce qui génère de forts risques d'orniérage. C'est donc pour faire suite à ces observations que le premier enrobé issu de la formulation LC voit le jour en 1993, il s'agit d'un enrobé EG-12,5.

Durant les années 94 et 95, la méthode LC est mise au point suite à la combinaison des méthodes Française et Superpave. Les enrobés EG-10 et EGA-10 voient le jour. En 1996, les enrobés ESG-10 et ESG-14 font leur apparition. En 1997, survient la normalisation de la méthode LC. La procédure de formulation LC est une méthode de formulation à deux niveaux combinant l'optimisation de l'aptitude au compactage de l'enrobé évaluée à la presse à cisaillement giratoire à celle de sa résistance à l'orniérage.

Description et caractéristiques

La méthode LC suit les objectifs suivants :

- a. pouvoir être utilisable en laboratoire mobile;

- b. utiliser une méthodologie de compactage directement reliée à celle en chantier;
- c. utiliser des granulats de fortes dimensions advenant la nécessité;
- d. mesurer la compactibilité;
- e. tenir compte de la durabilité et des performances de l'enrobé.

Par contre, elle doit surtout être compatible avec la méthode Superpave pour permettre un échange direct d'informations avec les autres organismes de transports. La compatibilité engendre l'utilisation d'équipements identique ou similaire et la production d'enrobé respectant les principaux critères établis selon la formulation Superpave. Le principe premier de la méthode LC est d'allier le meilleur des mondes entre la résistance à l'orniérage, la résistance à la fissuration, l'arrachement et le désenrobage pour finalement avoir une teneur en bitume acceptable tout en résistant à l'orniérage : le MTQ fixe la valeur du volume de bitume effectif requis pour un enrobé donné : V_{be} (%). La formulation LC est basée principalement sur l'analyse des volumes dans les enrobés. Cette analyse permet de s'assurer de toujours avoir un volume de bitume effectif minimum dans l'enrobé.

La méthode LC comporte les étapes suivantes.

- a. sélection des composantes –granulats et bitume;
- b. sélection de la granulométrie de l'enrobé;
- c. détermination du pourcentage de bitume initial suivant le V_{be} exigé;
- d. vérification du pourcentage de vides à la l'aide de la PCG; et
- e. réalisation des différents essais de contrôle.

La première étape consiste à déterminer les caractéristiques des granulats notamment sa densité brute. Par la suite, le volume de bitume effectif est sélectionné en fonction de la norme LC selon le type d'enrobé. La teneur en bitume absorbé est alors calculée en fonction de la densité brute du combiné granulaire. La teneur en bitume initiale peut alors être déterminée suivant la teneur absorbée et le volume de bitume effectif. Suivant ce calcul, la densité brute effective des granulats est déterminée et sert finalement à estimer la densité maximale du mélange.

On procède alors au deuxième bloc de la formulation qui consiste à la compaction du premier mélange d'essai à l'aide de la presse à cisaillement giratoire. Le vieillissement à court terme est alors simulé en laboratoire après l'atteinte de la température désirée. Suite à l'essai à la PCG, l'analyse du pourcentage de vide à N_{design} constitue l'étape suivante. Les vides de l'enrobé sont analysés à plusieurs niveaux de girations selon l'enrobé à formuler. L'enrobé est jugé conforme s'il répond à tous les critères, l'essai peut alors être complété en réalisant deux autres éprouvettes. Par contre, si l'enrobé ne répond pas aux critères, l'ajustement de l'enrobé s'avère nécessaire pour continuer la formulation. L'optimisation de la formulation peut s'avérer essentielle pour augmenter le rendement de l'enrobé. Les éléments suivants sont alors étudiés : le VAM, le V_{be} ainsi que le VCB.

Enfin, après optimisation de l'enrobé, la dernière étape consiste à évaluer le mélange à l'aide de l'orniéreur du LCPC et de l'essai de la tenue à l'eau. En fonction de l'enrobé formulé, des niveaux de contrôle sont alors requis pour assurer un bon rendement de l'enrobé sur chaussée.

Avantages et désavantages

Le critère distinctif parmi les autres procédés de formulation de la méthode de formulation LC est liée au fait qu'elle fixe une teneur en bitume (V_{be}) selon le type d'enrobé à confectionner. De plus, cette technique élabore des critères de maniabilité en fonction de l'épaisseur réelle de l'enrobé suite au compactage en chantier : le nombre de giration de contrôle, N_{design} évolue selon le type d'enrobé à mettre en oeuvre. Comparativement à la formulation Marshall, les teneurs en bitume des enrobés formulés à l'aide de la méthode LC sont généralement plus élevés puisqu'ils se doivent de respecter un seuil minimum élaboré par la norme. Ce qui fait en sorte de garantir sur papier une durée de vie plus longue (Langlois et Beaudoin 1996).

Par contre la formulation LC possède comme principal désavantage d'être une méthode de formulation qui base son N_{design} de façon aléatoire et empirique et ce, uniquement sur l'expérience acquise antérieurement.

ANNEXE 7

Critères de qualité pour la fibre de cellulose

Critères de qualité pour la fibre de cellulose

Property	Requirement
Size Analysis	
Method A – Alpine Sieve ¹ Analysis Fiber Length Passing 0,150 mm (No. 100 sieve)	6 mm (0,25 in.) Maximum 70 ± 10%
Method B – Mesh Screen ² Analysis Fiber Length Passing 0,850 mm (No. 20 sieve) Passing 0,425 mm (No. 40 sieve) Passing 0,106 mm (No. 140 sieve)	6 mm (0,25 in.) Maximum 85 ± 10% 65 ± 10% 30 ± 10%
Ash Content ³	18 ± 5% non volatiles
pH ⁴	7,5 ± 1,0
Oil Absorption ⁵	5,0 ± 1,0 (times fiber mass)
Moisure Content ⁶	Less than 5% (by mass)

Note 1

Method A – Alpine Sieve Analysis. This test is performed using an Alpine Air Jet Sieve (Type 200 LS). A representative five gram sample of fiber is sieved for 14 minutes at a controlled vacuum of 75 kPa (11 psi) of water. The portion remaining on the screen is weighed.

Note 2

Method B – Mesh Screen Analysis. This test is performed using standard 0,850, 0,424, 0,250, 0,180, 0,150 and 0,106 mm sieves, nylon brushes and a shaker. A representative 10 gram sample of fiber is sieved, using a shaker and two nylon brushes on each screen. The amount retained on each sieve is weighted and the percentage passing calculated. Repeatability of this method is suspect and needs to be verified.

Note 3

Ash content. A representative 2-3 gram sample of fiber is placed in a tared crucible and heated between 596 and 650°C (1100 and 1200°F) for not less than two hours. The crucible and ash are cooled in a dessicator and weighed.

Note 4

pH test. Five grams of fiber is added to 100 ml of distilled water, stirred and let sit for 30 minutes. The pH is determined with a probe calibrated with pH 7,0 buffer.

Note 5

Oil Absorption Test. Five grams of fiber is accurately weighed and suspended in an excess of mineral spirits for not less than 5 minutes to ensure total saturation. It is then placed in a screen mesh strainer (approximately 0,5 mm² opening size) and shaken on a wrist action shaker for 10 minutes (approximately 32 mm (1 ¼ in.) motion at 240 shakes per minute). The shaken mass is then transferred without touching to a tared container and weighed. Results are reported as the amount (number of times its own weight) the fibers are able to absorb.

Note 6

Moisure Content. Ten grams of fiber is weighed and placed in a 121°C (250°F) forced air oven for two hours. The sample is then re-weighed immediately upon removal from the oven.

(Adapté de Brown, E.R. et coll, 1998)

ANNEXE 8

Critères de qualité pour la fibre minérale

Critères de qualité pour la fibre minérale

Property	Requirement
Size Analysis Fiber Length ¹ Thickness ²	6 mm (0,25 in.) Maximum mean test value 0,005 mm (0,0002 in.) Maximum mean test value
Shot Content ³ Passing 0,250 mm (No. 60) sieve Passing 0,005 mm (No. 230) sieve	90 ± 5% 70 ± 10%

Note 1

The fiber length is determined according to the Bauer McNett fractionation.

Note 2

The fiber diameter is determined by measuring at least 200 fibers in a phase contrast microscope.

Note 3

Shot content is a measure of non-fibrous material. The shot content is determined on vibrating sieves. Two sieves 0,250 and 0,063 are typically utilized. For additional information see ASTM C 612.

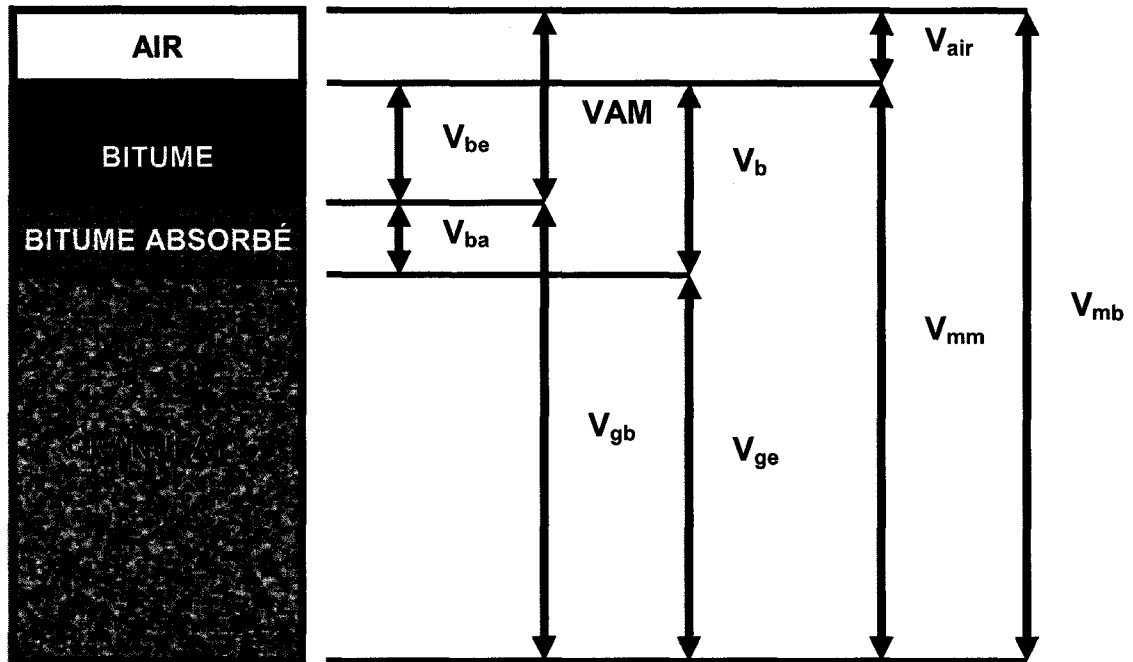
(Adapté de Brown, E.R. et coll, 1998)

ANNEXE 9

Démonstration des formules de formulation selon la méthode N.C.A.T.

Démonstration des formules de formulation selon la méthode N.C.A.T.

Diagramme des volumes



Détermination des vides intergranulaires (VAM)

$$VAM = \frac{VAM}{V_{mb}}$$

avec

$$VAM = V_{mb} - V_{gb}$$

Le VAM s'exprime de la façon suivante :

$$VAM(\%) = \left[\frac{V_{mb} - V_{gb}}{V_{mb}} \right] * 100 = \left[1 - \frac{V_{gb}}{V_{mb}} \right] * 100$$

En substituant ces valeurs :

$$V_{gb} = \frac{M_g}{D_{gb}} \quad \text{et} \quad P_s = \left(\frac{M_g}{M_m} \right) * 100 \Rightarrow M_g = \left(\frac{P_s}{100} \right) * M_m \quad \text{et} \quad V_{mb} = \left(\frac{M_m}{D_{mb}} \right)$$

On a donc que

$$VAM(\%) = \left[1 - \frac{P_s * M_m * D_{mb}}{100 * D_{gb} * M_m} \right] * 100 = \left[1 - \frac{P_s * D_{mb}}{100 * D_{gb}} \right] * 100$$

Et finalement

$$VAM(\%) = 100 - \left(\frac{D_{mb}}{D_{gb}} * P_s \right)$$

Détermination du volume d'air (V_{air})

On sait que

$$D_{mm} = \frac{D_{mb}}{\frac{1 - V_{air}}{1}}$$

Donc si on isole V_{air} dans l'équation précédente on obtient

$$D_{mm} * \left(\frac{1 - V_{air}}{1} \right) = D_{mb}$$

$$\left(\frac{1 - V_{air}}{1} \right) = \frac{D_{mb}}{D_{mm}}$$

$$V_{air} = 1 - \frac{D_{mb}}{D_{mm}}$$

Si on exprime le V_{air} en pourcentage on obtient finalement

$$V_{air} = 100 * \left(1 - \frac{D_{mb}}{D_{mm}} \right)$$

ANNEXE 10

« Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures » .

« Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures »

Standard Test Method for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures AASHTO Format

1. SCOPE

1.1 This test method covers the determination of the amount of draindown in an uncompacted asphalt mixture sample when the sample is held at elevated temperatures comparable to those encountered during the production, storage, transport, and placement of the mixture. The test is particularly applicable to mixtures such as porous asphalt (open-graded friction course) and Stone Matrix Asphalt (SMA).

1.2 The values stated in the gram-millimeter units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. REFERENCED DOCUMENTS

2.1 AASHTO Standards:

T 245 Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus M 92 Wire Cloth Sieves for Testing Purposes

3. DEFINITIONS

3.1 Draindown—For the purpose of this test method, draindown is considered to be that portion of material which separates itself from the sample as a whole and is deposited outside the wire basket during the test. The material which drains may be composed of either asphalt binder or a combination of asphalt binder and fine aggregate.

4. SUMMARY OF METHOD

4.1 A sample of the asphalt mixture to be tested is prepared in the laboratory or obtained from field production. The sample is placed in a wire basket which is positioned on a plate or other suitable container of known mass. The sample, basket, and plate or container are placed in a forced draft oven for one hour at a pre-selected temperature. At the end of one hour, the basket containing the sample is removed from the oven along with the plate or container and the mass of the plate or container is determined. The amount of draindown is then calculated.

5. SIGNIFICANCE AND USE

5.1 This test method can be used to determine whether the amount of draindown measured for a given asphalt mixture is within acceptable levels. The test provides an evaluation of the draindown potential of an asphalt mixture during mixture design and/or during field production. This test is primarily used for mixtures with high coarse aggregate content such as porous asphalt (open-graded friction course) and Stone Matrix Asphalt (SMA).

6. APPARATUS

6.1 Forced draft oven, capable of maintaining the temperature in a range from 120-175 °C (250-350 °F). The oven should maintain the set temperature to within +2 °C (+ 3.6 °F).

6.2 Plates or other suitable containers of appropriate size. The plates or containers used should be of appropriate durability to withstand the oven temperatures. Cake pans or pie tins are examples of suitable types of containers.

6.3 Standard basket meeting the dimensions shown in Figure 10A. The basket sides and bottom shall be constructed using standard 6.3 mm (0.25 inches) sieve cloth as specified in AASHTO M 92.

6.4 Spatulas, trowels, mixer, and bowls as needed.

6.5 Balance accurate to 0.1 gram.

7. SAMPLE PREPARATION

7.1 Laboratory Prepared Samples

7.1.1 *Number of Samples*—For each mixture tested, the draindown characteristics should be determined at two different temperatures. The two temperatures should be the anticipated plant production temperature as well as 15 °C (27 °C) above (Note 1). For each temperature, duplicate samples should be tested. Thus for one asphalt mixture, a minimum of four samples will be tested.

Note 1—When using the test as part of the mixture design procedure, the test should be performed at two temperatures in order to determine the potential effect that plant temperature variation may have on the mixture during production. When the test is used in the field during production, it should be necessary to perform the test at the plant production temperature only.

7.1.2 Dry the aggregate to constant mass and sieve it into appropriate size fractions as indicated in AASHTO T 245, section 3.2.

7.1.3 Determine the anticipated plant production temperature or select a mixing temperature in accordance with AASHTO T 245, section 3.3.1.

7.1.4 Place into separate pans for each test sample the amount of each size fraction required to produce completed mixture samples having a mass of 1200±200 grams. The aggregate fractions shall be combined such that the resulting aggregate blend has the same gradation as the job-mix-formula. Place the aggregate samples in an oven and heat to a temperature not to exceed the mixing temperature established in

7.1.3 by more than approximately 28EC (50EF).

7.1.5 Heat the asphalt binder to the temperature established in 7.1.3.

7.1.6 Place the heated aggregate in the mixing bowl. Add any stabilizers (Note 2) and thoroughly mix the dry components. Form a crater in the aggregate blend and add the required amount of asphalt. The amount of asphalt shall be such that the final sample has the same asphalt content as the job-mix-formula. Using a spatula (if mixing by hand) or a mixer, mix the aggregate (and stabilizer if any) and asphalt binder quickly until the aggregate is thoroughly coated. After mixing, the temperature of the aggregate and asphalt binder shall be within the limits of the mixing temperature established in 7.1.3.

Note 2—Some types of stabilizers such as fibers or some polymers must be added directly to the aggregate prior to mixing with the asphalt binder. For laboratory prepared mixes, loose fibers should be used. Asphalt-fiber pellets will not blend into the aggregate under low-shear laboratory mixing conditions. Other types of stabilizers must be added directly to the asphalt binder prior to blending with the aggregate.

7.2 Plant Produced Samples

7.2.1 *Number of Samples*—For plant produced samples, duplicate samples should be tested at the plant production temperature.

7.2.2 Samples may be obtained during plant production by sampling the mixture at any appropriate location such as the trucks prior to the mixture leaving the plant. Samples obtained during actual production should be reduced to the proper test sample size by the quartering method.

Note 3—Caution should be exercised when sampling from surge or storage bins because draindown may already have taken place.

8. PROCEDURE

8.1 Transfer the hot laboratory produced or plant produced uncompacted mixture sample to a tared wire basket described in 6.3. Place the entire sample in the wire basket. Do not consolidate or otherwise disturb the sample after transfer to the basket. Determine the mass of the sample to the nearest 0.1 gram. Care should be exercised to ensure that the sample does not cool more than 25 °C below the test temperature (see section 8.2).

8.2 Determine and record the mass of a plate or other suitable container to the nearest 0.1 gram. Place the basket on the plate or container and place the assembly into the oven at the temperature as determined in 7.1.1 or 7.2.1 for 1 hour + 5 minutes. If the sample has cooled more than 25°C but less than 50°C below the test temperature, the test should be conducted for 70 ± 5 minutes. If the sample has cooled more than 50EC below the test temperature, the sample should be discarded.

8.3 After the sample has been in the oven for the time specified in section 8.2, remove the basket and plate or container from the oven. Determine and record the mass of the plate or container plus drained asphalt binder to the nearest 0.1 gram.

9. CALCULATIONS

9.1 Calculate the percent of mixture which drained by subtracting the initial plate or container mass from the final plate or container mass and divide this by the initial total sample mass. Multiply the result by 100 to obtain a percentage.

10. REPORT

10.1 Report the average percent drainage at each of the test temperatures.

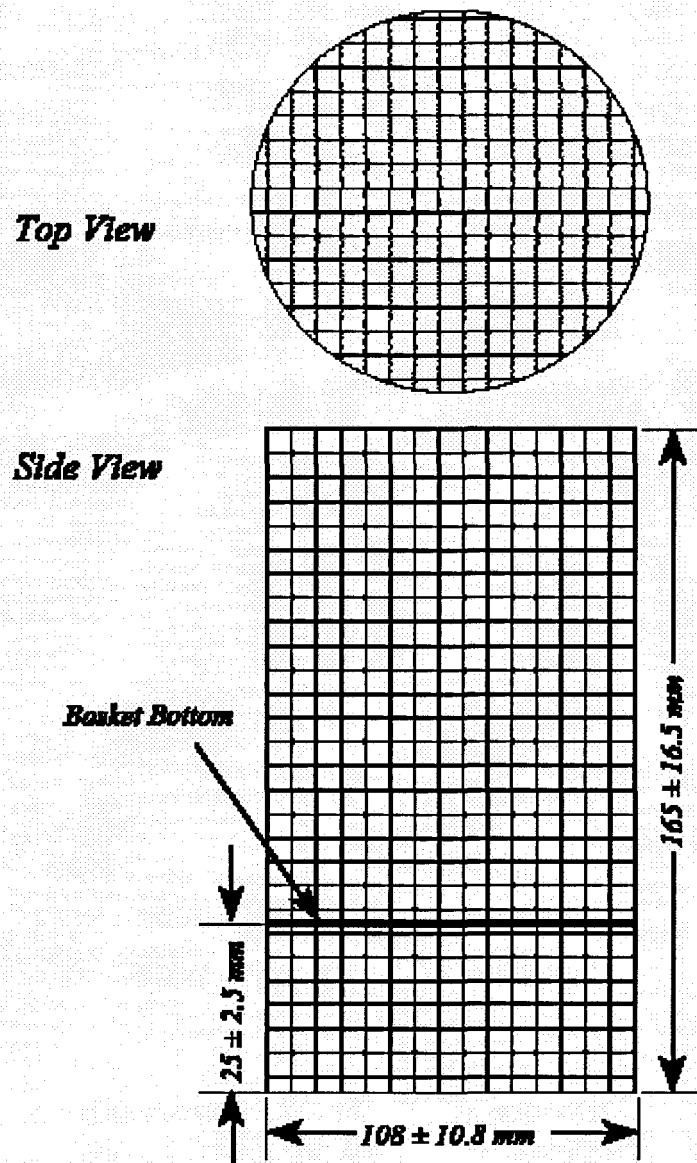


FIGURE 10A Wire Basket Assembly (Not to Scale)

(Tiré de BROWN, E.R., et autres, *Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures Volume IV*, National Cooperative Highway research Program, Transportation Research Board, National Research Council, National Center for Asphalt Technology Auburn University, juillet 1998)

ANNEXE 11

Critères de formulation des enrobés SMA à la presse Marshall

Critères de formulation des enrobés SMA à la presse Marshall

Property	Requirement
Air Voids, %	4,0 (Note 2)
VMA, %	17 min.
VCA _{MIX} ² , %	Less than VCA _{DRC} ²
Stability, N ¹	6200 min.
TSR, %	70 min.
Draindown @ Production Temperature, %	0,30 max.

Note 1

Successful SMA mixtures have been designed with Marshall Stability values below 6200 Newtons, therefore, this requirement can be waived based on experience.

Note 2

VCA_{MIX} and VCA_{DRC} are defined in the, Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA).

(Adapté de Brown, E.R. et coll, 1998)

ANNEXE 12

Description du « Asphalt Pavement Analyzer (APA) »

Description du « Asphalt Pavement Analyzer (APA) »

L'« Asphalt Pavement Analyzer (APA) » est un appareil (Figure 12A) de contrôle multifonctionnel à charge (LWT : Loaded Wheel Tester) pour usage en laboratoire. Cet appareil évalue le pourcentage des déformations permanentes (ornières) induites, dans la trajectoire d'une roue, à des éprouvettes soumises à une charge répétitive.

Cet appareil peut tester jusqu'à 3 éprouvettes rectangulaires (75 mm X 125 mm X 300 mm) ou 6 éprouvettes cylindriques (150 mm Ø X 75 mm) à la fois.

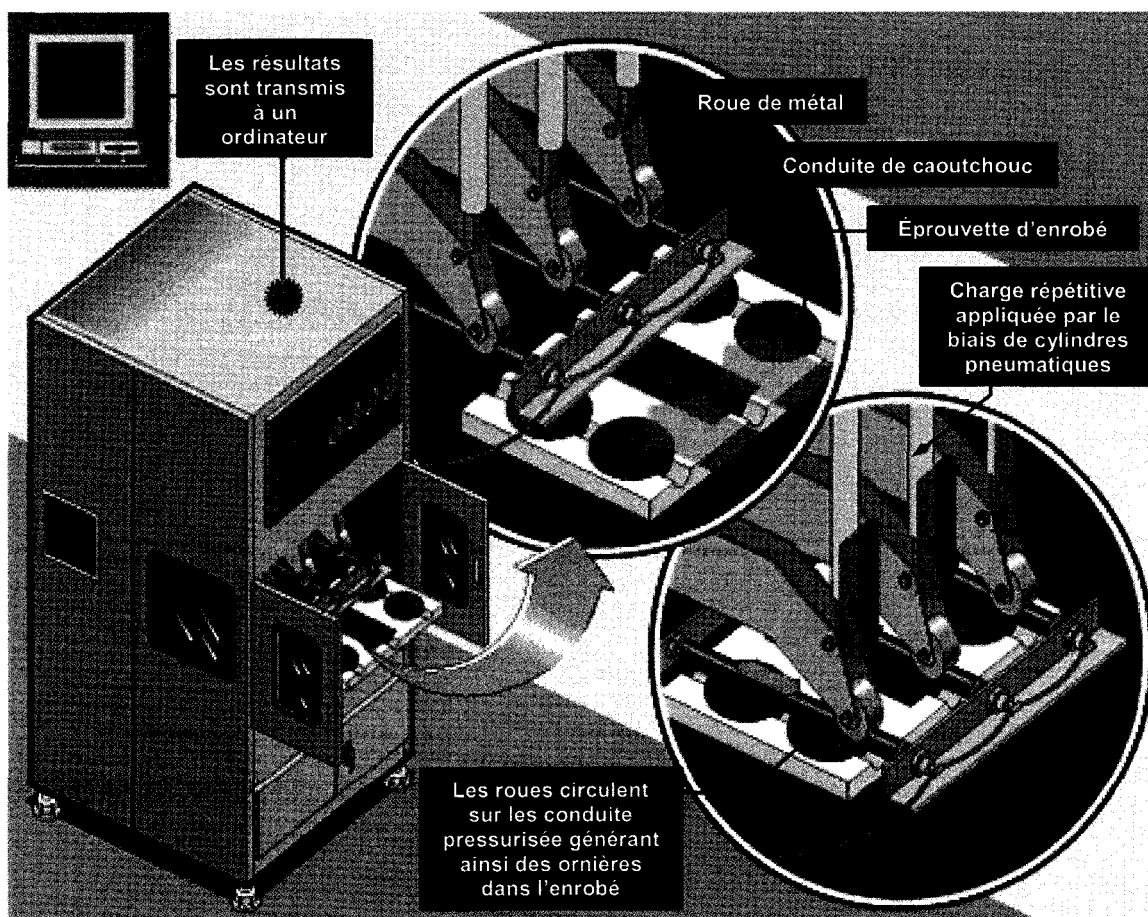


Figure 12A Illustration du « Asphalt Pavement Analyzer (APA) » (source Asphalt Contractor)

L'essai peut être conduit à plusieurs températures variant de 5 à 70°C ainsi que selon des conditions sèches ou humides.

Il s'agit d'un appareil qui simule les conditions réelles soumises à la chaussée. Son principe consiste à solliciter l'éprouvette à l'aide d'une roue d'acier qui circule sur une conduite pressurisée (variant de 690 à 827 kPa) en caoutchouc. Cette conduite simule l'effet des pneumatiques à haute pression et demeure en contact avec l'éprouvette tout au long de l'essai. Seulement la roue d'acier effectue des mouvements des va-et-vient sur une période de 8 000 cycles. Cette action fait en sorte de générer des déformations sur l'éprouvettes (ornières). Chaque montage est indépendant l'un de l'autre puisque chaque conduite de caoutchouc est sollicitée par une roue d'acier différente. La force appliquée peut s'élever à 113 kg et la pression de contact jusqu'à 827 kPa.

Cet appareil permet finalement de générer un rapport informatique qui analyse les taux de déformations tout au long des 8 000 cycles d'essais.

ANNEXE 13

Fiche technique du bitume ABL-2

Fiche technique du bitume ABL-2

Viscosité	
60°C (poise)	1097
135°C (poise)	338
Pénétration (0,1 mm)	
25°C, 100 g, 5 s	169
4°C, 100 g, 5 s	12
Ductilité (cm)	
4°C, 1cm/cm	150
« Softening R&B » °C	41,1
Asphaltènes (n-heptane) (%)	17,0
Asphaltènes (iso-octane) (%)	
Aromatiques polaires	47,6
Aromatiques naphènes	24,9
Saturé	8,6
C %	82,30
H %	10,14
N %	0,50
S %	6,28

(Adapté de Manfred N., Partl, 1995)

ANNEXE 14

N_{design} originaux de la méthode de formulation Superpave

Ndesign originaux de la méthode de formulation Superpave

Critères de sélection originaux du N_{design} Superpave (Source Brown et coll. 2001)

Niveau de circulation de design en ÉCAS (millions) sur 20 ans	Moyenne des 7 jours dont la température est la plus chaude											
	Moins que 39 °C			39 °C – 40 °C			41 °C – 42 °C			43 °C – 44 °C		
	N _i	N _d	N _m	N _i	N _d	N _m	N _i	N _d	N _m	N _i	N _d	N _m
Moins que 0,3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0,3 – 1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1 – 3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3 – 10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10 – 30	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
30 – 100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
Plus grand que 100	9	142	233	10	158	262	10	165	275	10	172	288

ANNEXE 15

Données de formulation sur différents SMA à travers le monde

Données de formulation sur différents SMA à travers le monde

Pays / Style	Type de SMA	Bitume Absorbé	V _b MIN	V _b MAX	V _{bs} estimé MAX	V _{bs} estimé MIN	V _{bs} MOY	T _{MAX} °C	T _{MOY} °C	T _{MIN} °C	Pluie L/m ²
SMA BSM	SMA 10	0,46	5,66	-	14,1	-	14,5	36,1	5,9	-37	1029
MédiFlex	MTQ E.S.	0,46	5,29	5,98	13,3	14,8	14,1	36,1	4,0	-37	1029
SMA #1	1 ^{er} SMA	0,46	6,98	-	16,9	-	16,9	38,3	8,5	-26	583
Allemagne	SMA 0/11 S	0,46	5,98	-	14,8	-	14,8	38,3	8,5	-26	583
Rép. Tchech	SMA 0/11	0,46	5,98	6,48	14,8	15,8	15,3	35	7,9	-28	501
France	BBM 0/11	0,46	4,79	-	12,2	-	12,2	36	10,7	-19	975
Hongrie	ZMA 8	0,46	5,59	6,48	14,0	15,8	14,9	38,8	10,9	-19	596
Italie	SMA 0/10	0,46	4,69	6,03	12,0	14,9	13,5	36,6	12,5	-18	632
Pays-Bas	0/11 Type 2HL	0,46	6,02	-	14,9	-	14,9	35	10,0	-20	645
Norvège	SKA 11	0,46	5,79	-	14,4	-	14,4	30	4,2	-27	885
Portugal	0/9.5	0,46	4,50	-	11,6	-	11,6	39	16,0	-2,2	682
Suède	ABS 8	0,46	5,39	7,1	13,5	17,1	15,3	31	7,4	-25	768
Royaume-Uni	10 mm	0,46	5,98	6,98	14,8	16,9	15,8	29,4	9,0	-13	851
Etats-Unis	D10	0,46	5,49	6,48	13,8	15,8	14,8	37,2	9,2	-29	944

Les données calculées sont obtenues suivant un taux de bitume absorbé de 0,46% et selon la méthode de formulation proposée au chapitre 2

(Adapté de EAPA Heavy Duty Surfaces, *The argument for SMA*, 1998)

Données de formulation sur différents SMA à travers le monde

SMA BSM	Tamis (mm)	14	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,08
SMA 10	%P	100	94	33	29	19	14	11	8,9	7
MédiFlex	Tamis (mm)	14	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,08
MTQ E.S.	%P	100	70-85	28-33	28-33	21-28	15-22	11-18	9-15	7-10
Allemagne	Tamis (mm)	11,2	8	5	2				0,09	
SMA 0/11 S	%P	≤10	≥40	60-70	75-80				9-13	
Rép. Tchec	Tamis (mm)	11	8	4	2				0,09	
SMA 0/11	%P	90-100	45-60	26-38	20-26				10-13	
France	Tamis (mm)	10	6,3	4	2					0,08
BBM 0/11	%P	97	35-53	53	35-38					8-11
Hongrie	Tamis (mm)	12,5	8	5	2		0,63	0,2	0,09	
ZMA 8	%P	100	90-100	30-50	20-30		14-24	11-18	8-13	
Italie	Tamis (mm)	15	10	5	2			0,42	0,18	0,075
SMA 0/10	%P	100	80-100	47-64	30-45			12-20	10-16	9-14
Pays-Bas	Tamis (mm)	11,2	8	5,6	2					0,063
0/11 Type 2HL	%P	≤6	40-55	60-75	72-82					6-10
Norvège	Tamis (mm)	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,075
SKA 11	%P	80-100	47-64	30-45	20-32	16-27	14-24	12-20	10-16	9-14
Portugal	Tamis (mm)	9,5		4,75				2		,075
0/9.5	%P	90-80		42-30				32-22		7-12
Suède	Tamis (mm)	11,2	8	4				2		0,075
ABS 8	%P	98-100	85-99	28-49				20-30		8-13
Royaume-Uni	Tamis (mm)	10	6,3					2,36		0,075
10 mm	%P	90-100	30-50					22-32		8-13
Etats-Unis	Tamis (mm)	14	11,2	6,3						,063
D10	%P	100	90-100	30-50						8-12

(Adapté de EAPA Heavy Duty Surfaces, *The argument for SMA*, 1998)

ANNEXE 16

**Attestation de conformité du bitume PG 58-28 utilisé dans la confection des
enrobés SMA**



11 701, rue Sherbrooke est
Montréal (Qc), H1B 1C3
Téléphone : 514 640-8160
Télécopieur : 514 640-8326

ATTESTATION DE CONFORMITÉ 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)		
			Minimale	Maximale
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			
Viscosité Brookfield @ 165°C (Pa.s)	0.079	Notes (1) : Températures calculées selon LC 25-007		
T _o (°C)	59.7			
T _b (°C)	-30.1			
Module de rigidité S _o (MPa)	76			
Pente m _o	0.440			
TBA moy.	46.1			
ESSAIS DE CONTRÔLE				
Date du contrôle	2003/07/26			
Recouvrance d'élasticité @ 10°C (%)				
T _o (°C)	60.0			
Module de rigidité S _o (MPa)	71			
Pente m _o	0.453			
G* / sin (δ) (kPa)	1.30			
Point éclair (°C)	306			
REMARQUES				
Préparé et approuvé par : <i>M. J. Larouche</i> 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 PÉTROCAN)

ANNEXE 17

Fiche technique de la fibre d'amiante utilisée dans la confection des enrobés SMA



Une preuve de notre qualité

**SACS DE 35 KILOS
EN POLYÉTHYLÈNE**

ANALYSE TYPIQUE

AMIANTE CHRYSTOLE

pour : MINISTÈRE DES TRANSPORTS (Québec)

GRADE (STANDARD DU QUÉBEC)	7M
DÉSIGNATION LAB	7M-450
* ESSAI STANDARD DU QUÉBEC (oz) :	0.0 – 0.0 – 1.0 – 15.0
ANALYSE PAR TAMIS RO-TAP : (100 g / 30 min) (%)	
6 mailles	0.0
14 mailles	1.0
20 mailles	9.0
28 mailles	23.0
35 mailles	16.0
65 mailles	14.0
- 65 mailles	37.0
ESSAI RAPIDE SURFACE (cm ² / g)	9.000
TENEUR EN SPICULES & GRANULES NON FIBREUX (%)	1.0
VOLUME EN MILIEU AQUEUX (20 g / 2 000 ml / 4 h)	350

* Essai minimum garanti (Association des Mines d'Amiante du Québec)

Les autres résultats ci-dessus sont obtenus d'après les méthodes d'essais spécifiques par l'association des Mines d'Amiante du Québec et sont sujets à des changements dans avis dus aux variations normales d'usage.

AVIS :

Contient des fibres d'amiante – Éviter de créer des poussières
L'inhalation d'amiante peut provoquer des dommages corporels graves
Fumer augmente considérablement le risque de dommages corporels graves

DATE : 13 août 2001

(Source Laboratoire Chrysotile Inc..)

ANNEXE 18

**Fiche signalétique de la fibre d'amiante utilisée dans la confection des enrobés
SMA**



Une preuve de notre qualité

FICHE SIGNALÉTIQUE		
PARTIE I – IDENTIFICATION		
Nom : amiante chrysotile	Famille chimique : silicates hydratés et fibreux	
Synonyme : amiante blanc	Formule chimique : $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	P.M. : - 283
Classification : 9-UN 2590-PG III-RQ	No U.S. – EPA : A-152-4672	No CEE : 650-013-00-6
PARTIE II – INGRÉDIENTS DANGEREUX		
Amiante chrysotile (90-95%)	TVL : 0.1-2.0 f / ml (suivant la norme en vigueur)	
No du registre C.A.S. : 12001-29-5	No LIS : 1332-21-4	
PARTIE III – CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES		
État physique : solide	Apparence : fibre blanche	Odeur : aucune
Poids spécifique : 2.4 – 2.6	Solubilité dans l'eau : insoluble	pH ~ 10
Point d'ébullition : inapplicable	Point de fusion : se déshydrate au-dessus de 580°C	
Tension de vapeur : inapplicable	Volatile : inapplicable	Pourcentage volatil : inapplicable
PARTIE IV – RISQUE D'INCENDIE OU D'EXPLOSION		
Inflammabilité : ininflammable	Explosivité : aucun danger d'explosion	
Point d'éclair : inapplicable	Comburant : non comburant	
PARTIE V - RÉACTIVITÉ		
Stabilité : stable	Incompatibilité dangereuse : aucune	
Dégradation dangereuse ou produit secondaire : aucun	Polymérisation : inapplicable	
PARTIE VI – PROPRIÉTÉS TOXICOLOGIQUES		
Voies d'accès : voies respiratoires		
Effets aigus : aucun effet immédiat, même à une surexposition		
Effets chroniques : une surexposition prolongée peut provoquer l'amiantose, le cancer du poumon et le mésothéliome de la plèvre ou des péricardes.		
Toxicité : répertorié comme un cancérigène ou un cancérigène potentiel / NTP-OSHA-IARC		
Ingestion : aucun risque prouvé	Contact avec les yeux : peut causer de l'abrasion	
Contact avec la peau : les poussières inertes ne s'absorbent pas. Enlever les échardes.		

(Source Laboratoire Chrysotile Inc..)

ANNEXE 19

Description des calculs pour l'obtention du mélange SMA_{ESSAI}

Description des calculs pour l'obtention du mélange SMA_{ESSAI}

Densité				
Bitume	=	1,025		Densité déterminée par le fabricant et/ou distributeur
Filler d'appoint	=	2,640		
Pierre 0-5	=	2,635		
Pierre 5-10	=	2,645		
Fibre d'amiante	=	2,500		
Masse pilonnée à sec	=	1484	kg/m ³	Déterminer selon la norme BNQ2560-060
% de filler initial	=	8	%	% de départ
% de fibre initial	=	1	%	% de départ
Air				
% d'air initial	=	20	%	% d'air visé entre 2 et 3 %
Volume d'air	=	200	L	
Bitume				
Volume de bitume effectif	=	15,6	%	Le taux d'absorption est approximatif
Absorption du bitume	=	0,2	%	
Total volume bitume	=	125	L	
Masse de bitume	=	128	kg/m ³	
Volume de Pierre 5-10	=	561	L	$M_{\text{PIERRE 5-10}}/d_{\text{PIERRE 5-10}}$
Masse de granulat				
Pierre 5-10 mm	=	1484	kg/m ³	Selon la théorie de Powers
Pierre 0-5 mm	=	0,05	M_{Pierre}	
(fonction du niveau d'interférence souhaité)				
Filler	=	0,08	M_{Granulat}	
Fibre d'amiante	=	0,01	M_{Granulat}	
Masse de granulat	=	1713	kg/m ³	M_{Totale} de granulats
Masse				
Filler d'appoint	=	137	kg	Volume _x *d _x
Pierre 0-5	=	75	kg	
Pierre 5-10	=	1484	kg	
Fibre d'amiante	=	17	kg	
Masse de granulats	=	1713	kg	
Masse de bitume	=	128	kg	$V_{\text{BITUME}}/d_{\text{BITUME}}$
Masse totale	=	1841	kg	Somme des constituants

ANNEXE 20

Calculs effectués pour l'obtention des facteurs de correction 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		
Np. d'échantillon	1	2	3
No. de la briquettes	30	30	3
% bitume initial	6,63	6,63	6,67
Poids Panier	3086,2	3085,8	3084,8
Poids Échantillon initial	1011,1	1010,1	1118,0
Poids Panier + Échantillon	4097,3	4095,9	4202,8
Poids Panier + Échantillon à 480°C	4024,1	4022,8	4121,3
Poids Panier + Échantillon à 125°C	4024,4	4023,2	4121,8
Poids Échantillon final	938,1	937,4	1037
% de bitume à 480°C (four)	7,24	7,24	7,29
% de bitume à 125°C (calcul)	7,21	7,20	7,25
Calcul du Facteur de correction			
% bitume à 125°C - % bitume initial	0,58	0,57	0,58
Moyenne	0,574		
Facteur de correction	0,574		

Facteur de correction induit par les granulats

Mélange Granulats 2003-10-08		
Tamis	% P _{avant}	% P _{après}
10	90,3	90,6
5	29,1	28,6
2,5	20,3	20
1,25	18,6	18,4
0,63	17,6	17,4
0,315	16,6	16,3
0,160	15,7	14,7
0,080	11	12,5

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	=	0,574
Facteur de correction GRANULATS sans bitume	=	0,295
Facteur de correction GRANULATS + FIBRES sans bitume	=	0,346
Facteur de correction TOTAL	=	0,574
Facteur de correction pour BITUME SEULEMENT	=	0,228

ANNEXE 21

Fiche technique de l'enrobé SMA-10₅₅ SHER USINE

FORMULE DE MÉLANGE Enrobé bitumineux	Type de mélange SMA 0/10mm
--	-------------------------------

Granulats froids			Granularité (pourcentage passant)											Utilisé	Densité des granulats		Absorption en eau des granulats
Classe granulaire	P-Pierre Type	C-Criblure S-Sable F-Fine Provenance (Code produit)	Tamis en mm							Tamis en µm					Brute (sec)	Apparents	
			28,0	20,0	14,0	10,0	5,0	2,5	1,25	630	315	180	80				
5-10 mm	P	Carrière W.		100	100	91	12	3	2	2	2	2	1,3	79,7%	2,645	2,687	0,59
0-5 mm	C	Carrière W.		100	100	100	97	68	45	33	24	17	12,0	5,2%	2,635	2,700	0,92
0-5 mm	S			100	100	100	97	91	83	70	46	15	4,2	0,0%	2,656	2,730	1,02
0-1,25 mm	A	Lab Chrysotile inc., Black Lake (\$\$\$)		100	100	100	100	100	96	73	41	30	24	1,3%	2,700	2,895	2,50
Filler	F	Filler Usine		100	100	100	100	100	100	100	100	100	69,9	13,8%	2,640		
Granularité du combiné				100	100	93	30	21	19	18	17	17	11,6	100%	2,644		

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	%	%	%	N	mm	Brute (60)	Maximale	
	100	100	93	30	21	19	18	17	17	11,6	6,90	8,04	3,6	18,2	80,4				2,323	2,409	0,51
Spécifications	Max.																				
	Min.																				

Zone de restriction recommandée

Caractéristiques supplémentaires				Granulat bitumineux recyclé			Résistance à l'ornièrage (%)		Spéc.
Classe de performance de bitume	PG 58-28	Surface spécifique totale (m ² /kg)	8,44	Pourcentage de bitume	-	1 000 cycles	5,62	≤ 10	
Classe de bitume utilisée en formulation	PG 58-28	Total granulométrique	426	Vides à la P.C.G. (%)	Spéc.	3 000 cycles	6,19	≤ 20	
Masse volumique du bitume utilisé (g/cm ³)	1,017	Rapport bitume / total granulométrique	1,62	10 girations	15,2	≥ 11,0	10 000 cycles	7,34	-
Densité effective des granulats	2,679	Compacité anticipée		60 girations	6,7	4-7	30 000 cycles	8,22	-
Pourcentage de bitume effectif (%)	6,43	Facteur de correction pour le bitume (%)	0,20	100 girations	4,7	-	Ressuage	Aucun	Aucun
Volume de bitume effectif à 0% de vide (%)	15,2			200 girations	2,9	≥ 2,0	Tanue à l'eau (%)		Spéc.
Remarque:				Ressuage à 200	Aucun	Stabilité retenue		≥ 70	

ANNEXE 22

Fiche technique de l'enrobé EGA-10₅₅ SHER USINE

FORMULE DE MÉLANGE Enrobé bitumineux	Type de mélange EGA 10
--	---------------------------

Granulats froids			Granularité (pourcentage passant)											Utilisé	Densité des granulats		Absorption en eau des granulats
Classe granulaire	P-Pierre C-Criblure S-Sable F-Fine	Provenance (Code produit)	Tamis en mm							Tamis en µm					Brute (sec)	Apparente	
			28,0	20,0	14,0	10,0	5,0	2,5	1,25	630	315	160	80				
5-10 mm	P	Carrière W.		100	100	91	12	3	2	2	2	2	1,3	57,7%	2,635	2,682	0,66
0-5 mm	C	Carrière W.		100	100	100	97	68	45	33	24	17	12,0	31,0%	2,642	2,699	0,80
0-5 mm	S			100	100	100	97	91	83	70	46	15	4,2	10,0%	2,643	2,711	0,95
0-1,25 mm	A	Lab Chrysotile inc., Black Lake (\$\$\$)		100	100	100	100	100	96	73	41	30	24	1,3%	2,700	2,895	2,50
Granularité du combiné				100	100	95	48	33	25	19	14	8	5,2	100%	2,639	2,693	0,76

Formule	Tamis en mm							Tamis en µm				Bitume %	F.B.E. µm	Vides %	V.A.M. %	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	80								Brute (60)	Maximale	
		100	100	91	46	32	24	19	14	8	4,3	6,40	12,60	1,5	15,6	90,5	9750	5,0	2,379	2,415	0,36
Spécifications	Max.			100	50	46,1	36,7	26,8	18,1		10,0	6,60									
	Min.		100	90	40		30,7	22,8		4,0	6,40										

Zone de restriction recommandée

Caractéristiques supplémentaires				Granulat bitumineux recyclé			Résistance à l'ornièrage (%)		Spéc.	
Classe de performance de bitume	PG 58-28	Surface spécifique totale (m ² /kg)	5,05	Pourcentage de bitume	-	1 000 cycles	4,10	≤ 10		
Classe de bitume utilisée en formulation	PG 58-28	Total granulométrique	438	Vides à la P.C.G. (%)	Spéc.	3 000 cycles	7,20	≤ 20		
Masse volumique du bitume utilisé (g/cm ³)	1,017	Rapport bitume / total granulométrique	1,46	10 girations	14,9 ≥ 11,0	10 000 cycles	10,60	-		
Densité effective des granulats	2,664	Compacité anticipée	6,19	80 girations	-	30 000 cycles	-	-		
Pourcentage de bitume effectif (%)	6,06	Facteur de correction pour le bitume (%)	0,20	100 girations	6,1 4-7	Ressuage	-	Aucun		
Volume de bitume effectif à 0% de vide (%)	14,3			200 girations	3,4 ≥ 2,0	Tenue à l'eau (%)		Spéc.		
Remarque:				Ressuage à 200	Aucun	Aucun	Stabilité retenue	76	≥ 70	

ANNEXE 23

Fiche technique de l'enrobé ESG-10_{USINE}

FORMULE DE MÉLANGE Enrobé bitumineux	Type de mélange ESG-10
--	---------------------------

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)	Apparente		
	Type	Provenance (Code produit)		28,0	20,0	14,0	10,0	5,0	2,5	1,25	630	315	160					80
5-10 mm	P	Carrière S.		100	100	100	88	11	1	1	1	1	1	0,7	43,0%	2,813	2,647	0,42
0-5 mm	C	Carrière S.		100	100	100	100	94	88	47	35	26	19	14,6	37,0%	2,691	2,752	0,83
0-5 mm	C			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. µm	Vides %	V.A.M. %	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	80								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
Spécifications	Max.			100	65	46,1	36,7	26,8	18,1		10,0	5,20									
	Min.			92	50		30,7	22,8		4,0	5,00										

Zone de restriction recommandée

Caractéristiques supplémentaires				Granulat bitumineux recyclé			Résistance à l'ornièrage (%)		Spéc.
Classe de performance de bitume	PG 70-28	Surface spécifique totale (m ² /kg)	5,71	Pourcentage de bitume	-	1 000 cycles	2,50	≤ 10	
Classe de bitume utilisée en formulation	PG 70-28	Feuil 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	2,789	Compactibilité anticipé	0,80	80 girations	5,2	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

ANNEXE 24

Valeurs de compaction brutes des enrobés SMA et EGA-10 recueillies en chantier

Valeurs de compaction brutes des enrobés EGA-10 et SMA recueillies en chantier

Section EGA-10

Nb Passe	EGA-10 (3+785)			EGA-10 (3+906)		
	T.C.	T.C.CORRIGÉ	T _{IR}	T.C.	T.C.CORRIGÉ	T _{IR}
1	81,0	86,3	127	84,7	90,0	100
2	85,4	90,7	121	86,6	91,9	97
3	88,4	93,7	122	90,4	95,7	80
4	92,3	97,6	105	90,2	95,5	80
5	93,2	98,5	104	92,2	97,5	67
6	-	-	-	92,5	97,8	65
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
MAX	93,2	98,5	127,0	92,5	97,8	100,0
MIN	81,0	86,3	104,0	84,7	90,0	65,0
MOY	88,1	93,4	115,8	89,4	94,7	81,5

Section SMA Partie 1

Nb Passe	SMA ₅₅ (3+516)			SMA ₅₅ (3+545)		
	T.C.	T.C.CORRIGÉ	T _{IR}	T.C.	T.C.CORRIGÉ	T _{IR}
1	76,7	81,9	118	77,9	83,2	122
2	84,1	89,5	116	84,5	89,8	112
3	86,6	91,9	-	87,2	92,5	84
4	88,8	94,1	-	89,5	94,8	83
5	88,8	94,1	111	90,6	95,9	89
6	88,6	94,0	-	91,6	97,0	-
7	91,7	97,0	94	93,6	99,0	79
8	92,7	98,0	n/d	92,7	98,0	80
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
MAX	92,7	98,0	118,0	93,6	99,0	122,0
MIN	76,7	81,9	94,0	77,9	83,2	79,0
MOY	87,3	92,6	109,8	88,5	93,8	92,7

Section SMA Partie 2

Nb Passe	SMA ₅₅ (3+608)			SMA ₅₅ (3+651)		
	T.C.	T.C.CORRIGÉ	T _{IR}	T.C.	T.C.CORRIGÉ	T _{IR}
1				83,5	88,8	80
2	82,7	88,1	97	86,5	91,8	80
3	86,6	91,9	85	86,5	91,8	75
4	87,8	93,1	73	90,3	95,6	65
5	89,4	94,7	89	87,8	93,1	63
6	90,2	95,5	74	92,0	97,3	65
7	89,0	94,3	68	89,1	94,4	65
8	89,7	95	65	92,9	98,2	65
9	90,3	95,6	-	91,5	96,8	-
10	91,2	96,5	50	92,8	98,1	51
MAX	91,2	96,5	97,0	92,9	98,2	80,0
MIN	82,7	88,1	50,0	83,5	88,8	51,0
MOY	88,5	93,9	75,1	89,3	94,6	67,7

Calculs du Facteur de correction pour la compaction

Carotte	#1	#2	#3
Chainage	3+649	3+600	3+550
Densité brute obtenue en laboratoire	2335	2243	2342
F.C. eau à 25°C	0,997044	0,997044	0,997044
Valeur	2342	2250	2349
Dmm	2,402	2,402	2,402
Valeur Mesurés en chantier			
M1	2259	2124	2188
M2	2196	2111	2193
M3	2216	2144	2200
M4	2218	2134	2220
M5	2239	2191	2155
Moyenne	2226	2141	2191
Différence Chantier - Laboratoire			
	116	109	158
Moyenne des 3 essais		128	

ANNEXE 25

Graphiques représentant les résultats des différents essais effectués sur les enrobés SMA à différents dosages en V_{be}

Graphiques représentant les résultats des différents essais effectués sur les enrobés SMA à différents dosages en V_{be}

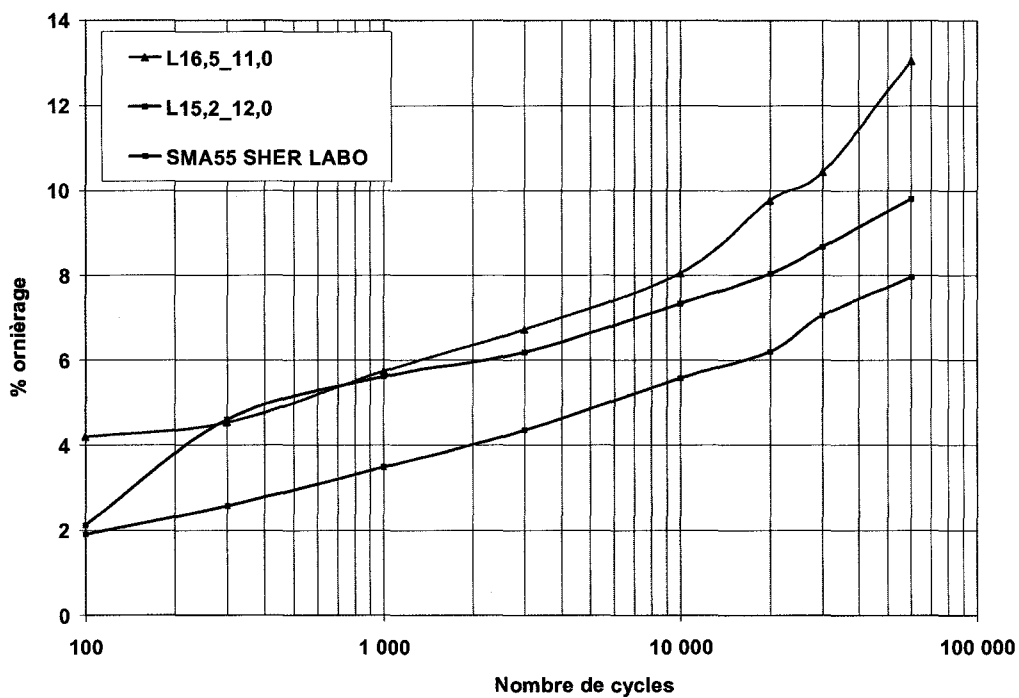


Figure 24A Graphique illustrant la variation du taux d'ornières pour les différents V_{be} sélectionnés

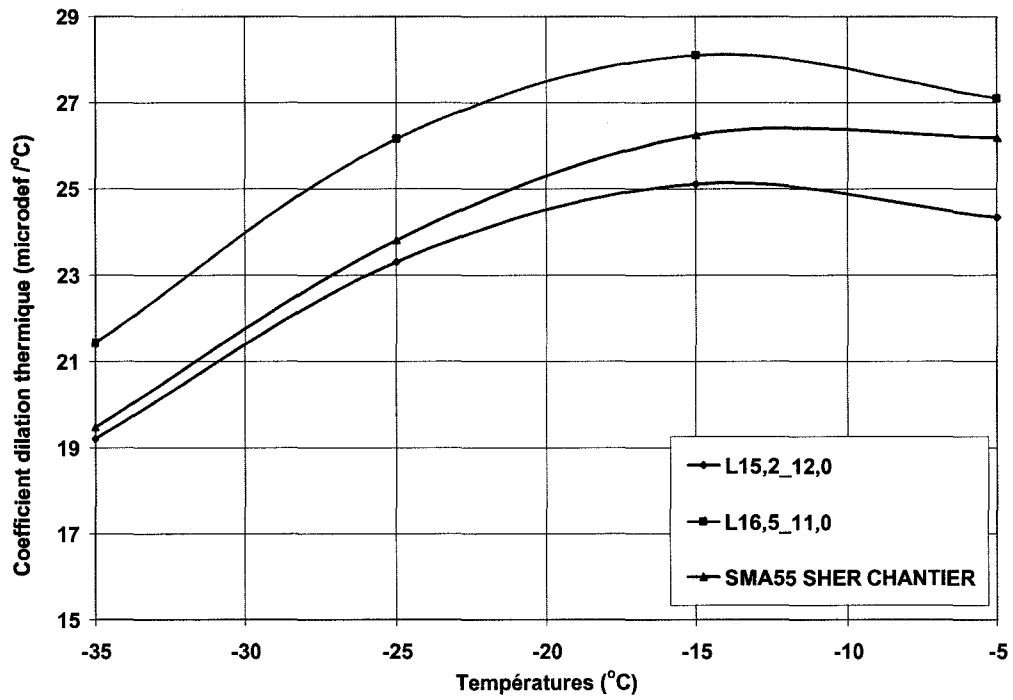


Figure 24B Graphique illustrant les résultats des coefficients de dilatation thermique pour les différents V_{be} sélectionnés

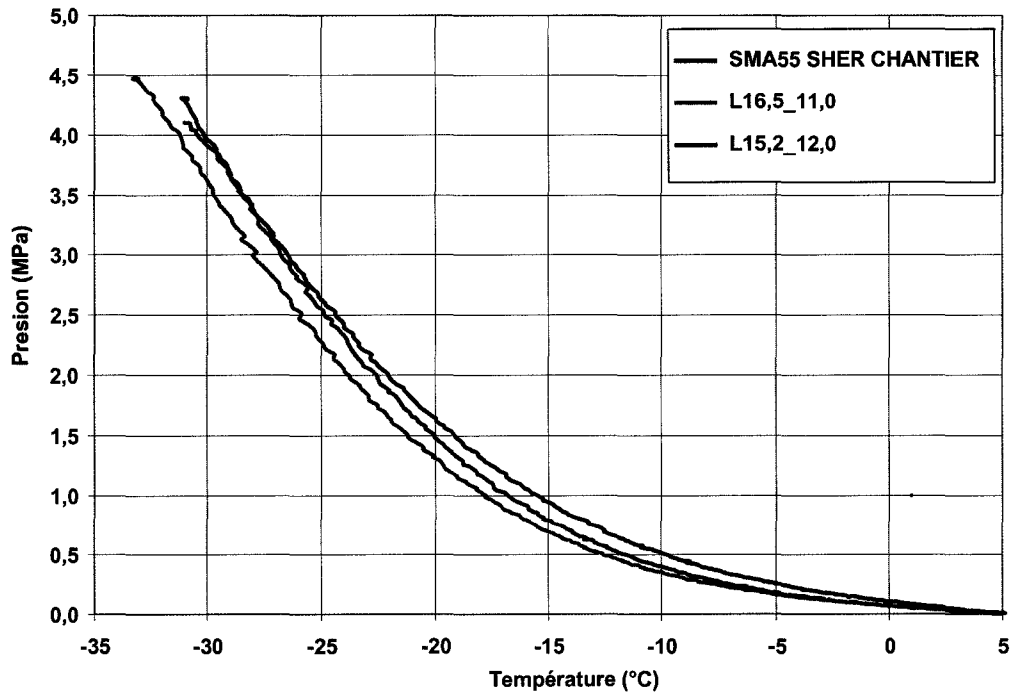


Figure 24C Graphique illustrant les résultats de l'essai TSRST pour les différents V_{be} sélectionnés

BIBLIOGRAPHIE

Aggregates & Roadbuilding, *SMA used for the first time in Niagara Peninsula*, Aggregates & Roadbuilding, 2000, 3.

Alabama Department Of Transportation, *Section 423 Stone Matrix Asphalt (Fiber stabilized asphalt concrete)*, Special Provision No. 01-0170, Alabama Department of Transportation, 2001, 5.

Alternative santé, *Le décibel*, [En ligne]. <http://www.medecines-douces.com/impatient/267mai00/dbdb.htm> (Consulté le 15 avril 2002).

AASHTO : American Association Of State Highway and Transportation Officials. *European asphalt study tour*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1991, p. 69-82.

AASHTO : American Association Of State Highway and Transportation Officials. *Standard test method for thermal stress restrained specimen tensile strength*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2000, p. 350-362. (TP10-93).

Anderson, K., Christison, T. et Johnston, C., *Low temperature pavement performance : an evaluation using C-SHRP test road data*. Ottawa : Transportation Association of Canada, 1999.

Asphalt Contractor, *Site internet pour les entrepreneurs en enrobés bitumineux aux États-Unis*, [En ligne]. <http://www.asphalt.com/HHIW/ptiapa.htm> (Consulté le 11 janvier 2005).

Asphalt Institute, *Superpave Level 1 : Mix Design*, Asphalt Institute Superpave Series No.2 (SP-2), KY, 1995, 119 pages.

Association Québécoise du Transport et des Routes, *Textes des conférences, Colloque/Session de formation, Les enrobés au Québec après la méthode Marshall*, AQTR, Québec, 1996,

Brown, D.C. *SMA : Built for the Long Haul.*, Better Roads, James Informational Media, Inc, 2002, 7 pages.

Brown, E.R., Hanson, D.I., Mallick, R.B., *An evaluation of Superpave gyratory compaction of hot mix asphalt*, NCAT Report No. 98-5, 1998, 22 pages.

Brown, E.R., Haddock, J.E., Mallick, R.B., Lynn, T.A., 1997, Development of a mixture design procedure for stone matrix asphalt (SMA), *Asphalt paving technology*, 66, 1-31.

Brown, E.R., Cooley, L.A., Haddock, J.E., Hughes, C.S., Lynn, T.A., *Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures Volume I-II-III-IV*, National Cooperative Highway research

Program, Transportation Research Board, National Research Council, National Center for Asphalt Technology Auburn University, juillet 1998.

Brown, E.R., *Experience with stone matrix asphalt in the United States*, National Asphalt Pavement Association, NCAT Report No. 93-4, 1992, 33 pages.

Brown, E.R., Buchanan, M.S., *Literature Review : Verification of Gyration Levels in the Superpave Ndesign Table*, NCHRP Web Document 34 (Project D9-9[1]) : Contractor's Final Report, National Cooperative Highway research Program, Transportation Research Board and National Research Council, 2001, 81 pages.

Brown, E.R., Mallick, R.B., Haddock, J.E., Bukowski, J., *Performance of stone matrix asphalt (SMA) mixtures in United States*, National Center for Asphalt Technology of Auburn University, NCAT Report No. 97-1, 1997, 28 pages.

Brown, E.R., Kandhal, P.S., Zhang, J., *Performance testing for hot mix asphalt (executive summary)*, National Center for Asphalt Technology of Auburn University, NCAT Report No. 01-05A, 2001, 17 pages.

Bushmeyer, B. *The Quest for Long-Life Asphalt Pavement., Better Roads*, James Informational Media, Inc, 2002, 10 pages.

Carter, A., *Rhéologie en petite déformation des enrobés bitumineux et mesure de leur résistance à basse température à partir de l'essai TSRST*, Mémoire, École de technologie supérieure, 2002, 213 pages.

Cooley, L.A. et Brown, E.R., *Potential of using stone matrix asphalt (SMA) for thin overlays*, National Center for Asphalt Technology of Auburn University, NCAT Report No. 2003-01, 2003, 14 pages.

C-SHRP Programme stratégique de recherche routière du Canada, Superpave 2000 – Pour le nouveau millénaire, des normes améliorées, *Bulletin technique C-SHRP* , No. 17, 1999, 3 pages.

Di Benedetto, H. et Corté, J.F., *Matériaux routiers bitumineux 1 Descriptions et propriétés des constituants*, Germes Science Publications, Lavoisier, Paris, 2004, 234 pages.

Di Benedetto, H. et de La Roche, C., State of the art on stiffness modulus and fatigue bituminous mixtures. Bituminous binders and mixtures: State of the art and interlaboratory tests on mechanical behaviour and mix design. E&FN Spon. 1998, p 137-180.

European Asphalt Pavement Association, *Heavy duty surfaces – The argument for SMA*, EAPA, 1998, 40 pages.

Kennepohl, G.J. et Davidson, J.K., Introduction of stone matrix asphalts (SMA) in Ontario, *Asphalt paving technology*, Vol. 61, Caroline du Sud, 1992, p. 517-535.

Kuennen, T., Stone Matrix Asphalt is Catching on in the U.S., *Better Roads*, James Informational Media, Inc, 2003, 8 pages.

Harman, T., Bukowski, J.R., Moutier, F., Huber, G et McGennis, R., *The History and Future Challenges Of Giratory Compaction 1939 to 2001*, Annual Meeting of the Transportation Research Board 2002, 2002, 23 pages.

Lamothe, S., *Enrobé grenu : Influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-orniérage*, Mémoire, École de technologie supérieure, 2003, 167 pages.

Langlois, P., *Notes de cours GCI 718 Enrobés bitumineux*, Université de Sherbrooke, hiver 2004, Recueil des notes de cours.

Météo France, *Données météorologiques à travers le monde*, [En ligne]. <http://www.ephemeride.com/meteo.jsp;jsessionid=BDBD378DDBB64434C78355E6E3361791?seid=BDBD378DDBB64434C78355E6E3361791> (Consulté le 01 novembre 2004).

MTQ : Ministère des transports du Québec, *Devis SMA route 108*, Devis technique de construction, 2004, 7 pages.

MTQ : Ministère des transports du Québec, *Mesure en laboratoire de la résistance au retrait thermique des enrobés*, Bulletin d'information technique Vol. 9, No. 4, Québec, 2004, 2 pages.

MTQ : Ministère des transports du Québec, *Les contrats de performance au MTQ : Bilan 1994-1999*, Bulletin d'information technique Vol. 5, No. 7, Québec, juillet 2000, 2 pages.

MTQ : Ministère des transports du Québec, *Méthode de formulation LC pour les enrobés*, Bulletin d'information technique Vol. 2, No. 12, Québec, décembre 1997, 2 pages.

MTQ : Ministère des transports du Québec, *Normes relatives aux matériaux*, [En ligne]. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/materiaux/fiches.asp> (Consulté le 15 février 2003).

MTQ : Ministère des transports du Québec, *Normes relatives aux enrobés bitumineux*, [En ligne]. <http://publicationsduquebec.gouv.qc.ca/transports/html/7c4.html> (Consulté le 23 mars 2003).

Moutier, F., Échange au sujet de la presse à cisaillement giratoire, Adresse du destinataire : Francis.Moutier@lcpc.fr, 26 novembre 2003.

Moutier, F., Ballie, M., Delorme, J.L. et Hiernaux, R., Formulation des enrobés – Bilan des essais à la presse à cisaillement giratoire (PCG), *Bulletin liaison laboratoire Ponts et Chaussées*, No. 170, France, 1990 référence 3486, p. 13-21.

Moutier, F., Réflexions à propos d'un essai de simulation de l'aptitude au compactage d'un enrobé : L'essai à la presse à cisaillement giratoire, *Bulletin liaison laboratoire Ponts et Chaussées*, No. 175 Notes et informations techniques, France, 1991 référence 3609, p. 93-97.

Moutier, F., Préviation de la compactabilité des enrobés bitumineux à l'aide de la presse à cisaillement giratoire (PCG), *Bulletin liaison laboratoire Ponts et Chaussées*, No. 121, France, 1982 référence 2472, p. 29-40.

Moutier, F., Modélisation des résultats de la presse à cisaillement giratoire – Réflexions à propos du seuil ultime de compactage, *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 1996 E&E.4.057, 13 pages.

Moutier, F., Utilisations et possibilités de la presse à cisaillement giratoire), *Bulletin liaison laboratoire Ponts et Chaussées spécial V*, France, 1977, p. 173-180.

Partl, M. N., Vinson, T.S. et Hicks, R.G., Experimental study on mechanical properties of stone mastic asphalt, *Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche, Transportation Research Institute, Oregon State University*, Report No. 113/8 (EMPA No.FE 155'176), 1995, 158 pages.

Perraton, D. *CTN-356: Sciences des matériaux*, Notes de cours, Université du Québec, École de technologie supérieure, Département de génie de la construction, décembre 2004.

Perraton, D. Baaj, H., Di Benedetto, H. et Paradis, M., *Évaluation de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux fondée sur l'évolution de l'endommagement du matériau en cours d'essai : aspects fondamentaux et application à l'enrobé à matrice de pierre*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 30, No. 5, octobre 2003, p. 902-913.

Proteau, M., Paquin, Y., *Analyse de performance de la résistance à l'orniérage de différents bitumes purs et modifiés par ajout de polymères*, Entreprise DJL, 35^{ème} Congrès de l'A.Q.T.R., 2000

Richardson, J.T.G., *Stone mastic asphalt in the UK*, SCI Lecture papers series, Society of Chemical Industry, United Kingdom, 1999, 10 pages.

Road and Traffic authority NSW, *RTA QA Specification R121 Stone mastic asphalt*, Road and Traffic authority NSW, New South Wales, Édition No. 1 2003, 51 pages.

Roberts, F. L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D-Y. et Kennedy, T.W., *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*, NAPA Education Foundation, Second Edition, Maryland, 1996, 585 pages.

Schmiedlin, R.B., *Stone matrix asphalt, the Wisconsin experience*, Transportation Research Record #1616, National Research Council, 1998, p. 34-41.

Schmiedlin, R.B. et Bishoff, D.L., *Stone matrix asphalt , the Wisconsin experience*, WisDOT Highway Research Study #91-07, Final Report WI/SPR-02-02, Wisconsin Department of Transportation, Wisconsin, 2002, 28 pages.

Skok, E., Johnson, E. et Turk, A., *Asphalt Pavement Analyzer (APA) Evaluation*, MINDOT Office of Research Services Report MN/RC 2003-02, Final Report, Minnesota Department of Transportation, Minnesota, 2002, 85 pages.

Tremblay, D., *Influence des différents paramètres de formulation et optimisation des enrobés à matrice de pierre*, Mémoire, École de technologie supérieure, 2001, 145 pages.

Watson, D.E., *Updated review of stone matrix asphalt and Superpave® projects*, Transportation Research Record, No. 1832, 03-4135, 2003, p. 217-223.

VIATOP, *Stone Mastic Asphalt The Name for Modern Roads*, [En ligne]. <http://www.sma-viatop.com> (Consulté le 15 avril 2002).

Washington Asphalt Pavement Association, [En ligne]. http://www.asphaltwa.com/wapa_web/modules/05_mix_design/05_hveem.htm (Consulté le 5 janvier 2005).

Washington State Department of Transportation, [En ligne]. http://hotmix.ce.washington.edu/wsdot_web/Modules/05_mix_design/05-3_body.htm#stabilometer (Consulté le 5 janvier 2005).

WSDOT - Washington State Department of Transportation, *Stone matrix asphalt SR-524, 64th avenue West to I-5 MP 3.30 to MP 4.88, Post Construction Report*, Washington State Transportation Department Commission, WA-RD 504.1, novembre 2000, 60 pages.

Woods, K. B., Berry, D.S. et Goetz, W.H., *Highway engineering handbook*, McGraw-Hill Book Company, inc., première édition, 1960.

Normes consultées

- | | |
|----------------|---|
| AASHTO MP1-98 | Standard Specification for Performance Grades Asphalt Binder, éd. 2000. |
| AASHTO MP2-00 | Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design, éd. 2000. |
| AASHTO TP10-93 | Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength, éd. 2000. |
| AFNOR | Normes series P18... Granulats – Détermination de l'indice des vides Rigden, éd. 1996. |

ASTM E965-96	Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotecture Depth Using a Volumetric Technique, éd. 1996.
BNQ 2300-900	Mélanges bitumineux – Détermination de caractéristiques par le calcul de divers facteurs, éd. 1987.
BNQ 2501-025	Sols – Analyse granulométriques des sols inorganiques, éd. 1987.
BNQ 2560-040	Granulats – Analyse granulométrique par tamisage, éd. 1982.
BNQ 2560-040	Granulats – Détermination de la masse volumique et du pourcentage des vides, éd. 1983.
BNQ 2560-065	Granulats – Détermination de la densité et de l'absorptivité du granulat fin, éd. 1983.
BNQ 2560-067	Granulats – Détermination de la densité et de l'absorptivité du gros granulat, éd. 1983.
BNQ 2560-070	Granulats – Détermination du coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil micro-Deval, éd. 1989.
BNQ 2560-350	Granulats – Détermination par lavage de la quantité de particules passant au tamis de 80µm, éd. 1983.
LC 21-100	Détermination du pourcentage de particules fracturées du gros granulat, éd. 2002.
LC 21-101	Détermination du coefficient d'usure par attrition du granulat fin à l'aide de l'appareil micro-Deval, éd. 2001.
LC 21-265	Détermination du pourcentage de particules « plates » et de particules « allongées », éd. 2001.
LC 21-400	Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles, éd. 2001.
LC 25-007	Évaluation de la température associée à une viscosité, éd. 1998.
LC 26-003	Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire, éd. 2002.
LC 26-004	Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du Laboratoire des chaussées, éd. 2002.
LC 26-006	Détermination de la teneur en bitume par ignition, éd. préliminaire 2003.
LC 26-010	Réduction en laboratoire d'échantillons en vue d'essais, éd. 2002.

LC 26-040	Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés, éd. 2002.
LC 26-045	Détermination de la densité maximale, éd. 2002.
LC 26-400	Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé, norme préliminaire, décembre 2001.
LC 26-410	Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage, norme préliminaire, novembre 2002.
NF P 98-250-2	Préparation des mélanges hydrocarbonés; partie 2 : Compactage des plaques, éd. 1991.
NF P 98-253-1	Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés; partie 1 : Essai d'orniérage, éd. 1991.
Norme 2101	Granulats, éd. 2001.
Norme 4202	Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées, éd. 2003.