

**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
DENIS TREMBLAY**

**INFLUENCE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES
DE FORMULATION ET OPTIMISATION
DES ENROBÉS À MATRICE DE PIERRE**

MONTRÉAL/JUILLET 2001

© Droits réservés de Denis Tremblay

**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURÉ COMPOSÉ DE :**

- **M. Daniel Perraton, directeur de mémoire**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure
- **Mme Michèle St-Jacques, professeur**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure
- **M. Pierre Langlois, responsable secteur enrobés**
Ministère des Transports du Québec

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET UN PUBLIC
LE 20 JUIN 2001
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

INFLUENCE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE FORMULATION ET OPTIMISATION DES ENROBÉS À MATRICE DE PIERRE

Denis Tremblay

SOMMAIRE

L'omiérage est devenu un problème courant sur plusieurs chaussées. L'augmentation du trafic en nombre et en masse est de plus en plus une cause déterminante de la dégradation des pavages en enrobés bitumineux. Les enrobés conventionnels n'arrivent plus toujours à répondre à la tâche. Face à cette problématique, les enrobés à matrice de pierre sont très avantageux. Ils possèdent également d'autres caractéristiques qui les rendent intéressants, comme leur texture superficielle plus grenue.

Cette recherche vise à établir, à partir de la revue de la documentation, les caractéristiques importantes qu'on doit chercher chez les matières premières des enrobés à matrice de pierre, ainsi que les critères de performance qu'on doit viser, en fonction de l'utilisation ciblée. Autour d'une formulation de base, un programme expérimental sera développé pour étudier l'influence de cinq paramètres de formulation : le type de fibre, le dosage en fibres, la proportion de gros granulat, la proportion de particules fines et la teneur en bitume.

Les phases 2 et 3 du programme expérimental permettront d'optimiser la formulation de base en faisant varier certains paramètres jugés importants ou critiques et de valider la performance de l'enrobé optimisé. Les résultats de la détermination de la résistance à l'omiérage en laboratoire vont montrer que les enrobés à matrice de pierre possèdent une très grande résistance à la déformation par fluage et s'avèrent un choix judicieux pour combattre l'omiérage.

INFLUENCE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE FORMULATION ET OPTIMISATION DES ENROBÉS À MATRICE DE PIERRE

Denis Tremblay

ABSTRACT

Rutting is now a rather common problem on many pavements. The increase in traffic and wheel loads is one of the main causes of the degradation of asphalt pavements. In many instances, conventional hot mix asphalt mixtures fail to perform adequately under these conditions. Stone matrix asphalt (SMA) mixtures provide a very good rutting resistance. SMA mixtures also have many other interesting characteristics, such as a better durability and a rougher, safer texture.

The objective of this paper is to discuss the most important characteristics of the materials used to make stone matrix asphalt as obtained from literature review and point out critical performance criterias based on the designed utilization. Starting out from a basic mix design, a experimental program will be developed to study the relative influence of five important mix design parameters : the type of fibre, the quantity of fibre, the quantity of coarse granular material, the fines content and the bitumen content.

Phases 2 and 3 of this research will deal with the optimization of the initial mix design. The most critical mix design parameters will then be selected : these parameters will be modified in order to get a better SMA mixture. There will be a validation of the performance of the optimized mix design. Stone matrix asphalt will show very little rutting upon tested with the LCPC wheel tester and therefore is a wise choice for highly solicited pavements.

REMERCIEMENTS

Je tiens premièrement à remercier mon directeur de recherche, M. Daniel Perraton, pour son soutien constant, tant technique que moral, sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pu être complétée.

Je remercie également le personnel du département de génie de la Construction, en particulier M. Alain Desjardins, pour son aide à la réalisation des essais.

Finalelement, je ne pourrais passer sous silence le soutien moral de ma femme Nadia qui a su m'encourager dans ma démarche tout au long de ces études de maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA DOCUMENTATION	4
1.1 Terminologie et définition	4
1.2 Historique	5
1.2.1 Allemagne	5
1.2.2 Dans le monde	7
1.2.3 Aux États-Unis	8
1.2.4 Au Canada	10
1.2.5 Au Québec	10
1.3 Notions fondamentales sur les enrobés SMA	11
1.3.1 Concepts de base	11
1.3.2 Le squelette granulaire	13
1.3.3 Le mortier bitumineux	17
1.4 Propriétés des enrobés de type SMA	19
1.4.1 Résistance à l'omiérage	20
1.4.2 Rugosité	22
1.4.3 Perméabilité	25
1.5 Formulation des enrobés SMA	26
1.5.1 Méthode N.C.A.T.	26
1.6 Coût	30
1.6.1 Matières premières	30
1.6.2 Mise en œuvre	31
1.6.3 Coût/performance	31
1.7 Les constituants	32
1.7.1 Caractéristiques des granulats	32
1.7.1.1 Gros granulat et granulat fin	32
1.7.1.2 Le filler	33

1.8	Applications	34
1.9	Production et mise en œuvre des enrobés SMA	34
1.9.1	Malaxage	34
1.9.2	Mise en place des enrobés de type SMA	36
1.9.3	Compactage	37
1.9.4	Réalisation des joints	38
1.9.5	Uniformité de l'enrobé en place	39
1.9.6	Comportement à moyen et long terme	40
1.10	Sommaire de la revue de la documentation	40
 CHAPITRE 2 CONCEPTION ET CHOIX DES CONSTITUANTS POUR LA CONFÉCTION D'UN ENROBÉ SMA		41
2.1	Introduction	41
2.2	Critères de conception	41
2.2.1	Aspects techniques	42
2.2.1.1	La performance lors de la mise en œuvre ..	42
2.2.1.2	La résistance	49
2.2.2	Sécurité	51
2.2.3	Économie	52
2.2.3.1	Coût de production	52
2.2.3.2	Les économies associées au taux de pose ..	53
2.2.3.3	Coûts associés à l'entretien et à la réparation de l'enrobé sur route	54
2.2.3.4	Les économies associées à la vie utile du revêtement	55
2.3	Synthèse des critères de conception	55
2.4	Choix des constituants pour la confection d'un enrobé SMA	56
2.4.1	Choix du gros granulat	57
2.4.2	Choix du granulat fin	59
2.4.3	Choix du filer	59
2.4.4	Choix du bitume	60
2.4.5	Choix de l'agent stabilisant	61
2.4.6	Synthèse des critères liés au choix des constituants ..	62
2.5	Formulation des enrobés SMA	62
 CHAPITRE 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL		65
3.1	Paramètres de formulation étudiés	66
 CHAPITRE 4 DESCRIPTION DES MATERIAUX UTILISÉS POUR LA CONFÉCTION DES ENROBÉS SMA EN LABORATOIRE ET DES ESSAIS DE LABORATOIRE		72
4.1	Introduction	72
4.2	Matériaux utilisés	72
4.2.1	Granulats	72
4.2.1.1	Granulat fin de calibre 0-2,5 mm	73
4.2.1.2	Gros granulat de calibre 5-10 mm	73

4.2.1.3 Filler minéral	75
4.2.2 Agents stabilisants	75
4.2.2.1 Fibres d'amiante	76
4.2.2.2 Fibres de cellulose	78
4.3 Bitume	79
4.4 Formulation	79
4.5 Description des essais de laboratoire	82
4.5.1 Techniques de fabrication	82
4.5.2 Détermination de la densité maximale de l'enrobé, D_{mm}	83
4.5.3 Calcul des proportions corrigées	83
4.5.4 Détermination de l'aptitude au compactage	83
4.5.5 Mesure de la résistance à l'omiérage	84
CHAPITRE 5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	85
5.1 Introduction	85
5.2 Dosages initiaux des enrobés SMA	85
5.3 Densité maximale, D_{mm} , et teneur réelle en bitume absorbé, $P_{ba}\%$	87
5.3.1 Remarques relatives aux résultats de la teneur en bitume absorbé	88
5.3.2 Remarques relatives aux résultats de densité Maximale, D_{mm}	91
5.3.3 Sommaire des résultats	93
5.4 Détermination de l'aptitude au compactage	93
5.4.1 Variations entre les deux échantillons pour un même enrobé	97
5.5 Examen visuel des enrobés SMA confectionnés en Laboratoire	100
CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS	102
6.1 Notes générales sur les résultats du programme expérimental	102
6.1.1 Étude de l'aptitude au compactage des dix enrobés SMA	102
6.1.2 Examen visuel des échantillons compactés à la PCG ..	103
6.1.3 Analyse de l'aptitude au compactage	103
6.1.4 Conformité des enrobés SMA produits face aux exigences établies	103
6.2 Influence du type et du dosage de fibres sur l'aptitude au Compactage des enrobés SMA	105
6.2.1 Aspect visuel comparatif des enrobés SMA confec- tionnés avec des fibres de type ou dosage différent	109
6.3 Influence de la proportion de gros granulat sur la performance des enrobés SMA	111

6.3.1	Aspect visuel comparatif des enrobés SMA confec- tionnés avec des teneurs différentes en gros granulat	115
6.4	Influence de la teneur en particules fines, passant le tamis de 80 µm, sur la performance d'un enrobé SMA	116
6.4.1	Aspect visuel comparatif des enrobés SMA confec- tionnés avec des teneurs différentes en particules fines	118
6.5	Influence du volume de bitume effectif, $V_{be}\%$, sur la performance de l'enrobé SMA	119
6.5.1	Aspect visuel comparatif des enrobés SMA confec- tionnés avec différentes teneurs en bitume effectif	122
6.6	Phase 2 - Optimisation de la formulation	124
6.6.1	Buts visés par l'optimisation	125
6.6.2	Séquence d'optimisation	125
6.6.3	L'enrobé optimisé SMA-Y	125
6.6.4	L'enrobé optimisé SMA-X	128
6.7	Phase 3 : Validation en laboratoire de l'enrobé optimisé	128
6.7.1	Examen visuel	129
6.7.2	Aptitude au compactage	130
6.7.3	Résistance à l'omiérage	131
	CONCLUSION	133
	ANNEXE : Norme Médiflex	135
	BIBLIOGRAPHIE	143

LISTE DES TABLEAUX

		Page
I	Comparaison de certaines caractéristiques de base entre les enrobés conventionnel, drainant et SMA	16
II	Synthèse des critères de conception pour les enrobés SMA (application ciblée : couche de roulement/resurfaçage pour route à trafic élevé	56
III	Synthèse des caractéristiques choisies des matériaux	63
IV	Sommaire des caractéristiques de base de l'enrobé SMA choisi	64
V	Paramètres de formulation des enrobés SMA formulés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental	71
VI	Caractéristiques des granulats	74
VII	Caractéristiques chimiques et physiques du filer calcaire	76
VIII	Caractéristiques physiques et chimiques de la fibre d'amiante utilisée dans la confection des enrobés SMA.....	77
IX	Caractéristiques physiques et chimiques des fibres de cellulose utilisées dans la confection des enrobés SMA	78
X	Caractéristiques des dix enrobés SMA confectionnés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental	81
XI	Dosages initiaux utilisés pour la confection des enrobés SMA Confectionnés en laboratoire lors de la phase 1 de programme expérimental	86
XII	Granulométries des enrobés SMA confectionnés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental	87
XIII	Compilation des résultats des densités maximales et des teneurs réelles en bitume absorbé mesurées sur les enrobés d'essai préliminaires confectionnés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental	88
XIV	Dosages réels des enrobés SMA confectionnés en laboratoire après ajustement	94

XV	Performance à la PCG des enrobés SMA du programme expérimental	99
XVI	Examen visuel des enrobés SMA confectionnés en laboratoire dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental	101
XVII	Résumé des performances des mélanges expérimentaux lors des essais à la PCG	106
XVIII	Influence du type et du dosage des fibres sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA	107
XIX	Influence de la proportion de gros granulat sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA	112
XX	Influence de la proportion de fines sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA	117
XXI	Influence de la teneur en bitume sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA	120
XXII	Caractéristiques de formulation des enrobés optimisés SMA-X et SMA-Y	129
XXIII	Performance à la PCG de l'enrobé optimisé SMA-X	130
XXIV	Performance à l'omniéreur de laboratoire de l'enrobé SMA-X	131

LISTE DES FIGURES

	Page
1.1 Représentation typique du squelette granulaire d'un enrobé SMA	13
1.2 Carottes d'enrobés bitumineux : Enrobé SMA et enrobé conventionnel	14
1.3 Photographie illustrant la texture de surface d'un revêtement en enrobé SMA immédiatement après le compactage	15
1.4 Granulométrie typique d'un enrobé SMA	17
2.1 Échantillons d'un même enrobé SMA consolidés a) à la PCG ; b) selon la méthode Marshall (source : enrobé SMA avec 70% de refus au 5 mm, 10% de tamisat au 80 µm, Vbe de 14,5% et 0,3% de fibres de cellulose)	46
3.1 Synthèse du processus expérimental mis en oeuvre.....	67
3.2 Synthèse des principales étapes de la phase 1 du processus expérimental	68
3.3 Synthèse des principales étapes de la phase 1 du processus expérimental	69
3.4 Synthèse des principales étapes de la phase 1 du processus expérimental	69
3.5 Synthèse des principales étapes de la phase 1 du processus expérimental	70
5.1 Courbes des teneurs en vides en fonction du nombre de giration pour les enrobés SMA du programme expérimental selon les différentes caractéristiques de formulation	96
6.1 Influence du type de fibres sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA	108
6.2 Influence de la proportion de fibres d'amiante sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA	109
6.3 Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD et Cell	110

6.4	Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD et Fibr+	111
6.5	Influence de la proportion de gros granulat sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA	112
6.6	Granulométries comparatives des enrobés SMA STD , GG+ et GG- ; la droite correspond à la courbe granulométrique de densité maximale	113
6.7	Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD , GG- et GG+	116
6.8	Influence de la proportion de fines sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA	117
6.9	Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD , Fill- et Fill+	119
6.10	Influence de la teneur en bitume (exprimée en $V_{be}\%$) sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA	120
6.11	Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD , Bi- et Bi-	122
6.12	Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD , Bi- et Bi+	123
6.13	Logigramme des séquences d'optimisation des enrobé SMA-Y et SMA-X	126
6.14	Interpolation de l'effet de l'augmentation de la proportion de gros granulat	127

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

SMA	Enrobé à matrice de pierre
SMART	Stone Mastic Asphalt Research Team
SHRP	Strategic Highway Research Team
FHWA	Federal Highway Administration
NCAT	National Center for Asphalt Technology
TRB	Transportation Research Board
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NAPA	National Asphalt Pavement Association
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
MTQ	Ministère des Transports du Québec
Vi%	Pourcentage de vides intersticiels
VAM%	Pourcentage de vides intergranulaires
DSR	Dynamic shear rheometer
BV	Brookfield viscometer
BBR	Bending beam rheometer
RTFOT	Rolling thin film oxidation test
PAV	Pressure aging vessel
PCG	Presse à cisaillement giratoire
V_{be}	Volume de bitume effectif
mm	Millimètre
µm	Micromètre
F_{be}	Film de bitume effectif
TSE	Tambour sécheur enrobeur
Km/h	Kilomètre à l'heure
CPP	Coefficient de polissage par projection
C_•	Coefficient d'écoulement
P_{bi}	Pourcentage de bitume initial
D_{mm}	Densité maximale du mélange
B%	Teneur en bitume exprimée en pourcentage

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES (suite)

B_a%	Bitume absorbé exprimé en pourcentage
D_{gb}	Densité brute du granulat
N_{initial}	Nombre de girations correspondant à la compaction initiale
N_{final}	Nombre de girations correspondant à la compaction finale
N_{design}	Nombre de girations correspondant à la compaction de design

INTRODUCTION

Bien que largement employés dans plusieurs régions du globe, les enrobés à matrice de pierre ont jusqu'ici rarement été utilisés au Québec. Ce type d'enrobé a maintes fois fait ses preuves comme couche de surface (et même comme couche de base) sur les chaussées à trafic élevé ou lourd ; en effet, sa grande résistance à l'orniérage lui confère alors un avantage indéniable. Au Québec, comme ailleurs dans le monde, on assiste depuis plusieurs années à une augmentation importante du trafic lourd sur les routes et artères principales. Ainsi, ces dernières années, de graves problèmes d'orniérage sont apparus à plusieurs endroits sur les chaussées en enrobés bitumineux (on n'a qu'à penser aux déformations permanentes observées aux arrêts d'autobus dans plusieurs municipalités). L'utilisation des enrobés à matrice de pierre pourrait s'avérer une solution intéressante pour cette problématique. De plus, ce type d'enrobé possède, d'après différentes études réalisées sur le sujet, d'autres propriétés intéressantes dont il serait intéressant de tirer profit.

Que ce soit au niveau du ministère des Transports du Québec ou des entreprises privées, relativement peu de recherches ont été entreprises récemment sur le sujet. Aux États-Unis par contre, de nombreux départements de transport ont expérimenté ce type d'enrobé lors des dix dernières années. Une méthode de formulation spécialement adaptée aux enrobés à matrice de pierre y a été développée. Au Québec, le ministère des Transports a développé un devis pour les enrobés de type S.M.A.. Cet enrobé, appelé Médiflex, prévoit l'ajout de fibres d'amiante comme agent stabilisant. L'enrobé Médiflex a été appliqué sur quelques projets routiers (comme sur l'autoroute Jean-Lesage aux environs de Québec).

Depuis ces réalisations, le MTQ a modifié son approche quant à la formulation des enrobés bitumineux en normalisant la méthode LC (pour Laboratoire des Chaussées). Notamment, la formulation des enrobés se fait avec la presse à cisaillement giratoire (PCG) permettant une meilleure évaluation de l'aptitude au compactage. Une des principales caractéristiques de la méthode LC est de fixer, pour un type d'enrobé

donné, un volume de bitume effectif ($V_{be\%}$). Cette façon de fonctionner permet de mieux prendre en compte les différences de densité relative et d'absorptivité des granulats employés et d'assurer d'avoir un volume de bitume minimal pour l'enrobage des grains.

Ce travail vise à établir des paramètres de conception, notamment le $V_{be\%}$, pour la formulation des enrobés à matrice de pierre à partir de la méthode LC. Autant pour les caractéristiques des matières premières (granulats et liant bitumineux) que pour l'enrobé lui-même, les paramètres de conception proposés feront référence aux normes québécoises actuelles. Il sera également pris en compte les études récentes faites sur le sujet à travers le monde comme la nouvelle méthode de formulation des enrobés à matrice de pierre développée aux États-Unis et qui semble très prometteuse et performante. Cependant, elle est longue, coûteuse et complexe d'application.

Ce travail est divisé en deux phases principales : la revue de la documentation et le programme expérimental. La revue de la documentation spécialisée permettra de faire un tour d'horizon et une synthèse des développements techniques concernant les enrobés à matrice de pierre, que ce soit au niveau de l'historique de son développement, des caractéristiques, propriétés et principes de base d'un tel enrobé, des différentes matières premières employées, de sa formulation, des contraintes et spécificités concernant sa confection et sa mise en œuvre au chantier, ainsi que de ses applications possibles.

Un programme expérimental sera établi. On y fixera les critères de conception pour la formulation des enrobés à matrice de pierre. Les matières premières seront choisies, de même que les essais de laboratoire requis pour évaluer le comportement et la performance des enrobés. On présentera et commenterá les résultats obtenus, puis on analysera ceux-ci pour évaluer l'influence des différents paramètres de formulation ; cela permettra ensuite d'améliorer la formulation et de confectionner un enrobé à matrice de pierre optimisé. Une étape de validation permettra d'étudier les performances de l'enrobé optimisé pour vérifier si les changements et les

améliorations pressentis ont effectivement eu lieu. Suivront une conclusion et des recommandations.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA DOCUMENTATION

Même si les enrobés à matrice de pierre sont très peu connus et employés au Québec, beaucoup d'études et d'expérimentations se sont faites sur le sujet un peu partout dans le monde. Ces études ont démontré des propriétés intéressantes pour ce type d'enrobé aux caractéristiques de base très spécifiques.

Dans la perspective d'étudier la formulation et la performance des enrobés bitumineux à matrice de pierre, il convient d'élaborer une revue complète de la documentation sur le sujet. Dans ce chapitre, avant d'exposer les différents aspects fondamentaux liés à ce type d'enrobé, nous traiterons dans un premier temps de l'historique de ces enrobés spéciaux. Dans un deuxième temps, nous exposerons les propriétés spécifiques aux enrobés à matrice de pierre. Puis, il sera question de la formulation et du coût de ces enrobés. Les constituants seront également étudiés. Nous présenterons aussi les principales applications de ce type d'enrobé. Enfin, nous exposerons les spécificités liées à la production et la mise en œuvre des enrobés à matrice de pierre.

1.1 Terminologie et définition

On emploie différents vocables pour référer aux enrobés à matrice de pierre. Ainsi, dans la littérature scientifique, on trouve les appellations suivantes (West 1995) : « *stone matrix asphalt* » (on utilise l'acronyme SMA), « *split mastic asphalt* », « *enrobé grenu à forte teneur en mastic* », « *grit mastic asphalt* », « *stone mastic asphalt* », « *stone filled asphalt* » ainsi que « *hot asphalt with stone* ». L'acronyme SMA est toutefois maintenant le plus largement employé, et ce dans plusieurs langues. Pour alléger le texte, cet acronyme sera utilisé tout au long de ce mémoire pour identifier ce type d'enrobé.

Le groupe de travail technique américain sur les SMA a proposé une définition de ce type d'enrobé (Brown et Manglorkar 1993) : l'enrobé SMA est un enrobé bitumineux confectionné à chaud à granulométrie discontinue qui maximise le contenu en bitume et la fraction de gros granulat. Cela produit un squelette stable pierre sur pierre, qui est maintenu en place par un mastic riche en bitume et en filler, et comportant un agent stabilisant.

1.2 Historique

Les enrobés SMA ont été originellement développés en Allemagne (Brown et Manglorkar 1993 ; West 1995). D'autres pays européens ont par la suite appliqué avec succès cette technologie. En Amérique du Nord, on a tardé à découvrir ces enrobés car les premières expérimentations sur les enrobés SMA datent à peine d'une dizaine d'années (Brown 1992).

1.2.1 Allemagne

Les premières expériences sur les enrobés SMA ont été réalisées en Allemagne en 1968, où ces enrobés portaient le nom de « *splittmastixasphalt* », qu'on peut traduire littéralement par enrobé de pierre concassée à mastic bitumineux (West 1995) ; « *split* » réfère à la pierre concassée et le terme « *mastix* » correspond au mastic ou mortier bitumineux (Brown et Manglorkar 1993).

En Allemagne, la première utilisation sur route des enrobés SMA a été le resurfaçage d'une chaussée à Wilhelmshaven; il s'agissait d'un enrobé de granulométrie 0-8 mm posé sur une épaisseur de 20 mm. Cet enrobé, appelé « *Mastimac* », comportait une forte proportion de gros granulats tenaces et résistants aux impacts, une grande quantité de liant bitumineux (de 7,5 à 8,0% en masse) et des fibres d'amiante spécialement adaptées. Aujourd'hui encore, après plus de trente ans, ce revêtement est encore en excellente condition, même si le trafic y est important.

En Allemagne, ces nouveaux enrobés posés à chaud étaient conçus dans le but précis de résister à l'abrasion induite par les pneus à crampons (Brown et Manglorkar 1993 ; West 1995 ; Haddock 1998). Ainsi, les premières utilisations des enrobés SMA visaient essentiellement à augmenter la longévité des couches de roulement des chaussées dans ces conditions. Plus tard, au début des années 1970, à l'instar de plusieurs autres pays européens, l'Allemagne a banni l'utilisation des pneus à crampons sur son territoire et la production des enrobés de type SMA a ainsi fortement chuté (West 1995).

Par ailleurs, au fil des ans, le trafic a connu une augmentation en nombre et en poids et l'omiérage par fluage de l'enrobé est devenu un problème sérieux. Comme plusieurs autres pays européens connaissant le même problème, l'Allemagne a combattu l'omiérage par fluage en choisissant des bitumes plus durs et en diminuant le pourcentage de liant bitumineux dans les enrobés conventionnels. Une fissuration excessive liée au manque de flexibilité de l'enrobé à basse température est alors apparue sur beaucoup de ces chaussées et ce problème est alors devenu le mode de dégradation le plus courant.

Au cours de ces années, les enrobés SMA mis en place en couche de roulement ont continué à démontrer une grande résistance à l'omiérage et à la déformation tout en étant soumis à des trafics élevés ou lourds (Brown et Manglorkar 1993 ; Haddock 1998). Ces performances lui ont apporté un second souffle pour l'utilisation comme matériau de surface dans le réseau routier allemand et européen (Brown 1993). En effet, outre l'augmentation du trafic, il fallait maintenant composer avec la combinaison des augmentations des pressions pneumatiques, des charges par essieu et de la proportion de poids lourds sur les chaussées, particulièrement critiques au point de vue de l'omiérage de l'enrobé.

L'Allemagne s'est imposée au fil des années comme un des principaux leaders dans la conception et le développement des enrobés SMA ; sur le réseau autoroutier allemand, les enrobés SMA sont maintenant plus utilisés que tous les autres

matériaux : ils constituent actuellement le matériau choisi pour environ 50% des contrats de resurfaçage et de construction neuve. Cette augmentation de volume de production s'est faite au détriment des autres matériaux couramment employés sur ce genre de contrat : les enrobés bitumineux denses conventionnels, le béton de ciment et le « *gussasphalt* » (enrobé coulé à chaud ne nécessitant pas de compactage).

Également, compte tenu de la bonne performance des enrobés SMA, on a même développé, expérimenté et normalisé des enrobés SMA voués à une utilisation comme couche de base (ou fondation bitumineuse) pour les routes à trafic lourd. Les enrobés SMA représentent une fraction importante (soit environ 7,5 millions de tonnes) de la production annuelle allemande d'environ 60 millions de tonnes d'enrobés (tous types d'enrobés confondus), ce qui en fait le pays où ceux-ci sont plus populaires.

Dans les années 1980, suite à la publication de diverses études montrant les problèmes potentiels liés à l'utilisation de l'amiante et de ses produits dérivés, on a assisté au retrait de ces matériaux en Europe (West 1995). Graduellement, on a trouvé des produits de substitution à l'amiante pour agir comme agent stabilisant dans les enrobés SMA : d'autres fibres minérales (le verre, la laine minérale), des fibres végétales (la cellulose, la noix de palmier) ou des polymères. La fibre de cellulose est maintenant devenue l'agent stabilisant le plus couramment employé de par le monde. Notons que la fibre d'amiante a été délaissée exclusivement à cause de craintes environnementales alors que sa performance comme agent stabilisant était très satisfaisante.

1.2.2 Dans le monde

Grâce aux nombreuses bonnes performances obtenues en Allemagne, plusieurs autres pays en Europe et ailleurs dans le monde ont adopté et adapté les enrobés SMA. Ainsi, de nos jours, les enrobés à chaud SMA sont couramment employés comme couche de surface en Angleterre, en Autriche, en Belgique, au Danemark, en France, en Finlande, en Bulgarie, en Norvège et en Suède (West 1995). D'autre part,

en Asie, de nombreux pays comme le Japon, la Malaisie, Hong Kong, Singapour, la Chine et le Pakistan, entre autres, utilisent également avec succès les enrobés SMA.

Jusqu'à maintenant, on a répertorié (Camargo, 1998) 153 pays sur les cinq continents qui ont déjà fait l'utilisation des SMA, et ce, dans des climats extrêmement variables, allant des régions désertiques (Israël, par exemple) à des zones situées en pergélisol (comme l'Alaska). On estime que plus de 600 000 000 m² de chaussée ont été réalisés avec des enrobés SMA de par le monde. En Malaisie, on a même constitué une équipe spéciale de recherche pour étudier et perfectionner ces enrobés : le comité appelé « SMART », pour Stone Mastic Asphalt Research Team, lequel est associé à l'Université de Putra Malaysia. Cette équipe a adapté localement les enrobés SMA et a étudié et développé un agent stabilisant économique et de source locale, les fibres de noix de palmier (SMART 1999).

1.2.3 Aux États-Unis

À la fin des années 1980, le problème d'omiérage par fluage des enrobés bitumineux causait beaucoup de maux de tête aux gestionnaires de chaussées américains. Un comité d'experts est allé voir ce qui se faisait en Europe (AASHTO 1991). L'expérience allemande avec les enrobés appelés « *splitmasticasphalt* » leur a semblé très intéressante et a amené les premières expérimentations (Brown 1993). Ce sont les américains qui leur ont donné le vocable « *stone mastic asphalt* ».

De ce côté-ci de l'Atlantique, la première expérience aux États-Unis date de 1991 pour un projet élaboré au Wisconsin où une première section expérimentale de chaussée en enrobés SMA a été réalisée. Par la suite, de nombreux autres États ont suivi le pas. Les publications d'ouvrages et d'articles techniques ont alors débuté et se poursuivent depuis (Brown 1993).

Les toutes premières expériences américaines ont calqué de très près les recettes allemandes. Les États où se sont déroulées ces essais avaient des climats

comparables à celui de l'Allemagne. Dans le cas des premiers projets au Wisconsin et au Michigan, des granulats conformes aux spécifications allemandes ont été employés, nécessitant leur transport sur plusieurs centaines de kilomètres (Haddock 1998, Schmiedlin 1998). On a même utilisé des fibres végétales (cellulose) importées d'Europe comme agent stabilisant. Pour des raisons économiques, des ajustements ont donc été apportés pour tenir compte des différences intrinsèques dans les matières premières locales et pour améliorer la performance des enrobés.

Actuellement, plusieurs États emploient de façon courante l'enrobé SMA, même si on ne disposait pas, jusqu'à tout récemment, d'une méthode de formulation normalisée (à ce jour, plus d'une trentaine d'États américains ont déjà utilisé les enrobés SMA). Dans certains États, comme la Géorgie, les enrobés SMA sont même devenus un choix prédominant pour les autoroutes à trafic élevé ou lourd (NAPA 1999). On peut dire qu'aux Etats-Unis, depuis les dernières années, l'utilisation des enrobés SMA est en pleine croissance, même si actuellement, ils ne représentent encore qu'une très faible fraction de la production totale. En 1996, on produisait un peu moins d'un million de tonnes d'enrobés SMA sur une production annuelle totale de 500 millions de tonnes, ce qui équivaut à moins de 0,2% de la production globale d'enrobé bitumineux.

Il est intéressant de souligner que les expériences menées aux États-Unis pourront éventuellement s'appliquer ici, puisque les enrobés SMA ont été utilisés et adaptés dans les quatre grandes zones climatiques nord-américaines telles que définies par le programme de recherche S.H.R.P. (*Strategic Highway Research Program*) soit les régions dites respectivement « dry-freeze », « dry-no freeze », « wet-freeze » et « wet-no freeze ».

Également, plusieurs organismes américains importants dans le domaine des enrobés et des chaussées prennent une part active dans les études et les recherches menées sur les enrobés SMA : on peut nommer, entre autres, la F.H.W.A., la N.C.A.T., le T.R.B., la N.C.H.R.P., l'Asphalt Institute, la N.A.P.A., l'A.A.S.H.T.O et les départements

de transport des États impliqués. On trouvera dans la liste des abréviations la signification de ces acronymes.

1.2.4 Au Canada

Au Canada, les recherches et les applications des enrobés SMA sont encore relativement limitées. L'Ontario est la province canadienne où il y a eu plus de recherches et de chaussées réalisées en enrobés SMA ; depuis 1990, des projets de recherche ont été effectuées par le Ministère des Transports et le Département de Transport du Toronto Métropolitain.

Une des premières applications *in situ* des enrobés SMA en Amérique du Nord a été réalisée au début des années 1990 en Ontario par le groupe Miller. On a produit en Ontario plusieurs pavages expérimentaux : sur le chemin Don Mills, sur une section de l'Autoroute 401 et sur le boulevard Lakeshore à Toronto (5000 tonnes d'enrobés posés sur 6 voies et 1,8 km). Dans ce dernier cas, une partie de la chaussée sur laquelle on a fait la réfection en 1995 fait partie du circuit routier urbain de Formule Indy (Technical Solutions 2000).

Dans l'ensemble, d'après les résultats préliminaires obtenus de la performance des enrobés SMA utilisés en couche de roulement, les experts du MTO estiment que la vie utile est prolongée de 5 à 8 ans comparativement aux pavages conventionnels dont la vie utile est estimée à 18 ou 20 ans).

1.2.5 Au Québec

Au Québec, des recherches ont été effectuées sur les enrobés SMA, principalement au début des années 1990. Dès l'été 1990, des sections d'essai ont été réalisées sur l'autoroute 20 près de la ville de Québec. L'enrobé utilisé, appelé « Médiflex », a été mis en oeuvre à un taux de pose de 90 kg/m². Les relevés et observations effectués sur les sections d'essai montrent que cet enrobé a eu un comportement supérieur

comparativement à un enrobé conventionnel ; moins de désenrobage, moins de fissuration et les fissures sont moins larges (Langlois 2000). De plus, ces sections ont jusqu'ici très bien résisté au phénomène d'ombrage. À l'annexe 1, on trouvera les normes développées par le MTQ (ministère des Transports du Québec) pour cet enrobé.

Par contre, le volume des enrobés SMA produits au Québec reste très faible et leur formulation n'a pas été adaptée à la nouvelle méthode de formulation du Laboratoire des Chaussées.

Au Québec, les enrobés SMA mis en place sur chaussée ont été formulés avec un bitume conventionnel et des fibres d'amiante comme agent stabilisant. Le Québec constitue à peu près le seul endroit au monde où on utilise encore les fibres d'amiante dans les enrobés bitumineux. Le fait que les mines québécoises soient les plus grosses productrices au monde de ce matériau et que la demande mondiale est actuellement à la baisse explique en partie le choix du MTQ. Les producteurs d'amiante sont conscients des risques inhérents à leur produit et ont adapté la mise en œuvre de leur produit en vue de minimiser les risques liés à leur utilisation dans la formulation des enrobés.

1.3 Notions fondamentales sur les enrobés SMA

Même s'ils sont réalisés avec les mêmes matières premières que les enrobés conventionnels, les enrobés SMA diffèrent passablement de ceux-ci, tant au niveau de la formulation que de la façon de reprendre les charges.

1.3.1 Concepts de base

L'enrobé SMA est un enrobé à chaud à granulométrie discontinue qui maximise le contenu en bitume, la fraction de gros granulat et la proportion de filler (Brown et Manglorkar 1993 ; Mogawar et Stuart 1996 ; NAPA 1999 ; West 1995). Comme un

enrobé conventionnel, il est composé de deux phases distinctes, soit un squelette de gros granulats et un mortier bitumineux (Brown et Manglorkar 1997 ; Haddock 1998). Par contre, chez les enrobés de type SMA, la fraction grossière, c'est-à-dire les particules de dimension supérieure à 5,0 mm, représente une proportion très importante du granulat total, soit approximativement 70% en masse. Le mortier bitumineux dans l'enrobé SMA diffère sensiblement de celui d'un enrobé conventionnel. En effet, il est plus riche en bitume, il contient sensiblement moins de granulat fin (particules comprises entre 5 mm et 80 μm) tandis qu'on y trouve généralement une forte proportion de particules passant le tamis de 80 μm . Le filler constitue environ 10% de la masse minérale de l'enrobé. À cause de la proportion élevée de filler et de la présence d'un agent stabilisant (fibres ou polymères), le mortier bitumineux dans un enrobé SMA est beaucoup plus cohésif que celui d'un enrobé conventionnel (Brown et coll 1996 ; Kandhal 1998-1).

Le concept de base d'un enrobé SMA est le rôle du squelette granulaire qui assure un contact pierre sur pierre, garantissant ainsi la résistance et la stabilité de l'enrobé (Brown et coll 1996 ; NAPA 1999 ; West 1995). Pour sa part, le mortier bitumineux à haute teneur en liant contribue à améliorer la durabilité de l'enrobé, normalement supérieure à celle d'un enrobé conventionnel. La surface spécifique des granulats des enrobés SMA est généralement plus faible que pour les enrobés conventionnels. L'épaisseur du film de bitume sera donc plus grande. Or, puisque la durabilité d'un enrobé face aux phénomènes de déenrobage et d'oxydation du liant est directement proportionnelle à l'épaisseur du film de bitume effectif, les enrobés SMA seront considérés comme étant plus performants à ce niveau (Brown et Manglorkar 1993 ; Kandhal et Chakraborty 1996). La figure 1.1 schématise le squelette granulaire typique d'un enrobé SMA.

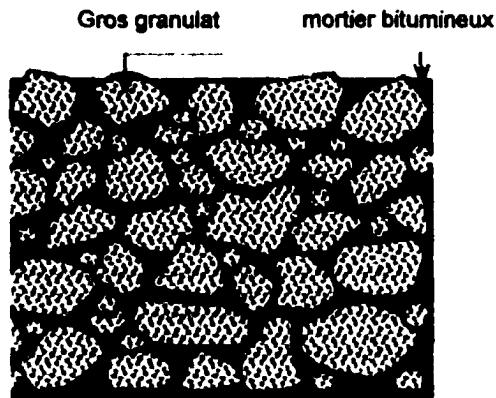


Figure 1.1 Représentation typique du squelette granulaire d'un enrobé SMA
(adapté de Watanabegumi 2000)

Compte tenu de l'importance du squelette granulaire et du mortier bitumineux dans les enrobés SMA, il convient d'élaborer plus en détails les caractéristiques spécifiques liées à ces deux éléments.

1.3.2 Le squelette granulaire

Pour les enrobés SMA, le contact pierre sur pierre prédomine dans la distribution des contraintes et des efforts, ce qui n'est pas le cas pour les enrobés denses conventionnels où le transfert des efforts se fait par les contacts intergranulaires aussi bien des grosses que des petites particules (Brown et Manglorkar 1993). Le concept du transfert des efforts par l'entremise des gros grains apporte une meilleure résistance au cisaillement. La figure 1.2 illustre bien la différence entre l'ossature granulaire spécifique aux enrobés SMA de celle des enrobés conventionnels. Dans un enrobé conventionnel, les gros grains sont dispersés et « nagent » littéralement dans le mortier bitumineux tandis que pour l'enrobé SMA, les particules du gros granulat, en plus grand nombre, sont beaucoup plus rapprochées, ce qui permet les contacts directs pierre sur pierre (Kandhal 1998). La fraction granulaire fine est également

beaucoup moins présente dans l'enrobé SMA comparativement à l'enrobé conventionnel (Mogawar et Stuart 1995A). La granulométrie discontinue et le fait que les granulats sont constitués de particules à 100% concassés constituent deux éléments qui augmentent le niveau d'enchevêtrement des particules et le contact pierre sur pierre (Brown et Manglorkar 1993).



Figure 1.2 Carottes d'enrobés bitumineux : enrobé SMA et enrobé conventionnel (photographies tirées et adaptées de Summers 2000)

La proportion élevée de gros granulats dans l'enrobé SMA, soit de l'ordre de 70%, correspond assez bien à celle d'un enrobé à granulométrie ouverte. Les enrobés drainants sont un type spécifique d'enrobé à granulométrie ouverte. Les enrobés drainants et les enrobés à granulométrie ouverte sont quelquefois employés sur les chaussées pour améliorer le coefficient d'adhérence dans les zones critiques. Bien que la proportion de gros granulat des enrobés SMA soit comparable à celle des enrobés drainants, les enrobés SMA ont généralement des vides interstitiels (Vi%) nettement plus faibles, comparables à ceux des enrobés denses conventionnels, généralement compris entre 4 et 5%. Par contre, les enrobés à granulométrie ouverte ont des vides interstitiels beaucoup plus élevés, pouvant dépasser 20% dans le cas des enrobés drainants (Richardson 1999). À ce niveau, la proportion de filer est un

facteur déterminant : les enrobés SMA ont une proportion de filer nettement plus élevée que celle des enrobés conventionnels tandis que dans les enrobés drainants, la teneur en filer est encore moindre que celle des enrobés conventionnels. Également, la teneur en bitume diffère beaucoup entre ces différents enrobés puisque celle-ci a un rôle important à jouer vis-à-vis des vides interstitiels. En définitive, les enrobés SMA présentent une surface relativement grenue, un peu comme celle d'un enrobé à granulométrie ouverte, mais ils ont des vides interstitiels comparables à ceux d'un enrobé conventionnel. La figure 1.3 montre la texture typique d'une chaussée en enrobé SMA immédiatement après sa mise en place



Figure 1.3 Photographie illustrant la texture de surface d'un revêtement en enrobé SMA immédiatement après compactage (adapté de Summers 2000)

Le tableau I présente des valeurs typiques pour certaines caractéristiques de base des enrobés SMA, conventionnel et drainant (Richardson 1999).

Tableau I
Comparaison de certaines caractéristiques de base entre les enrobés
conventionnel, drainant et SMA (adapté de Richardson 1999)

Caractéristiques	Enrobé conventionnel	Enrobé SMA	Enrobé drainant
Vides interstitiels Vi (%)	5	5	20
Hauteur de sable (texture superficielle) (mm)	0,8	1,0	> 2,0
Épaisseur du film de bitume effectif Fbe (μm)	8	11	13

L'enrobé SMA est en fait un mélange spécial à granulométrie discontinue (*gap-graded*) (Mogawar et Stuart 1995B ; West 1995), c'est-à-dire qu'il y a des grosseurs intermédiaires de particules qu'on ne retrouve pas, ou très peu, dans ce type d'enrobé. La courbe granulométrique présente donc une discontinuité.

Avec une proportion aussi élevée de gros granulat dans les enrobés SMA, on comprendra facilement que leur granulométrie s'éloigne grandement de la droite dite de densité maximale. Les vides intergranulaires (VAM%) sont alors plus élevés que dans un enrobé dense conventionnel.

La figure 1.4 illustre le fuseau granulométrique de contrôle d'un enrobé SMA. De par leurs caractéristiques granulométriques spécifiques, le comportement et la méthode de formulation de ces enrobés seront sensiblement différents de ceux des enrobés conventionnels à chaud.

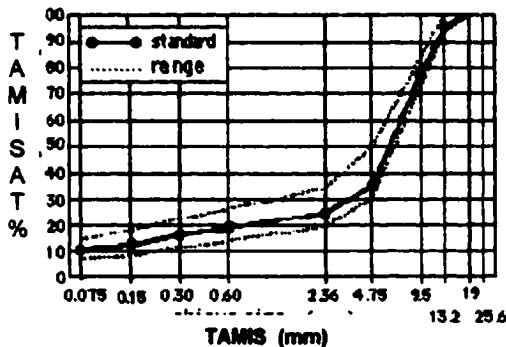


Figure 1.4 Granulométrie typique d'un enrobé SMA (adapté de Watanabegumi 2000)

1.3.3 Le mortier bitumineux

Le mortier bitumineux est en somme la fraction fine du granulat, le filler minéral, le liant bitumineux et éventuellement, l'agent stabilisant (Brown et coll 1996 ; Harris et Stuart 1995). En effet, compte tenu de la teneur élevée en bitume et de la discontinuité granulaire, un agent stabilisant est généralement requis afin d'assurer l'homogénéité et éviter ainsi les risques de séparation par saignement entre le bitume et les granulats de l'enrobé. Nous traiterons plus en détails de cet aspect ultérieurement. Le mortier bitumineux ne doit pas être confondu avec le mastic bitumineux : ce dernier ne comprend pas la fraction fine du granulat.

Au niveau du mortier bitumineux, deux éléments distinctifs des enrobés SMA par rapport aux enrobés conventionnels sont particulièrement importants : les agents stabilisants et la proportion de filler (West 1995).

AGENT STABILISANT : L'agent stabilisant a pour effet d'accroître la cohésion et la viscosité du mortier, évitant ainsi que les phases gros granulat/mortier ne se séparent par ségrégation lors des opérations de malaxage, de transport et de mise en place (Brown et Manglorkar 1993 ; West 1995 ; Haddock 1998). L'agent stabilisant permet donc d'éviter le saignement du bitume, c'est-à-dire la migration vers le bas du bitume lors du malaxage ou du transport ou encore la remontée en surface du bitume lors de

la compaction. La présence de ressusage ou de saignement peut s'avérer un problème important quant à la sécurité de la chaussée puisque le coefficient d'adhérence y est sensiblement réduit, surtout sur une chaussée détrempée. Or, la teneur élevée en bitume et la granulométrie spécifique des enrobés SMA les rendent nettement plus susceptibles au saignement que les enrobés conventionnels.

L'agent stabilisant est généralement un polymère et/ou des fibres organiques ou minérales. L'utilisation d'un polymère comme agent stabilisant peut réduire sensiblement la susceptibilité thermique du bitume, et par conséquent améliorer la performance des enrobés à haute température ; la résistance à l'omierage d'un enrobé est associée à sa performance à haute température (Brown et Manglorkar 1993 ; Brown et coll 1996 ; Mogawar et Stuart 1995A). Par contre, les fibres semblent plus efficaces que les polymères pour réduire le saignement. En effet, des essais en laboratoire ont montré qu'un enrobé SMA avec des fibres comme agent stabilisant présente, en moyenne, 70 fois moins de ressusage que le même enrobé sans agent stabilisant ; ces valeurs sont plus élevées que pour les enrobés SMA utilisant des polymères comme agent stabilisant. De tels résultats ne laissent aucun doute quant à la nécessité de l'emploi d'un agent stabilisant dans un enrobé SMA.

Par ailleurs, d'autres techniques pour contrôler le saignement ont déjà fait l'objet de recherches dont, notamment, l'utilisation de bitumes spéciaux tels les bitumes gélifiés (Haddock 1998). Ceux-ci sont des bitumes auxquels on a incorporé un agent pour les épaissir et les stabiliser en leur conférant un comportement faiblement thixotropique. Les silicates de magnésium et d'aluminium, ainsi que l'argile sont des additifs employés pour produire les bitumes gélifiés. Également, dans ce contexte, certains produits recyclés ont été employés tels que : particules de caoutchouc (Veizer 1993), bardeaux d'asphalte, etc. (West 1995). Si le recyclage de ces matériaux est intéressant au point de vue environnemental, il requiert par contre la plupart du temps une adaptation spécifique de l'équipement de production.

LE FILLER : Les enrobés SMA ont une proportion de filler sensiblement plus élevée que celle des enrobés conventionnels (Brown et Mallick 1994 ; Harris et Stuart 1995). Les enrobés conventionnels ne nécessitent généralement qu'une faible proportion de fines d'appoint (non contenues dans les granulats fin et grossier). Le filler employé dans les enrobés SMA remplit deux fonctions principales : réduire les vides interstitiels de l'enrobé et augmenter la cohésivité du mortier bitumineux. La teneur élevée en filler des enrobés SMA fait qu'ils n'ont pas une granulométrie ouverte et que leur texture reste assez fermée.

1.4 Propriétés des enrobés de type SMA

De façon générale, les différentes études et recherches réalisées sur les enrobés SMA posés en couche de roulement mettent en perspective les avantages potentiels suivants (Bateman 2000 ; Brown et Manglorkar 1993 ; West 1995) :

- meilleure résistance à l'omiérage
- meilleures propriétés de surface : bruit de la circulation réduit (surtout à vitesse élevée), adhérence pneumatique-chaussée accrue, résistance au désenrobage et à l'arrachement améliorée, meilleure drainabilité , projection d'eau réduite
- meilleure résistance à l'usure
- meilleure résistance à la fissuration thermique
- ratio coûts/performance (entretien réduit, pose en couches plus minces, vie utile plus grande)
- auto-réparation des fissures (*auto-healing*)

Dans les sections suivantes, compte tenu des critères de performance qui seront étudiés dans le cadre du programme expérimental de cette recherche, nous traiterons essentiellement de la résistance à l'omiérage et des propriétés de surface des enrobés SMA. Nous parlerons également brièvement de la perméabilité des enrobés SMA.

1.4.1 Résistance à l'omiérage

Dans un premier temps, il est important de distinguer les trois différents types d'omiérage pouvant se produire dans un enrobé bitumineux : l'omiérage par usure, l'omiérage par fluage et l'omiérage par compaction.

L'omiérage par usure est causé par le frottement répété à l'interface pneumatique/enrobé qui conduit à l'abrasion du revêtement en surface. Ce type d'omiérage est évidemment accentué par l'usage de pneus à crampons (Kandhal 1998). Les premières expérimentations d'enrobés SMA en Allemagne visaient essentiellement à combattre ce type d'omiérage par l'emploi d'une forte proportion de gros granulat tenace et durable.

L'omiérage par fluage est causé la déformation permanente du liant bitumineux sous les charges. En effet, le bitume est un matériau thermo-plastique qui, sous charge, varie d'un comportement élastique, à très basse température, à un comportement visco-plastique, à haute température (Young et coll 1998). En effet, la température a pour effet de réduire la cohésion de l'enrobé et d'accentuer ainsi sa déformabilité. Lorsque la cohésion de l'enrobé est insuffisante, le passage répété des véhicules lourds peut donner lieu à une restructuration du squelette granulaire se traduisant par une dépression en surface localisée aux endroits de passage des véhicules, l'omiérage de fluage. De nos jours, c'est essentiellement pour contrer ce type d'omiérage qu'on emploie les enrobés SMA.

Enfin, l'omiérage de compaction est occasionné par la diminution des vides résiduels dans l'enrobé sous l'effet du passage répété des véhicules. Il s'agit essentiellement d'un problème de mise en œuvre car les enrobés qui présentent ce type d'omiérage ont presque toujours été sous-compactés lors de la mise en place (Kandhal 1998); normalement, un enrobé qui a été convenablement compacté ne présentera pas d'omiérage de compaction.

Des recherches (Kandhal 1998) ont mis en perspective un certain nombre de caractéristiques fondamentales que devrait idéalement posséder un enrobé pour résister à l'omiérage, soit principalement : une combinaison granulaire plus grossière, des granulats angulaires et rugueux, une teneur en vides intergranulaires (VAM%) élevée, une teneur réduite en liant, un liant plus visqueux et une proportion plus importante de particules très fines (filler). À l'exception de la teneur réduite en liant bitumineux, la formulation typique d'un enrobé SMA possède toutes ces caractéristiques.

Un des principaux avantages des enrobés SMA est sa résistance à l'omiérage. Le squelette granulaire spécifique à ce type d'enrobé joue un rôle important à ce niveau (Brown et Haddock 1997 ; Brown et Cooley 1999 ; Brown et coll 1996 ; Kandhal 1998). Compte tenu que le transfert des efforts s'effectue essentiellement par l'entremise du contact pierre sur pierre du squelette granulaire, la résistance à l'omiérage est beaucoup moins tributaire du bitume (dosage et type). Dans cette perspective, il semble que l'on puisse formuler des enrobés de type SMA résistants à l'omiérage lorsque soumis à des conditions de service sévères (trafic élevé et lourd), tout en utilisant des bitumes conventionnels. En effet, dans des conditions de service sévères, l'utilisation de bitumes polymères est nécessaire pour la confection d'enrobés conventionnels afin de résister à la fois à l'omiérage de fluage, critique aux températures extrêmes d'été, et à la fissuration thermique, critique sous l'effet des températures rigoureuses des hivers québécois.

Dans les enrobés conventionnels, bien qu'une augmentation de la teneur en bitume se traduit généralement en une baisse de la résistance à l'omiérage, elle s'avère néanmoins favorable au terme de la résistance à la fissuration thermique de l'enrobé. Dans les enrobés SMA, on peut augmenter la teneur en bitume sans affecter de façon appréciable la résistance à l'omiérage et ainsi accroître la résistance à la fissuration thermique de l'enrobé à basse température. En effet, certains enrobés SMA ont été confectionnés avec des teneurs en bitume de l'ordre de 8%, sans présenter de problèmes d'omiérage.

Le bitume, un matériau thermoplastique, fait en sorte que la susceptibilité à l'omiérage d'un enrobé conventionnel est fortement influencée par la température ; un été extrêmement chaud peut s'avérer particulièrement dommageable à ce point de vue. Pour un enrobé conventionnel, une augmentation de quelques degrés de la température de l'enrobé se traduit par une baisse significative de la résistance à l'omiérage. Or, pour les enrobés SMA, compte tenu du concept de base lié à l'interaction pierre sur pierre du squelette granulaire, cette susceptibilité thermique liée au bitume est nettement moins significative.

Toutefois, les enrobés de type SMA ne constituent pas une panacée pour combattre l'omiérage et encore moins pour tous les problèmes des chaussées. Ainsi, il ne sert pour ainsi dire à rien de les utiliser comme couche de surface sur une chaussée ayant une structure inadéquate. D'ailleurs, dans les quelques cas où on a observé de l'omiérage sur des chaussées recouvertes d'enrobés SMA, rarement l'enrobé était en cause. Le plus souvent, la déformation apparente en surface était associée à la déformation de l'enrobé conventionnel de la couche de base ou des fondations granulaires. À cause de cela, pour la construction de chaussées exposées à du trafic très lourd, on utilise quelquefois des enrobés SMA comme couche de base.

1.4.2 Rugosité

Un des aspects fondamentaux de la couche de roulement d'une chaussée est lié à la sécurité des usagers. On y retrouve deux éléments majeurs : l'adhérence et la drainabilité de l'enrobé, c'est-à-dire la capacité d'évacuation de l'eau à l'interface pneumatique-enrobé.

La texture superficielle d'un enrobé est une propriété directement reliée à la sécurité. L'adhérence pneumatique/chaussée, particulièrement sous la pluie, est fonction de la rugosité superficielle de l'enrobé en couche de roulement. Il faut distinguer entre la macrotecture et la microtexture de l'enrobé. La macrotecture est principalement fonction de la granulométrie des particules, de leur forme et de leur enchevêtrement.

La macrotexture va permettre, notamment, l'évacuation rapide des eaux de surface par les espaces intergranulaires de la couche superficielle (Julien et coll. 1994).

Par contre, la microtexture fait surtout référence à la texture superficielle des grains, souvent liée à leur nature minéralogique, à leur structure et à l'aspérité saillante des particules fines en surface du revêtement. La microtexture est particulièrement importante au niveau de l'adhérence pneu/chaussée (Julien et coll. 1994). La macrotexture et la microtexture ont donc toutes deux une influence directe sur la sécurité de l'usager.

La texture superficielle d'un enrobé bitumineux évolue à travers le temps, suite aux phénomènes d'attrition, d'abrasion et de désenrobage. Particulièrement, cette évolution est nettement marquée dès le début de la mise en circulation de la chaussée. En effet, suite à la mise en œuvre de l'enrobé, le bitume enrobant les particules a pour effet d'atténuer la microtexture de l'enrobé. Le bitume superficiel sera usé rapidement par le passage répété des véhicules et ainsi, le coefficient d'adhérence augmentera généralement durant les premiers mois de la vie d'un enrobé avant de baisser par la suite plus ou moins rapidement dû au polissage des particules sous l'effet du passage des véhicules.

On utilise couramment l'essai de hauteur de sable pour évaluer sur chaussée la texture superficielle d'un enrobé bitumineux. L'essai de hauteur de sable évalue surtout la macrotexture de l'enrobé. Il s'agit d'un essai simple, rapide à exécuter et nécessitant des équipements réduits. En gros, il s'agit d'étendre à la surface de l'enrobé, de façon circulaire, un volume donné de sable uniforme. On mesure le diamètre moyen du cercle formé et par calcul, on détermine la hauteur moyenne du sable dans le cercle.

D'autres essais permettent de mieux évaluer la texture superficielle globale (microtexture et macrotexture) d'un revêtement bitumineux. Ces essais évaluent le coefficient d'adhérence en surface de la chaussée. On peut par exemple utiliser un

pendule de frottement. Il s'agit d'une tige lestée qu'on laisse tomber vers l'enrobé suivant un mouvement de pendule. Le coefficient d'adhérence de l'enrobé est inversement proportionnel à la hauteur à laquelle le pendule va remonter après le contact avec l'enrobé. Il existe également des appareillages attachés à un véhicule et comportant un vrai pneu qui peuvent évaluer *in situ* le coefficient de frottement de l'enrobé. De plus, certains essais parmi ceux-ci peuvent évaluer l'évolution du coefficient d'adhérence en fonction de la vitesse du véhicule.

Les enrobés SMA possèdent des hauteurs de sable et des coefficients d'adhérence supérieurs à ceux des enrobés conventionnels. Par contre, pour les routes à vitesse élevée, on avait tout lieu de se demander si ces valeurs étaient suffisamment élevées (Richardson 1999). En effet, compte tenu de la teneur élevée en bitume, l'épaisseur plus importante du film de bitume de ces enrobés a pour effet de réduire la microtexture de l'enrobé et par conséquent le coefficient d'adhérence initial (lors des premiers mois) (Brown 1993). Ainsi, sur plusieurs chaussées, on a tenté de corriger la situation en procédant à l'application en surface et à la compaction, sur la chaussée neuve, de granulats fins uniformes ; cette solution devait assurer un meilleur coefficient de friction immédiatement après la mise en œuvre. Par contre, l'expérience a montré que les particules fines compactées à froid se détachent rapidement. Non seulement l'amélioration du coefficient de friction est-elle de faible durée, tout au plus quelques mois, mais en plus, les particules qui se détachent bouchent les espaces intergranulaires en surface et réduisent ainsi la texture superficielle de l'enrobé (Richardson 1999). Des mesures de la hauteur de sable ont clairement démontré ce phénomène où on obtient à moyen terme l'effet inverse de celui recherché.

En fait, cette crainte s'est avérée non fondée puisque d'autres tests ont montré que, contrairement aux enrobés denses conventionnels, le coefficient d'adhérence des enrobés SMA varie peu en fonction de la vitesse. À basse vitesse, les SMA ont déjà des coefficients d'adhérence égaux ou supérieurs aux enrobés conventionnels ; plus la vitesse est élevée, plus les enrobés SMA s'avèrent supérieurs à ce niveau. Une solution proposée en vue d'améliorer davantage le coefficient d'adhérence des

enrobés SMA est d'augmenter la proportion de gros granulat dans le mélange pour rendre l'enrobé encore plus grenu. Les granulométries de certains enrobés SMA produits en Angleterre s'écartent considérablement des recettes originales allemandes. Dans les études anglaises, la granulométrie proposée pour les routes à vitesse élevée vise une proportion d'environ 77% de tamisat au tamis de 5 millimètres, ce qui constitue un pourcentage extrêmement élevé (Richardson 1999).

L'enrobé SMA a ainsi été employé avec succès en Angleterre sur le circuit de Formule 1 de Silverstone où son utilisation a résulté en une meilleure adhérence des véhicules sur chaussée humide. On a également noté que le revêtement s'assèche également plus rapidement après des précipitations. L'enrobé SMA employé pour la chaussée du circuit routier urbain de Formule Indy à Toronto a également très bien performé. Dans les deux cas, l'enrobé SMA devait résister à des forces de cisaillement importantes (surtout en virage) causés par des bolides circulant à des vitesses allant jusqu'à 300 km/h, et conserver une bonne adhérence en situation de pluie. Auparavant, selon le directeur des opérations du circuit de Toronto, les enrobés n'avaient jamais tenu le coup dans les virages. Dans les faits, après quelques années d'utilisation urbaine (et de formule Indy), l'enrobé s'est comporté de façon admirable (Technical Solutions 2000).

1.4.3 Perméabilité

Relativement peu de chercheurs se sont intéressés à la perméabilité à l'eau des enrobés SMA. Les quelques résultats obtenus semblent montrer que la perméabilité des enrobés SMA est plus grande que celles des enrobés conventionnels (Watanabegumi 2000), tout en étant sensiblement inférieure à celle des enrobés à granulométrie ouverte. Par contre, la formulation et la compacité constituent des éléments critiques à ce niveau. Ainsi, une augmentation de la dimension maximale du granulat ou de la proportion de gros granulat se traduit par une augmentation de la perméabilité. Également, la perméabilité est inversement proportionnelle à la compacité de l'enrobé ; spécifiquement, si les vides en place dépassent 6%, la

perméabilité de l'enrobé augmente rapidement. On suggère donc une compacité minimale en chantier de 94%.

Notons que les essais pour déterminer la perméabilité des enrobés SMA ont été réalisés en laboratoire. Des méthodes d'essai en chantier ont été expérimentées et modifiées ; on n'a toutefois pas obtenu de résultats probants avec les essais de détermination *in situ*.

1.5 Formulation des enrobés SMA

À l'exception de la nouvelle méthode complexe développée par la N.C.A.T. (*National Center for Asphalt Technology*) décrite à la section 1.5.1, il n'existe pas vraiment de méthode normalisée de formulation pour les enrobés SMA. Les Allemands qui sont les plus gros producteurs de ce type d'enrobé utilisent surtout des devis de performance où les entrepreneurs sont responsables de la qualité de leur produit. Pour beaucoup de projets réalisés un peu partout dans le monde, on a testé, adapté et amélioré les enrobés employés en Allemagne.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les premiers enrobés SMA produits aux États-Unis ont été réalisés en « calquant » d'assez près les matériaux et les formulations des enrobés allemands (Creyton 1994). On a donc employé des proportions de pierre, de filler et de bitume très semblables à celles des enrobés SMA qu'on retrouve sur les chaussées allemandes (Brown 1992) et au fil des projets, on a assisté à une amélioration et une adaptation de cette formulation de base.

1.5.1 Méthode N.C.A.T.

Vu l'intérêt suscité par les premières expérimentations aux États-Unis, il existait réellement un besoin pour une méthode de formulation spécifique aux enrobés SMA. La méthode développée et validée par la N.C.A.T. à l'Université Auburn grâce à un financement du N.C.H.R.P. (*National Cooperative Highway Research Program*) est

une méthode hybride qui tient compte des caractéristiques et particularités spécifiques des enrobés SMA (Brown et Cooley 1999 ; Brown et coll. 1997B).

Cette nouvelle méthode est très complète et tient compte des spécificités des enrobés SMA ; elle fait table rase sur les méthodes et essais visant la formulation des enrobés conventionnels et peut s'avérer un outil très utile pour les organismes désirant mettre en œuvre des enrobés SMA. La vaste étude de la N.C.A.T a conduit à l'énoncé de toute une série d'exigences et de recommandations, non seulement pour la formulation, mais aussi pour la fabrication et la mise en œuvre des enrobés SMA.

Par contre, la méthode de la N.C.A.T. est passablement complexe et longue si on la compare avec la méthode employée au Québec, développée par le Laboratoire des Chaussées. Elle utilise un peu la même approche que la méthode de formulation Superpave pour les enrobés conventionnels mais elle est encore plus complexe que celle-ci car elle fixe des exigences pour les caractéristiques du mastic bitumineux.

De façon simplifiée, la formulation des enrobés SMA par la méthode N.C.A.T. comporte 5 phases (Brown et coll. 1997B) :

- La sélection des matériaux ;
- La sélection de la combinaison granulaire optimale ;
- La détermination de la teneur en bitume à employer ;
- L'évaluation des propriétés du mortier bitumineux ;
- L'évaluation de la susceptibilité à l'eau et au saignement.

Sélection des matériaux - Une série d'exigences a été établie pour les matières premières, autant en ce qui concerne le gros granulat, le granulat fin, le filler et les fibres. Par contre, le bitume n'est pas évalué à ce niveau.

Sélection de la combinaison granulaire optimale - La méthode développée par la N.C.A.T. permet également de déterminer la proportion requise de gros granulat pour

optimiser le contact pierre sur pierre, condition essentielle à la bonne performance d'un enrobé SMA. Cette proportion est calculée à partir d'un essai standard très simple, soit la détermination de la masse volumique d'un gros granulat pilonné à sec qui permet l'évaluation des vides dans le gros granulat, VGG%. Ce paramètre est spécifique aux enrobés SMA. Si le volume de mortier bitumineux ne dépasse pas le volume des vides, alors on présume qu'on aura un contact efficace pierre sur pierre. En plus des vides dans le gros granulat, la méthode N.C.A.T. ainsi établie fait appel à un autre paramètre volumétrique, celui-là couramment employé pour la formulation des enrobés conventionnels, soit les vides inter-granulaires (VAM%).

La combinaison granulaire optimale est évaluée à partir d'essais sur au moins trois combinaisons granulaires différentes. À partir d'une même teneur en bitume approximative, on produit des enrobés avec des combinaisons granulaires différentes. Pour satisfaire les demandes des différents états, la méthode permet d'effectuer la détermination de la combinaison granulaire optimale avec, soit l'appareillage Marshall, soit la presse à cisaillement giratoire, même si on sait que cette dernière est beaucoup plus appropriée pour les enrobés SMA. En effet, la méthode de compactage préconisé par la méthode Marshall, soit par impact, n'arrive la plupart du temps pas à créer le squelette granulaire spécifique à ce type d'enrobé, tel qu'obtenu en chantier par l'action de pétrissage des rouleaux compacteurs (West 1995).

Détermination de la teneur en bitume à employer - En respectant la combinaison granulaire optimale sélectionnée, des enrobés sont préparés et évalués en employant au moins trois teneurs différentes en bitume. Pour cette phase, on pourra également employer l'appareillage Marshall ou la presse à cisaillement giratoire. Comme pour la méthode Superpave, l'analyse des taux de compaction obtenus pour ces différentes teneurs en bitume permettra d'évaluer la teneur en bitume optimale pour l'enrobé SMA.

Évaluation des propriétés du mortier bitumineux - On fait appel pour l'évaluation des propriétés du mortier bitumineux à des équipements et procédures développées récemment pour la caractérisation des bitumes dans le cadre du programme S.H.R.P. (Strategic Highway Research Program) : soit les essais DSR (Dynamic Shear Rheometer), BV (Brookfield Viscosimeter), BBR (Bending Beam Rheometer), procédures RTFOT (Rolling Thin Film Oxydation Test) et PAV (Pressure Aging Vessel). On a ainsi fixé une série d'exigences pour le comportement du mortier bitumineux pour chacun des appareils. Les caractéristiques rhéologiques du mortier bitumineux mesurées au DSR, au BV et au BBR sont évaluées à différents stades de vieillissement simulés et pour différentes conditions d'exposition. En effet, on étudie le mortier bitumineux à l'état original et après vieillissement à court et long terme et ce, à basse et haute températures.

Évaluation de la susceptibilité à l'eau et au saignement - L'enrobé formulé est testé pour sa résistance à l'eau (essai AASHTO T-283) et sa susceptibilité au saignement. À ce stade, un mélange non-conforme pour un ou l'autre de ces deux critères devra être modifié.

Une procédure de laboratoire simple a été spécialement développée pour évaluer la susceptibilité au saignement d'un enrobé SMA ; des critères d'acceptation ont été établis pour cet essai.

Sommairement, la procédure d'essai élaborée pour déterminer la susceptibilité au saignement de l'enrobé SMA est la suivante :

- Les constituants sont chauffés individuellement, puis malaxés pendant 2 minutes ;
- On transfère minutieusement l'enrobé malaxé dans un panier cylindrique grillagé à mailles carrées de $\frac{1}{4}$ de pouce ;
- Le panier contenant l'enrobé est déposé dans un four pré-chauffé et maintenu à 300°F (149°C) pendant 2 heures ;

- Des papiers pré-pesés sont placés dans le four, sous le panier, pour recueillir les coulées de mortier bitumineux. La valeur de perte par saignement est exprimée en faisant le rapport, en pourcentage, de la masse de mortier bitumineux recueilli au bout des 2 heures sur la masse initiale d'enrobé.

De plus, des études montrent une bonne corrélation entre le comportement réel sur le terrain et cet essai de laboratoire, c'est-à-dire que les enrobés qui présentent du saignement au chantier ne rencontrent pas les exigences pour l'essai.

1.6 Coût

Le coût de revient des enrobés SMA est plus élevée que celui des enrobés conventionnels (NAPA 1999 ; Rademaker 1996). Deux facteurs entrent en ligne de compte : les matières premières et la mise en œuvre (West 1995). Par contre, certaines caractéristiques coût/performance peuvent avantagez ce type d'enrobé.

En Europe, on considère généralement que pour les entrepreneurs expérimentés dans la production et la mise en place des enrobés SMA, ce matériau coûte de 10 à 20% de plus que pour un enrobé conventionnel (West 1995 ; AASHTO 1991). En Amérique, où les entrepreneurs sont beaucoup moins familiers avec cette technique, la surprise dépassait 20% sur plusieurs contrats.

1.6.1 Matières premières

Principalement en raison de sa teneur en bitume plus élevée et de la nécessité d'utiliser un agent stabilisant, le coût des matières premières pour la confection des enrobés SMA est sensiblement plus élevé que celui des enrobés conventionnels. L'utilisation de granulats de qualité supérieure est fortement recommandé (généralement on exige que les granulats fins et grossiers soient 100% concassés).

1.6.2 Mise en œuvre

Le coût de production des enrobés SMA est accru en raison de la forte cohésion du mortier bitumineux nécessitant alors plus d'énergie de chauffage pour assurer un bon enrobage des granulats. Les coûts de mise en place peuvent aussi être supérieurs. Les vitesses de production plus lentes des enrobés SMA sont responsables d'une partie du coût supplémentaire (West 1995, Rademaker 1996).

1.6.3 Coût/performance

La notion coût/performance fait appel ici à la performance globale d'un matériau ou d'un produit. Deux matériaux peuvent avoir le même prix de fabrication, mais un de ceux-ci peut être plus performant et durable que l'autre. Dans un tel cas, le choix du matériau à employer est facile. Par contre, il peut également arriver qu'on propose un nouveau matériau plus coûteux, mais possédant des caractéristiques de performance supérieures. Il faut alors mettre en perspective la notion de performance par rapport au coût de fabrication, soit le critère coût/performance pour juger si ce choix est avantageux à moyen ou long terme. Le problème se pose pour les enrobés SMA.

On veut ici uniquement mettre en relief quelques aspects importants à prendre en considération dans l'évaluation des coûts des enrobés SMA pour établir un critère coût/performance réaliste. Une étude plus détaillée serait nécessaire pour comparer quantitativement, au niveau du critère coût/performance, les enrobés SMA par rapport aux enrobés conventionnels.

Du côté de la mise en œuvre des enrobés SMA, la finition des joints peut être plus facile, la teneur en bitume élevée et la plus grande épaisseur du film de liant facilitant l'adhérence entre deux sections. De plus, la possibilité de poser avec succès l'enrobé SMA en couches relativement minces le rend avantageux. Également, sa performance, surtout en ce qui concerne la résistance à l'ornierage de fluage et sa durabilité, sont meilleures (Harris et Stuart 1995 ; Schmiedlin 1998 ; West 1995).

Compte tenu de leur durée de vie plus grande et des besoins réduits en entretien et en réparations, les expériences européennes montrent qu'à long terme, particulièrement dans le cas des revêtements de routes à trafic élevé ou lourd, les enrobés SMA constituent une solution plus économique que les enrobés denses conventionnels (*more cost effective*) (Brown et Manglorkar 1993 ; Brown et coll 1997A ; West 1995). L'expérience nord-américaine est encore trop récente pour fournir des chiffres précis à ce sujet, mais il n'y a pas de raison de croire qu'il en serait autrement.

1.7 Les constituants

Les propriétés et les performances des enrobés SMA sont tributaires des caractéristiques des matières premières, principalement des granulats. Le gros granulat, le granulat fin et le filler ont tous un rôle important à jouer dans le comportement des enrobés SMA.

1.7.1 Caractéristiques des granulats

1.7.1.1 Gros granulat et granulat fin

Dans presque tous les projets de chaussées en SMA, les granulats utilisés pour la confection, tant fins que grossiers, sont concassés (Brown 1993); c'est un des éléments qui permet la stabilité du squelette granulaire de l'enrobé SMA (Mogawer et Stuart 1995A ; NAPA 1999). L'incorporation d'une certaine proportion de sable naturel dans la fraction fine est toutefois envisageable dans certains cas sans perte de performance appréciable à l'omiérage (West 1995). Il faut toutefois que la fraction fine possède un coefficient d'angularité suffisant. La forme des particules du gros granulat doit également être contrôlée. La proportion de particules plates et allongées doit être limitée, puisque ces particules s'orientent difficilement lors de la compaction et réduisent ainsi la stabilité du squelette granulaire (Brown et coll 1997B ; Buchanan 2000). L'angularité du gros granulat a un effet important sur le volume des vides ; cette

caractéristique peut être évaluée indirectement par la détermination de la masse volumique du granulat pilonné à sec.

La ténacité du gros granulat constitue une autre caractéristique significative (Brown et coll 1997A); un granulat plus friable va se fragmenter davantage lors du compactage, modifiant ainsi la granulométrie du mélange (Mogawar et Stuart 1995B). Les granulats qui ont un indice de résistance à la fragmentation, tel que mesuré avec l'appareillage Los Angeles, supérieur à 30% sont problématiques à ce niveau (Brown et Haddock 1997). Cette valeur constitue souvent la limite d'acceptabilité suggérée même si on réussit (West 1995) à produire avec des granulats ayant un indice de résistance à la fragmentation supérieur à 30% des enrobés SMA résistants à l'omiérage. Le nombre de girations de design recommandé par la N.C.A.T. (N_{design}) pour l'essai à la presse à cisaillement giratoire est d'ailleurs fonction de la résistance à l'abrasion du gros granulat. En effet, un gros granulat plus fragile va davantage se fragmenter sous la consolidation ; la méthode de formulation de la N.C.A.T. prend en compte cet élément en utilisant un N_{design} différent pour les gros granulat moins résistant à la fragmentation.

1.7.1.2 Le filler

Différents types de filler minéraux ont été employés avec succès dans la confection des enrobés SMA : du calcaire, du marbre, des cendres volantes, de la craie, de la chaux, du diabase, des fines de récupération du système de dépoussiérage (« baghouse fines »), etc. La poussière de pierre calcaire reste toutefois le matériau le plus employé (Mogawar et Stuart 1996 ; West 1995). Les enrobés SMA produits avec des fines de récupération du système de dépoussiérage ont montré une plus faible susceptibilité au saignement. On attribue ce phénomène à la dimension inférieure des fillers provenant des unités de filtration.

Différentes études semblent toutefois montrer que la finesse du filler (définie par la quantité de matériau passant le tamis de 20 microns) n'influence pas de façon significative la consistance et les propriétés du mortier bitumineux (Brown et coll

1997B ; Haddock 1998). On n'a pas trouvé non plus de corrélation significative entre la surface spécifique du filler et les propriétés rhéologiques du mortier bitumineux. Par contre, l'indice des vides du filler, mesuré par l'essai Rigden, constitue une caractéristique significative (Brown et coll. 1997B). Les vides du filler sont tributaires de plusieurs facteurs, dont l'uniformité, la forme et l'angularité des particules (Kandhal 1998). Les fillers possédant plus de 50% de vides à l'essai Rigden produisent des mortiers excessivement rigides et difficiles à travailler. De tels fillers ne devraient pas être utilisés pour la production d'enrobés SMA (Brown et coll. 1997B).

1.8 Applications

La principale application des enrobés de type SMA a été jusqu'ici la réalisation de couches de roulement pour des routes à trafic élevé et lourd. Mais les enrobés SMA ont également été employés avec succès dans plusieurs autres situations (SMART 1999) : recouvrements de tabliers de ponts, arrêts d'autobus, zones de freinage aux intersections, couches de base (fondation), chaussées pour aéroports (pistes et approches), tunnels, approches des postes de péage, zones d'entreposage des containers, circuits de course automobile, etc.

1.9 Production et mise en œuvre des enrobés de type SMA

La production et la mise en œuvre des enrobés SMA, même si elle s'avère généralement sans problème majeur, peut exiger certaines adaptations ou modifications (NAPA 1999 ; Rademaker 1996), que ce soit pour les étapes de malaxage, de mise en œuvre, de compactage ou de réalisation des joints. Certains équipements ou méthodes peuvent également être plus adaptés à ce type d'enrobé.

1.9.1 Malaxage

Plusieurs aspects spécifiques sont soulignés dans la revue de la documentation quant au malaxage des enrobés SMA. Ainsi, les enrobés de type SMA peuvent être produits

dans les deux types de centrales conventionnelles, soit les centrales dites « à fournées » ou les centrales de type TSE « tambour-sécheur-enrobeur » et ce, sans problème majeur (Brown et Manglorkar 1993 ; Rademaker 1996).

Par rapport aux enrobés conventionnels, certains paramètres nécessitent des ajustements ou des modifications du procédé de malaxage : le dosage et le mode d'introduction du filler, la température et la durée du malaxage, l'introduction des fibres. Ces différents éléments seront traités brièvement dans cette section.

Dosage et mode d'introduction du filler - Puisque pour les enrobés SMA la proportion de filler est plus importante que pour les enrobés conventionnels, le dosage en filler peut s'avérer critique, compte tenu du fait que les usines ne sont pas conçues pour répondre à une telle demande en filler. La vitesse de production en usine peut donc être réduite (Brown et Haddock 1997 ; Brown 1993). De plus, l'addition du filler doit être effectuée de façon appropriée, pour éviter qu'il ne soit entraîné par le système de dépoussiérage. Autrement, le dosage en particules fines dans l'enrobé sera incorrect et le système de dépoussiérage deviendra rapidement saturé (Haddock 1998).

Température de malaxage - La température de malaxage requise des enrobés SMA est souvent plus élevée à cause d'une plus forte proportion de filler et de la présence de fibres augmentant ainsi la cohésion du mortier bitumineux. Il faut toutefois éviter les températures trop élevées qui risquent d'entraîner une oxydation plus rapide et la dégradation du bitume, de même qu'une augmentation des émissions polluantes dans l'atmosphère.

Durée du malaxage - La durée requise pour le malaxage des enrobés SMA est généralement un peu plus longue que pour un enrobé conventionnel. Ce temps supplémentaire est souvent nécessaire pour permettre une bonne distribution des fibres et un enrobage adéquat (Brown et Manglorkar 1993).

Introduction des fibres - Outre l'augmentation du temps de malaxage, l'addition en usine de fibres ne représente pas de problèmes importants, que ce soit pour les fibres minérales ou végétales. Deux méthodes ont été employées, soit les introduire à l'état lâche, en vrac, dans l'unité de malaxage (en général à sec avec un système d'alimentation séparé ou encore dans des sacs fusibles), ou encore les incorporer sous forme de pastilles (les fibres y sont liées avec du bitume qui fond lors du malaxage et libère les fibres) (Brown et Haddock 1997). Dans le premier cas, il risque d'y avoir une perte de fibres par l'unité de dépoussiérage ; il faut s'assurer que les fibres sont incorporées dans l'enrobé plutôt qu'entrainées dans le système de dépoussiérage par la circulation rapide des gaz dans le tambour.

On a récemment (Paradis 2001) expérimenté au Québec des enrobés avec des fibres d'amiante en employant un bitume « fillérisé ». Dans ce cas, les fibres d'amiante sont incorporées au bitume à raison d'une teneur de l'ordre de 3 à 4%. Les concentrations de fibres utilisées dans ces projets sont beaucoup plus faibles que dans le cas où on utilise les pastilles et elles ne permettent pas l'obtention du taux de fibres suffisant pour stabiliser des enrobés SMA.

1.9.2 Mise en place des enrobés de type SMA

La mise en place des enrobés SMA par temps froid est critique et non recommandée. En fait, on devrait éviter les situations où la température du substrat est inférieure à 10°C pour éviter un refroidissement trop rapide de l'enrobé nuisant ainsi aux opérations de compactage. Pour la même raison, on suggère de s'assurer que les durées de transport soient réduites. Les revêtements réalisés en enrobés SMA ont en moyenne été posés sur une épaisseur d'environ 1,5 pouce (ou 38 mm) (Brown et coll 1997A). On a toujours employé des finisseuses conventionnelles. Le taux de compaction de l'enrobé à la sortie du finisseur est tout à fait acceptable, de l'ordre de 88%. Dans la très grande majorité des projets, l'enrobé SMA présentait à la sortie du finisseur une surface uniforme, quoique assez rugueuse, nécessitant très peu de corrections manuelles. En fait, il faut éviter autant que possible ces corrections car

l'enrobé SMA est très collant ; le cas échéant, il faut procéder avec grand soin (Brown 1993 ; Rademaker 1996).

1.9.3 Compaction

Le taux de compaction idéal pour les enrobés SMA devrait se situer entre 93 et 95% (Brown et Haddock 1997). Le compactage des enrobés SMA peut s'avérer difficile pour les entrepreneurs ayant peu d'expérience avec ce type d'enrobé puisque ces enrobés ont une forte teneur en gros granulats, que les granulats fins et grossiers sont 100% concassés et que le mortier bitumineux est très cohésif. Il s'en suit que les enrobés SMA sont sensiblement plus difficiles à travailler. Avec une certaine expérience, les entrepreneurs arrivent assez facilement à s'adapter et à mettre en place les enrobés SMA et à les compacter convenablement (Brown et Haddock 1997). Il est à noter que l'enrobé SMA se déplace peu sous les rouleaux des compacteurs comparativement à un enrobé conventionnel. Notamment, l'épaisseur de l'enrobé de type SMA diminuera de 10 à 15% lors du compactage comparativement à 20 ou 25% pour un enrobé conventionnel.

Les enrobés SMA deviennent très difficiles à compacter lorsqu'ils refroidissent trop ; pour cette raison et étant donné qu'on pose le plus souvent les enrobés SMA sur des épaisseurs relativement faibles, favorisant ainsi un refroidissement rapide, on suggère que l'équipement de compaction suive de très près le finisseur. La vitesse des rouleaux ne devrait également pas excéder 5 km/h.

Tous les types de rouleaux ont été expérimentés, avec un taux de succès variable toutefois. Les rouleaux d'acier statiques ont donné les meilleurs résultats. Les rouleaux d'acier vibrants ont bien fonctionné sur certains projets alors que sur d'autres projets, ils avaient tendance à provoquer du ressusage et à fragmenter une portion importante des gros granulats (Brown 1993). Les rouleaux d'acier vibrants devraient être employés avec une fréquence élevée et une amplitude faible. Un agent doit souvent être ajouté à l'eau pour éviter que le mortier bitumineux ne colle aux cylindres d'acier.

Les rouleaux pneumatiques ont souvent donné un rendement inacceptable avec les enrobés SMA dû au fait que le mortier bitumineux collait de façon excessive aux pneumatiques, particulièrement lorsqu'on employait un bitume renforcé de polymères, produisant ainsi une surface inégale (Brown et Manglorkar 1993). En Europe, les rouleaux d'acier statiques sont standards pour la compaction des enrobés SMA ; on suggère que ceux-ci aient une masse minimale de 10 tonnes (Brown et Manglorkar 1993). La compaction d'un enrobé SMA devrait s'effectuer lorsque la température de celui-ci se situe entre 130 et 150°C, soit une température un peu plus élevée que pour un enrobé conventionnel.

1.9.4 Réalisation des joints

Avec les enrobés SMA, il n'est pas nécessaire de chauffer les joints pour s'assurer d'une adhérence entre deux sections de revêtement ; cela s'explique par la teneur en bitume plus élevée et l'épaisseur plus grande du film de bitume qui permettent d'obtenir un lien plus stable entre deux sections. Par contre, les observations réalisées lors de la mise en oeuvre de joints longitudinaux avec des enrobés SMA sur certains projets américains ont permis de constater que leur apparence était souvent moins satisfaisante qu'avec des enrobés conventionnels (Brown et Haddock 1997). Les experts ont attribué ce phénomène, à l'instar des difficultés rencontrées quelquefois lors de la compaction, à la même combinaison de trois facteurs spécifiques aux enrobés SMA : la forte proportion de gros granulat, le fait que les granulats sont 100% concassés et la forte cohésivité du mortier bitumineux (Brown et Haddock 1997). La qualité des joints réalisés lors de ces différents projets était très variable, allant d'excellente à insatisfaisante ; la plupart des entrepreneurs avaient une expérience très limitée de ce type d'enrobé (Brown et Haddock 1997).

Sur plusieurs projets réalisés avec des enrobés SMA, les joints longitudinaux étaient plus ouverts que ce qu'on observe habituellement avec des enrobés conventionnels, mais l'apparence demeurait le plus souvent acceptable et les joints ne semblaient pas se dégrader au fil des années. On croit que, comme pour la compaction, la qualité de

la réalisation des joints longitudinaux est d'autant meilleure que l'entrepreneur responsable du projet a de l'expérience avec la production et la mise en œuvre des enrobés SMA (Brown et Haddock 1997).

1.9.5 Uniformité de l'enrobé en place

Les enrobés de type SMA semblent mieux performer que les enrobés conventionnels en ce qui concerne la ségrégation (Brown et Haddock 1997). Dans un enrobé conventionnel, on observe quelquefois qu'une proportion des grosses particules a tendance à se séparer du mélange ; il peut y avoir une concentration locale de grosses particules, particulièrement à la fin d'un chargement de camion. Ce phénomène est moins fréquent chez les enrobés SMA. Toutefois, à cause de la cohésivité accrue du mortier bitumineux, l'enrobé SMA a davantage tendance à coller aux parois des bennes du camion, particulièrement lorsqu'on utilise un bitume polymère.

Par contre, on a observé sur un certain nombre de projets une forme spécifique de ségrégation, soit le ressuage du bitume, également appelé saignement. En effet, l'apparition de zones de ressuage en surface du revêtement a été notée plus souvent que pour les enrobés conventionnels (Brown et Haddock 1997). Ces zones de ressuage (fat spots) variaient beaucoup en dimension, de quelques centimètres de diamètre dans certains cas à quelques centaines de mètres de longueur dans les cas plus extrêmes. Les cas les plus graves de ressuage ont entraîné des problèmes d'omiérage. Le ressuage est principalement causé par une mauvaise formulation : teneur en bitume élevée, teneur insuffisante en agent stabilisant ou vides interstitiels trop faibles (Brown et Haddock 1997). Cette propension au saignement a nécessité l'élaboration spécifique d'une méthode de laboratoire fiable pour l'évaluation de la susceptibilité au ressuage des enrobés SMA. Toutefois, les relevés visuels montrent que, globalement, les enrobés de type SMA en place présentent une bonne uniformité, même si leur texture de surface est sensiblement plus grossière que celle d'un enrobé conventionnel.

1.9.6 Comportement à moyen et long terme

Dans une importante proportion des projets, les enrobés SMA ont été mis en place comme couche de resurfaçage sur des autoroutes à fort débit. Dans certains cas, les enrobés SMA étaient posés sur des chaussées existantes âgées présentant au moment de la réfection des fissures importantes ou des joints longitudinaux endommagés. Lors d'inspections visuelles de contrôle, on a remarqué relativement peu de fissures de réflexion sur ces chaussées (Brown et Haddock 1997). Même dans les cas où on a observé de la fissuration de réflexion, les fissures sont demeurées étroites et on n'y a pas remarqué de dégradation de celles-ci (*raveling*). On peut expliquer cette performance par la teneur en bitume plus élevée permettant le resoudage ou l'auto-guérison des fissures par temps chaud et par l'ajout d'un agent stabilisant (fibres ou polymères). On n'a pas remarqué non plus de problème significatif de fissuration thermique.

1.10 Sommaire de la revue de la documentation

Le squelette granulaire permettant un contact pierre sur pierre constitue probablement la principale caractéristique spécifique aux enrobés SMA. La combinaison granulaire requise pour obtenir ce squelette granulaire rend l'enrobé plus susceptible au phénomène de saignement du bitume. La présence d'un agent stabilisant et d'une proportion importante de filler sont nécessaires pour augmenter la cohésivité du mortier bitumineux et éviter le saignement.

Le squelette joue un rôle majeur dans le comportement sous charge de l'enrobé SMA, favorisant ainsi une meilleure résistance à l'omiérage de fluage. Comparativement à un enrobé conventionnel, l'enrobé SMA présente également des avantages en ce qui concerne les propriétés de surface. De plus, la performance sur route des enrobés SMA a clairement été montrée dans de nombreux projets sur les cinq continents.

CHAPITRE 2

CONCEPTION ET CHOIX DES CONSTITUANTS POUR LA CONFECTIION D'UN ENROBÉ SMA

2.1 Introduction

Il convient de traiter des notions liées à la conception. Le chapitre 2 présente la réflexion issue de la revue de la documentation pour établir les critères pour la conception et le choix des constituants pour la confection d'un enrobé SMA.

D'une façon générale, la conception d'un enrobé bitumineux comporte deux phases principales : la définition des critères de conception et le choix des constituants. En effet, il faut d'abord fixer des critères de conception pour établir les caractéristiques et critères recherchés. Ces critères sont établis en fonction du type d'enrobé et de la nature de l'application choisie. Par la suite, il faudra effectuer le choix des constituants et de leurs proportions en regard aux critères de conception. Cette dernière partie, soit la formulation, doit permettre à l'enrobé bitumineux de rencontrer les critères de conception établis au départ.

2.2 Critères de conception

Les critères de conception diffèrent d'un enrobé à l'autre ; par exemple, on conçoit facilement que les critères de conception soient très différents pour un enrobé drainant comparativement à ceux d'un enrobé à haut module. Les enrobés SMA ont donc eux-aussi des critères de conception spécifiques. Également, étant donné que ce type d'enrobé peut servir à différents usages, il faut que ceux-ci soient adaptés à la fonction prévue. Ainsi, l'importance de la texture et des propriétés de surface n'est pas la même, par exemple, pour un enrobé SMA utilisé en couche de roulement pour une

autoroute à vitesse élevée que pour un enrobé SMA conçu pour une surface d'entreposage de containers.

Les critères de conception peuvent être classés en trois catégories : les critères de conception d'ordre technique, les critères de conception d'ordre sécuritaire et les critères de conception d'ordre économique. Les critères de conception d'ordre technique et sécuritaire sont essentiellement liés à la performance attendue des enrobés SMA dans le cadre de cette recherche. Les critères de conception d'ordre économique visent surtout à créer des balises de façon à ce que les enrobés SMA formulés dans cette étude soient économiques à produire. Nous traiterons en détails chacun de ces aspects.

2.2.1 Aspects techniques

Dans le cadre de cette recherche, nous avons fixé l'usage de l'enrobé SMA à celui d'une couche de roulement ou de resurfaçage pour des routes à trafic élevé ou lourd. Les aspects techniques de la conception d'un enrobé SMA sont des paramètres qui vont nous permettre de juger de la validité d'une formulation étudiée en laboratoire en prévision de la performance ciblée de l'enrobé sur route. Dans cette optique, nous traiterons des aspects techniques qui soutiennent cet usage. Deux aspects seront ici étudiés : la performance lors de la mise en œuvre et la résistance.

2.2.1.1 La performance lors de la mise en œuvre

Un enrobé bitumineux, qu'il soit de type SMA ou non, doit pouvoir se mettre en place sans problème, en restant homogène et avec un taux de compaction optimal. La performance ultérieure de l'enrobé et sa durabilité sont fortement tributaires de son taux de compaction. Un enrobé trop compact, ou encore insuffisamment compacté, présentera une performance inférieure. De la même façon, un enrobé non homogène présentera une performance variable. On entend ici par homogénéité, la répartition uniforme de la masse granulaire et du mortier bitumineux au sein de l'enrobé. Deux

paramètres ont donc été établis pour juger en laboratoire de la performance de l'enrobé à sa mise en œuvre : l'homogénéité et l'aptitude au compactage.

L'homogénéité — Le manque d'homogénéité d'un enrobé bitumineux se manifeste par de la ségrégation. Un enrobé SMA peut présenter principalement deux formes de ségrégation : 1) une mauvaise répartition des phases gros granulat/mortier lors du malaxage et 2) un saignement du bitume lors de la mise en œuvre, plus spécifiquement au transport et lors de la compaction. On comprendra facilement qu'il est difficile d'évaluer, tout au moins quantitativement, l'homogénéité de l'enrobé. Toutefois, les caractéristiques spécifiques de l'enrobé SMA nous obligent à prendre en considération cet aspect.

Le problème de saignement du bitume est typique de ce type d'enrobé. Il a été convenu d'observer attentivement l'aspect des enrobés SMA produits en laboratoire, et ce aussi bien lors des opérations de malaxage que lors de celles de compaction. Même si cette évaluation visuelle reste subjective, il est important de mettre en perspective les enrobés SMA susceptibles à la ségrégation.

L'aptitude au compactage — De la même façon que pour les enrobés conventionnels, les enrobés SMA doivent se mettre en place et être consolidés de façon à présenter un taux de compaction optimale. Un enrobé bitumineux trop compacté sera moins apte à supporter la dilatation thermique du bitume rencontrée lors des températures élevées d'été et pourra alors présenter une remontée du bitume en surface, le saignement. Sans compter que le passage répété des véhicules a pour effet de densifier l'enrobé et de réduire progressivement le volume des vides résiduels, nécessaires pour éviter le saignement.

D'autre part, un enrobé bitumineux insuffisamment compacté continuera de se densifier sous l'effet du passage des véhicules et sera plus susceptible à l'orniérage de compaction. De plus, la présence d'une plus grande quantité de vides interstitiels (Vi%) dans un enrobé sous-compacté rendra celui-ci plus perméable et moins durable. Il y a donc lieu d'établir des exigences précises face à ce critère de performance.

Dans les faits, les enrobés SMA risquent d'avantage d'être insuffisamment compactés que d'être sur-compactés. En effet, les combinaisons granulaires employées, la forte angularité des particules et la viscosité plus grande du mortier bitumineux font en sorte que ces enrobés sont plus difficiles à compacter que les enrobés bitumineux conventionnels. De plus, le fait qu'ils soient souvent posés en couches plus minces se traduit par un refroidissement plus rapide lors de la mise en place, lequel rend la compaction plus difficile.

Dans l'évaluation en laboratoire de l'aptitude au compactage d'un enrobé, deux principales approches peuvent être utilisées : 1) la consolidation par la méthode Marshall et 2) la consolidation à l'aide de la presse à cisaillement giratoire, la PCG. Il est bon de souligner que les briquettes consolidées selon la méthode Marshall vont servir à évaluer la stabilité et le fluage de l'enrobé, essais retenus pour estimer la performance à l'orniérage de l'enrobé sur route.

L'usage de la presse à cisaillement giratoire devient de plus en plus généralisé ; ainsi, au Québec, dans le reste du Canada, aux États-Unis et en France, entre autres, la PCG est maintenant devenue un outil de design essentiel pour la formulation des enrobés bitumineux. Plusieurs études ont clairement montré la performance de la presse à cisaillement giratoire à évaluer l'aptitude au compactage des enrobés bitumineux (Mallick et coll 1998).

Une question s'impose : puisque dans certains pays, comme l'Allemagne, on utilise la méthode Marshall pour la formulation d'enrobés SMA, quelle méthode devrions-nous préconiser ?

L'ancienne méthode standardisée de compaction des éprouvettes par la méthode Marshall ne donne pas toujours des résultats qui ont une bonne corrélation avec la réalité. En effet, les taux de compaction après la consolidation en laboratoire des éprouvettes selon la méthode Marshall peuvent être très différents de ceux obtenus au chantier après un cylindrage standard sur chaussée. En fait, la compaction selon la

méthode Marshall s'effectue par impact, par chocs, alors que l'action des rouleaux compacteurs utilisés au chantier donne lieu à une consolidation par pétrissage. La PCG se distingue à ce niveau, puisque la compaction de l'enrobé s'effectue sous l'action d'un pétrissage, assez semblable à celui engendré par les équipements de cylindrage. En cours d'essai à la PCG, seule une fraction de la surface de l'enrobé est soumise à la pression de compactage à un instant donné. Ce type de compaction, appliquée d'une façon qu'on pourrait qualifier de cyclique, est plus représentatif de l'action des rouleaux au chantier.

Certains enrobés vont se compacter très peu efficacement avec la méthode de consolidation employant le marteau Marshall. C'est notamment le cas des enrobés SMA où une telle consolidation par chocs se traduit souvent par un taux de compaction relativement médiocre : la proportion de vides interstitiels (Vi%) est sensiblement élevée. Dans d'autres cas, les taux de compaction obtenus se rapprocheront beaucoup plus de la réalité. On considère généralement que le degré de compaction par le procédé d'impact est inversement proportionnel à l'angularité des granulats et à la proportion de gros granulats dans l'enrobé. Or, on sait que ces deux caractéristiques sont maximisées dans les enrobés SMA. On peut comprendre que la méthode Marshall est peu appropriée pour la compaction des enrobés SMA, même si certains organismes l'emploient encore pour la formulation de ces enrobés.

La photo présentée à la figure 2.1 montre les écarts de compaction d'échantillons du même enrobé à matrice de pierre compactés en laboratoire à la PCG et selon la méthode Marshall. Les différences sont claires : la texture superficielle et la porosité sont nettement plus grossières pour la briquette produite avec la méthode Marshall comparativement à celle réalisée avec la PCG.

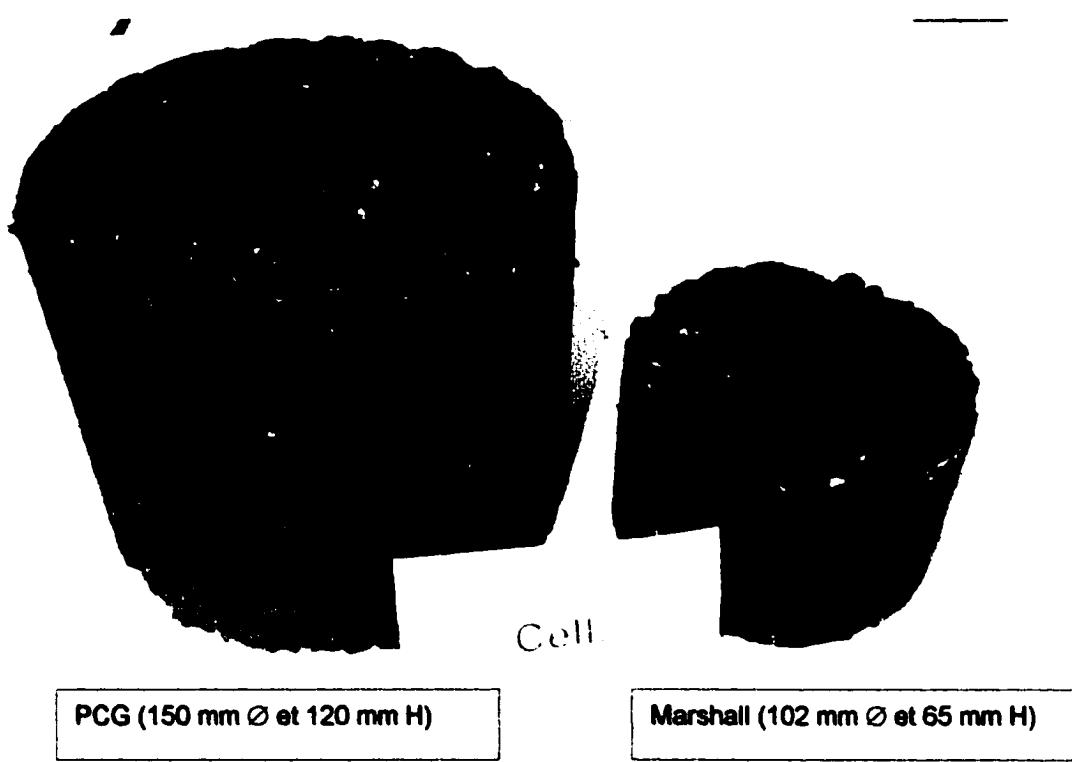


Figure 2.1 Échantillons d'un même enrobé SMA consolidés a) à la PCG ; b) selon la méthode Marshall (source : enrobé SMA avec 70% de refus au 5 mm, 10% de tamisat au 80 μ m, V_{bs} de 14,5% et 0,3% de fibres de cellulose).

En définitive, la revue de la documentation nous conduit à utiliser la presse à cisaillement giratoire pour évaluer l'aptitude au compactage des enrobés SMA. De ce choix, découle une question fondamentale, nettement plus délicate à répondre : quelles devraient être les exigences requises ?

La détermination des critères d'acceptation et des niveaux de compaction de référence pour l'essai à la PCG pose effectivement un problème. En effet, il est probablement inapproprié d'appliquer à un enrobé SMA les mêmes valeurs que pour un enrobé conventionnel. D'une part, la revue de la documentation a clairement montré qu'un enrobé SMA, compte tenu de la présence d'un agent stabilisant, d'une proportion

élevée de filler et de l'utilisation de granulats grossiers et fins concassés à 100%, se compacte plus difficilement qu'un enrobé conventionnel. D'autre part, comparativement à un enrobé conventionnel fabriqué avec un gros granulat de la même dimension nominale, un enrobé SMA peut être posé sur une épaisseur plus faible. Or, on sait que, pour un enrobé donné et pour une énergie de compaction fixe, le niveau de compaction obtenu est en partie tributaire de l'épaisseur de pose d'un enrobé. Ces deux différences font qu'on doit s'interroger sur les valeurs à employer pour l'essai de détermination de l'aptitude au compactage à la PCG.

Rappelons que les normes du MTQ spécifient une valeur de 80 girations pour N_{design} pour les enrobés conventionnels confectionnés à partir d'un gros granulat de 10 mm de dimension nominale. Dans le cas des enrobés fabriqués avec un gros granulat de 14 mm et posés sur de plus grandes épaisseurs, la valeur fixée de N_{design} est fixée à 100 girations. Toujours pour un enrobé conventionnel, le niveau exigé de compaction de l'enrobé à la PCG est de 4 à 7% de vides à N_{design} , quelle que soit la valeur de celui-ci.

La pente de la courbe obtenue à partir de l'essai à la PCG (%vides vs nombre de girations) nous permet visuellement d'apprécier comment un enrobé se compacte. Ainsi, plus un enrobé se compacte facilement, plus la courbe va s'aplatir rapidement. Des tests comparatifs ont montré qu'à une valeur intermédiaire de compaction (par exemple, à 80 girations), un enrobé SMA aura généralement une pente plus forte qu'un enrobé conventionnel, ce qui sous-tend qu'il se compacte plus difficilement. Or, il faut que l'enrobé SMA soit mis en place sur chaussée avec un niveau de vides interstitiels comparable à celui d'un enrobé conventionnel, sinon sa performance et sa durabilité seront réduites.

Pour tenir compte de la spécificité des enrobés SMA, et en vue de conserver une certaine uniformité avec les exigences du MTQ qui spécifient qu'on vise un niveau de vides à la PCG compris entre 4 et 7% après N_{design} girations, il a été décidé, dans le cadre de cette recherche, de conserver la même exigence de vides, mais de plutôt réévaluer la valeur de N_{design} . Si on veut un enrobé SMA qui se compacte plus

facilement, il faudra réviser à la baisse la valeur de N_{design} car dans un tel cas, l'enrobé atteindra plus rapidement le niveau de compaction de référence, c'est-à-dire ici 4 à 7% de vides.

Le critère de l'épaisseur de pose nous incite également à réévaluer à la baisse la valeur de N_{design} car plus un enrobé est posé sur une couche mince, plus la valeur fixée pour N_{design} devrait être faible ; c'est le cas de l'enrobé ESG-10 comparativement à l'enrobé ESG-14. Cette relation a été démontrée sur chantier et plusieurs facteurs peuvent l'expliquer. Un élément primordial est qu'un enrobé posé sur une épaisseur plus faible refroidit plus rapidement et devient alors plus difficile à compacter. Un enrobé posé en couche plus mince, doit donc être plus compactable, c'est-à-dire se compacter plus rapidement sous une énergie de compactage donnée.

Il semble donc clair qu'un enrobé SMA, de part son squelette granulaire spécifique et son utilisation possible en couche plus mince, requiert une valeur de N_{design} plus faible. Toutefois, il est difficile d'évaluer précisément la valeur la plus appropriée. On sait que, théoriquement, le niveau de compaction obtenu à la PCG après N_{design} girations devrait correspondre au niveau de compaction obtenu après la compaction au chantier : les exigences de vides interstitiels de 4 à 7% correspondent en effet à des niveaux de compaction typiques en chantier.

Dans le cadre de cette recherche, il a été décidé de fixer, de façon arbitraire, à 60 girations la valeur de N_{design} . Rien ne permet d'affirmer qu'il s'agit de la valeur la plus appropriée ; toutefois, une valeur doit être pris en compte pour l'évaluation de la conformité des enrobés SMA lors du test de détermination de l'aptitude au compactage. Seule la réalisation de planches d'essai en chantier, prévue dans la phase 4 de cette recherche, permettra de vérifier la pertinence d'un tel choix et sa réévaluation éventuelle.

En ce qui concerne les exigences à N_{init} et à N_{final} girations, les enrobés normalisés du MTQ partagent tous les mêmes critères, soit un minimum de 11% de vides à 10 girations (N_{init}) et un minimum de 2% de vides à 200 girations (N_{final}). Il a été décidé,

de façon arbitraire, de conserver les mêmes critères d'acceptation pour les enrobés SMA confectionnés dans le cadre de cette recherche.

Le guide de réalisation des enrobés Médiflex proposait des exigences de performance à la PCG. On demandait que l'enrobé ait au moins 9% de vides à 10 girations (i.e. $N_{initial}$) et des vides compris entre 6 et 12% à 40 girations.

L'essai de détermination de l'aptitude au compactage par la presse à cisaillement giratoire (PCG) sera donc un indicateur approprié pour évaluer ce critère technique de conception. Il faut par contre établir les critères d'acceptation pour le test à la PCG. Compte tenu qu'il existe, pour les différents enrobés formulés avec la méthode LC, une uniformité quant aux valeurs cibles de compacité à des niveaux de $N_{initial}$, N_{design} et N_{final} girations, nous avons décidé de conserver ces mêmes valeurs. Dans le cadre de cette étude, les valeurs cibles pour l'essai à la PCG seront donc les suivantes : une teneur en vides supérieure ou égale à 11% à $N_{initial}$ girations, comprise entre 4 et 7% à N_{design} girations et supérieure ou égale à 2% à N_{final} girations.

2.2.1.2 La résistance

La résistance d'un enrobé peut être mesurée de différentes façons, selon le type de résistance qu'on cherche à évaluer : résistance à la déformation sous charge, résistance à l'orniérage, résistance au désenrobage, résistance à l'arrachement, résistance à la fissuration thermique, etc. Compte tenu qu'il s'agit d'une étude exploratoire et qu'à priori nous nous devons de valider les hypothèses retenues qui ont servi à définir les exigences fixées à la PCG, nous limiterons notre étude à l'étude de la résistance à l'orniérage.

Divers équipements existent pour évaluer en laboratoire la résistance à l'orniérage d'un enrobé. Ces appareils permettent une évaluation accélérée en laboratoire du potentiel d'orniérage des enrobés. Les résultats obtenus avec ces appareils présentent généralement une bonne corrélation avec l'orniérage réel des enrobés sur chaussée. Parmi les appareils disponibles, on peut nommer l'orniéreur du LCPC (Laboratoire

Central des Ponts et Chaussées), l'omiéreur de Georgie (*Georgia loaded wheel tester*), l'analyseur de pavage bitumineux (*asphalt pavement analyser*), l'omiéreur de Hambourg (*Hamburg wheel tracking device*), l'omiéreur de Purdue (*Purdue University laboratory wheel tracking device*) et le simulateur mobile de charge (*model mobile load simulator*). L'essai Marshall mesure également la déformation de l'enrobé par fluage qui constitue une des principales sources d'omiérage.

Il a été démontré que pour un enrobé SMA, les résultats de la mesure de la stabilité et du fluage sous charge selon les dispositions de la méthode Marshall présentent très peu de corrélation vis-à-vis de la performance réelle *in situ*. Très souvent, les enrobés SMA ne rencontrent pas les exigences normales de stabilité et de fluage prévues alors qu'en pratique ils ont une excellente performance à l'omiérage et des déformations plastiques très faibles. Même en Allemagne, où la méthode Marshall est encore la plus couramment employée pour la formulation des enrobés bitumineux, on ne spécifie pas d'exigences minimales pour la stabilité et le fluage des enrobés SMA.

La principale fonction visée pour les enrobés SMA demeure la résistance à l'omiérage. La détermination de la résistance à l'omiérage s'avère donc un critère technique tout à fait approprié pour l'évaluation de la performance mécanique réelle de l'enrobé dans des conditions de chargement semblables à celles imposées par le trafic.

Pour évaluer cette propriété, l'omiéreur de laboratoire du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées est généralement considéré comme un instrument efficace. Les valeurs cibles utilisées dans le cadre de cette recherche seront les mêmes que celles imposées par le MTQ pour un enrobé conventionnel confectionné avec un gros granulat de 10 mm de dimension nominale, soit une déformation moyenne inférieure à 10% après 1000 cycles et une déformation moyenne inférieure à 20% après 3000 cycles. Ces exigences sont celles qui s'appliquent pour un enrobé posé en couche de roulement sur une route à trafic élevé.

2.2.2 Sécurité

Compte tenu de l'application ciblée des enrobés SMA, la sécurité est un facteur important à considérer. La sécurité des usagers est directement liée aux caractéristiques de surface de l'enrobé. Il faut donc s'assurer que la rugosité de surface de l'enrobé soit appropriée pour cet usage. En situation de pluie, un enrobé bitumineux dont la texture superficielle est trop fermée aura de la difficulté à évacuer l'eau à l'interface pneumatique/chaussée. Cette problématique réduit la sécurité des usagers et peut même éventuellement causer le phénomène d'aquaplanage, c'est-à-dire la perte quasi-totale d'adhérence du véhicule due à la présence d'une mince pellicule d'eau entre la chaussée et les pneumatiques. Les enrobés SMA présentent généralement une texture superficielle plus grenue que les enrobés conventionnels et devraient être plus sécuritaires que les enrobés conventionnels. Par ailleurs, les enrobés bitumineux à la texture excessivement ouverte, tels les enrobés drainants, même s'ils sont sécuritaires en situation de forte pluie, requièrent l'hiver un taux d'épandage d'abrasifs sensiblement plus important.

Dans le cadre de cette recherche, deux façons sont envisagées pour évaluer la rugosité superficielle des enrobés SMA : l'examen visuel et la détermination de la hauteur de sable. L'examen visuel, même s'il reste subjectif, permet d'évaluer rapidement et simplement la rugosité superficielle des enrobés. Elle permet également de comparer qualitativement les différentes formulations entre elles. L'examen visuel constituera ici la façon privilégiée d'évaluer en laboratoire la texture superficielle des enrobés SMA. Nous viserons à produire un enrobé exempt de ségrégation et de saignement avant et après compactage.

Par ailleurs, l'essai de détermination de la hauteur de sable permet d'évaluer quantitativement la macrotexture de l'enrobé posé sur chaussée. Dans le cadre de la phase finale de cette recherche où on réalisera en chantier des planches d'essai, la détermination de la hauteur de sable permettra d'évaluer *in situ* la texture de l'enrobé SMA. Compte tenu des applications prévues et en fonction des valeurs répertoriées dans la revue de la documentation, il est raisonnable de cibler pour l'enrobé SMA une

valeur de 1,0 mm ou plus à l'essai de hauteur de sable ; cette dernière valeur est supérieure à la majorité des résultats obtenus pour les enrobés bitumineux conventionnels.

2.2.3 Économie

Pour être compétitifs, les enrobés SMA doivent présenter pour le maître d'ouvrage des économies à court, moyen ou long terme. Les aspects économiques liés aux enrobés SMA peuvent être séparés en quatre catégories : le coût de production, les économies associées associées au taux de pose, les coûts associés à l'entretien et à la réparation et les économies reliés à la vie utile du revêtement. Ces éléments ne sont pas nécessairement compatibles entre eux, c'est-à-dire que le fait de chercher à minimiser à tout prix le coût de production peut se transposer à un autre niveau, comme par exemple par une augmentation des coûts d'entretien et une diminution de la durée de vie de l'enrobé.

2.2.3.1 Coût de production

On associe le coût de production au coût des matières premières et à celui de la fabrication. Il serait irréaliste de viser, pour les enrobés SMA, un coût de production égal ou inférieur à celui d'un enrobé bitumineux conventionnel, compte tenu de la teneur élevée en bitume requise et de la nécessité d'utiliser un agent stabilisant. De plus, à cause des températures de malaxage plus élevées, les coûts d'énergie associés à la production d'un enrobé SMA sont également plus grands.

On doit viser un coût de production le plus bas possible, tout en respectant les impératifs de qualité et de sécurité visés. La façon la plus simple d'y arriver est d'utiliser comme liant un bitume conventionnel plutôt qu'un bitume polymère. Un bitume polymère peut coûter deux fois plus cher qu'un bitume standard. En effet, l'expérience québécoise a montré (Langlois, 2000) qu'un enrobé SMA fabriqué avec un bitume conventionnel et utilisant des fibres comme agent stabilisant peut s'avérer

très performant face aux écarts de température des conditions extrêmes d'été et d'hiver.

Vu les performances recherchées par rapport à la résistance à l'orniérage et à la sécurité, il serait inopportun de réduire les exigences de qualité des granulats, même si une telle action nous permettrait de réduire quelque peu le coût de production de l'enrobé.

2.2.3.2 Les économies associées au taux de pose

Il est possible de poser les enrobés SMA sur des épaisseurs plus faibles. En effet, sur certains projets, on a réussi à réaliser des revêtements satisfaisants en enrobé SMA ayant une épaisseur inférieure à celle prévue pour une même application en enrobé conventionnel comportant des gros granulats de même classe granulaire. Évidemment, il y a une limite physique puisque l'épaisseur de pose est tributaire de la dimension maximale du granulat employé dans l'enrobé : plus la dimension nominale maximale du gros granulat est grande, plus l'épaisseur minimale de pose de l'enrobé est élevée.

Plusieurs raisons permettent une application plus mince des enrobés SMA, notamment le fait que ceux-ci soient résistants à l'orniérage et à la fissuration thermique. La présence de fibres permet également de réduire la réflexion des fissures au niveau du revêtement. De plus, l'épaisseur importante du film de bitume effectif (associée à une teneur en bitume élevée) permet une certaine « auto-guérison » des fissures, c'est-à-dire que par temps chaud, la dilatation thermique du bitume fait que les fissures se referment et l'enrobé se ressoude littéralement.

Il est toutefois difficile de chiffrer l'économie possible associée au taux de pose. Dans le cas d'une construction neuve, une diminution de l'épaisseur de la couche de roulement en enrobé SMA est possible ; par contre, pour conserver la même capacité structurale pour l'ensemble de la chaussée, il faudra augmenter l'épaisseur d'un autre constituant de la chaussée, soit la couche bitumineuse de base ou encore la fondation

granulaire. Ainsi, une bonne partie de l'économie associée au revêtement est amoindrie par cette contrainte. Également, il va sans dire que des contraintes de fatigue doivent être prises en considération pour la détermination des épaisseurs minimales d'enrobé dans le cas des structures neuves. Lorsque l'enrobé SMA est installé en couche de resurfaçage sur une chaussée ayant déjà une capacité structurale suffisante, alors des économies plus marquées sont possibles par une épaisseur de pose réduite.

Encore une fois, il est important de souligner que la tendance à faire des économies en produisant un enrobé SMA plus « pauvre », c'est-à-dire avec une teneur en bitume plus faible, risquerait d'être annulée par le fait qu'il serait inapproprié de poser cette formulation sur des couches plus minces, l'enrobé n'ayant alors plus les caractéristiques de résistance et de durabilité requises.

2.2.3.3 Coûts associés à l'entretien et à la réparation de l'enrobé sur route

La revue de la documentation a montré que dans une multitude de conditions climatiques et pour des paramètres de trafic très différents, les enrobés SMA engendraient généralement des économies au niveau des coûts associés à l'entretien et à la réparation de l'enrobé en place. Cet élément est majeur. En effet, il ne s'agit pas ici de simplement tenir compte du coût de production d'un matériau pour juger, dans un projet donné, de la solution la plus avantageuse pour les contribuables qui les financent, mais, bien au contraire, il s'agit de faire un bilan global des impacts financiers.

Le bilan des coûts « réels » d'une intervention sur une infrastructure routière doit être évalué durant toute la vie utile de l'ouvrage. Cette évaluation des coûts totaux, *life-cycle costs*, est de plus en plus couramment employée par les gestionnaires des chaussées. Les études effectuées en tenant compte d'un bilan global au niveau des coûts semblent montrer qu'à moyen et long terme les enrobés SMA peuvent s'avérer une solution économique pour réaliser des couches de roulement pour routes à trafic élevé.

2.2.3.4 Les économies associées à la vie utile du revêtement

Certaines études ontariennes (ainsi que d'autres) tendent à montrer que la durée de vie anticipée des revêtements en enrobés SMA est supérieure à celle des enrobés bitumineux conventionnels, et ce, pour les mêmes conditions climatiques et pour les mêmes caractéristiques de trafic (Bateman 2000 ; Brown et Cooley 1999 ; NAPA 1999 ; Schmiedlin 1998). En prenant en compte les coûts totaux sur la durée de vie utile de la chaussée, cette qualité des enrobés SMA peut réduire le coût annuel moyen, car le coût de construction initial est amorti sur un plus grand nombre d'années. Il faut bien garder à l'esprit que les enrobés SMA ne sont sans doute pas économiques initialement, soit à la pose, mais qu'ils le deviennent à moyen ou long terme si on considère tous les coûts associés à la conservation du revêtement à un niveau de service acceptable.

Par contre, il ne faut pas oublier que cette durabilité accrue est tributaire des caractéristiques spécifiques des enrobés SMA , comme notamment la teneur en bitume relativement élevée. Une modification de ces caractéristiques de formulation dans un but de réduction du coût de fabrication pourrait affecter négativement la durée de vie de l'enrobé.

2.3 Synthèse des critères de conception

Compte tenu de l'utilisation prévue des enrobés SMA, certains critères de conception ont été établis. Les critères de conception d'ordre technique sont liés à la performance attendue et font référence à la résistance et à la mise en œuvre des enrobés SMA. D'autres critères de conception font appel à la notion de sécurité pour les usagers tandis que les critères de conception d'ordre économique visent essentiellement à permettre la confection d'enrobés SMA relativement économiques à produire.

Un résumé des critères de conception établis pour les enrobés SMA est donné au tableau II.

Tableau II

Synthèse des critères de conception pour les enrobés SMA (application ciblée : couche de roulement/resurfaçage pour route à trafic élevé)

CRITÈRE	MÉTHODE D'ÉVALUATION	LIMITE ACCEPTABLE
Homogénéité	Examen visuel	<ul style="list-style-type: none"> • aucune ségrégation • pas de saignement
Aptitude au compactage	Test à la PCG	<ul style="list-style-type: none"> • > 11% vides à 10 girations • 4-7% vides à 60 girations • > 2% vides à 200 girations
Résistance à l'orniérage	Test à l'orniéreur*	<ul style="list-style-type: none"> • < 10 % à 1000 passes • < 20 % à 3000 passes
Sécurité	Examen visuel Hauteur de sable**	<ul style="list-style-type: none"> • Texture grenue homogène • $H_s > 0,9 \text{ mm}$
Économie	Adaptation de la formulation	---

Notes * : Le test à l'orniéreur sera fait uniquement sur la formulation optimisée

** : La détermination de la hauteur de sable est un test réalisé en chantier sur un enrobé posé sur route ; cette méthode sera employée lors de la phase finale (de réalisation de sections d'essai).

2.4 Choix des constituants pour la confection d'un enrobé SMA

Les matières premières devant servir à la réalisation d'enrobés SMA doivent présenter certaines caractéristiques compte tenu des utilisations envisagées. Ces caractéristiques seront un compromis qui permettra d'optimiser les qualités

recherchées de l'enrobé à un coût raisonnable. Dans les sections suivantes, nous traiterons des critères jugés essentiels quant aux différents constituants utilisés dans la confection d'un enrobé SMA.

2.4.1 Choix du gros granulat

Le gros granulat, de par sa proportion prédominante et à cause de l'importance du contact pierre sur pierre, joue un rôle majeur dans la performance de l'enrobé SMA. En fonction de la revue de la documentation et des critères québécois de classification des granulats, nous mettrons en perspective un certain nombre de critères de choix pour le gros granulat.

Catégorie de gros granulat — Selon les recommandations du MTQ, les enrobés conventionnels utilisés en couche de roulement pour autoroute à trafic élevé requièrent l'emploi d'un gros granulat de catégorie 1-A. En effet, les exigences les plus sévères, que ce soit pour les caractéristiques intrinsèques ou de fabrication, sont spécifiées pour la surface de roulement d'une autoroute dont le trafic journalier annuel moyen, le DJMA, excède 20 000 véhicules ou pour laquelle l'équivalent de charges axiales simples, l'ECAS, dépasse 300 000. Les exigences concernant le gros granulat visent à assurer une sécurité minimale pour les usagers, c'est-à-dire une bonne adhérence pneumatique/chaussée et une bonne résistance à l'usure et aux chocs.

Toutefois, le MTQ n'a pas les mêmes exigences spécifiques (réf. : guide de réalisation 1995 présenté à l'annexe 1) pour le gros granulat entrant dans la composition de l'enrobé SMA, le Médiflex. Le guide de réalisation du MTQ pour cet enrobé est moins restrictif permettant d'utiliser les gros granulats des catégories : 1-A, 2-A et 2-B. On demande également que le coefficient de polissage par projection, le CPP, soit supérieur ou égal à 50. De plus, dans le même guide de réalisation pour les enrobés Médiflex, on interdit l'emploi de granulat calcaire. Mentionnons que ces exigences sont générales et ne tiennent pas compte du trafic.

La revue de la documentation a également mis en perspective qu'il vaut mieux utiliser des granulats tenaces et de bonne qualité dans les enrobés SMA en dépit du fait (West 1995) qu'on a déjà réussi à réaliser des enrobés SMA performants à l'omierage avec des granulats moins performants, plus poreux et friables. Par contre, la performance du granulat au niveau sécuritaire, c'est-à-dire l'évolution des caractéristiques texturales dans le temps, n'a pas été confirmée avec de tels gros granulats. Contrairement à l'État de Floride, les sources potentielles de gros granulats de qualité sont nombreuses au Québec.

Dans ce contexte, il apparaît justifié de se référer a priori aux exigences de qualité prévues pour les enrobés conventionnels couramment employés pour le même usage, tel l'enrobé ESG-10. En effet, pour un l'enrobé SMA, la proportion de gros granulat est sensiblement plus élevée que pour l'enrobé ESG-10 et les contacts pierre sur pierre d'un enrobé SMA prédominent dans la reprise des efforts. On peut donc considérer que le gros granulat entrant dans la composition d'un enrobé SMA posé en couche de roulement sur une autoroute à trafic élevé devrait être de catégorie 1-A.

Dimension maximale du gros granulat — Une autre caractéristique à définir est la dimension maximale du gros granulat. Au Québec, le resurfaçage des chaussées s'effectue presque toujours avec des enrobés ayant des gros granulats de 10 millimètres de dimension maximale : les enrobés EB-10, ESG-10 et EG-10. Dans le cas des constructions neuves, les enrobés avec des gros granulats de 10 mm de dimension maximale prédominent également pour la couche de surface. Dans le cadre de cette recherche, le choix de la dimension maximale du gros granulat s'est porté sur cette valeur courante de 10 mm, puisqu'on vise des applications en couche de roulement et en couche mince. En fonction de ce choix, et conformément à la classification granulaire en vigueur, on emploiera donc uniquement un gros granulat de classe granulaire 5-10 mm.

Toutefois, la granularité des enrobés SMA produits dans cette étude se démarquera quelque peu de celles des enrobés SMA déjà réalisés au Québec. En effet, le guide de réalisation des enrobés Médiflex du MTQ stipule que la granulométrie combinée de la

masse granulaire doit comporter une proportion de 15 à 30 % de particules retenues sur le tamis de 10 mm. En choisissant un gros granulat de classe granulaire 5-10 mm, la proportion de particules retenues sur le tamis de 10 mm dans la granulométrie totale sera très faible, voire quasi négligeable.

2.4.2 Choix du granulat fin

Compte tenu de l'application prévue de l'enrobé SMA en couche de roulement ou resurfaçage sur route à trafic élevé, il y a lieu également d'utiliser un granulat fin de qualité supérieure. Selon les recommandations du MTQ pour le choix des composantes pour les enrobés conventionnels, le granulat fin utilisé dans la fabrication d'un enrobé pour autoroute en construction neuve, reconstruction ou resurfaçage devrait être de catégorie 1 en ce qui a trait à ses caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et de friabilité.

Le guide de réalisation des enrobés Médiflex du MTQ comporte la même exigence. De plus, elle spécifie que le granulat fin doit être manufacturé et que son coefficient d'écoulement (C_e) doit être supérieur ou égal à 80, tel que déterminé selon la norme NQ-2560-075.

Il semble important que ces trois dernières exigences soient prises en compte dans la sélection d'un granulat fin pour les enrobés SMA. Dans le cadre de cette recherche, il a donc été décidé de retenir les mêmes exigences pour le granulat fin.

2.4.3 Choix du filler

La revue de la documentation a permis de constater que plusieurs types de filler peuvent être employés avec succès dans la réalisation d'enrobés SMA. D'autre part, les seules exigences du guide de réalisation des enrobés Médiflex sont les mêmes que pour les fines d'appoint utilisés dans les enrobés conventionnels, c'est-à-dire que le filler soit conforme aux exigences granulométriques de la norme ASTM D-242. Même s'ils respectaient les exigences de cette norme, il y aurait quand même lieu d'éviter les

fillers minéraux excessivement fins, autant pour faciliter le processus de fabrication et limiter la perte de matériau dans le système de dépoussiérage que pour des problèmes éventuels concernant la qualité de l'enrobé lui-même. Il a été convenu d'employer, à l'intérieur de ce programme d'expérimentation des fillers qui sont déjà couramment utilisés avec succès dans la production d'enrobés bitumineux conventionnels.

2.4.4 Choix du bitume

Au Québec, les recommandations du ministère des Transports concernant le grade de bitume à employer sont fonction des conditions climatiques et du type de route. Pour le choix des bitumes, le MTQ a subdivisé le territoire québécois en trois zones climatiques. La zone 1, par exemple, correspond à peu près à la grande région de Montréal.

Dans le cas des enrobés bitumineux conventionnels, la réalisation de couches de roulement pour des autoroutes à trafic élevé requiert l'emploi d'un bitume polymère. Par contre, pour les enrobés SMA, l'expérience a montré qu'il est possible de réaliser des surfaces durables, dans les mêmes conditions, en utilisant des bitumes conventionnels. Si on veut élargir l'emploi des enrobés SMA au Québec, il serait avantageux de réaliser ce type de travaux avec des bitumes conventionnels, moins chers. L'économie sur le coût du bitume permettra de compenser en partie les coûts supplémentaires associés aux enrobés SMA. Dans le cadre de cette recherche, il a donc été décidé d'utiliser un bitume conventionnel.

Il serait intéressant d'effectuer la comparaison entre les enrobés SMA produits avec des bitumes conventionnels et ceux produits avec des bitumes polymères. L'emploi des bitumes polymères peut s'avérer économiquement avantageux à long terme à cause d'une amélioration des performances, c'est-à-dire en réduisant les coûts de réparation et en prolongeant la vie du revêtement, même si cela augmente le coût de construction initial. Il ne sera toutefois pas possible, à l'intérieur de ce projet, d'effectuer cette comparaison.

2.4.5 Choix de l'agent stabilisant

Puisque, pour les enrobés SMA, la teneur en bitume est élevée et la granulométrie est grossière et discontinue, l'emploi d'un bitume standard nécessite l'emploi d'un agent stabilisant. Dans le cadre de cette recherche, l'utilisation de fibres a été retenue pour assurer cette fonction. Le marché mondial des fibres pour les enrobés bitumineux est actuellement largement dominé par les fibres organiques de cellulose. Par contre, le Québec est dans une situation toute particulière : en effet, le Québec est le plus gros producteur mondial d'amiante. De plus, le marché mondial pour les produits de l'amiante est en déclin depuis plusieurs années. Il y avait lieu d'envisager sérieusement la possibilité d'utiliser les fibres d'amiante comme agent stabilisant.

La revue de la documentation indique que l'abandon des fibres d'amiante a été décidé uniquement en fonction de considérations environnementales. D'ailleurs, certains des tout premiers projets allemands réalisés il y a une trentaine d'années sont encore dans un état très satisfaisant (Camargo 1998) ; les enrobés SMA employés sur ces projets utilisaient les fibres d'amiante comme agent stabilisant.

L'adaptation faite par les fabricants d'amiante pour sécuriser l'emploi de leur produit dans les enrobés semble acceptable. Dans cet optique, l'utilisation locale des fibres d'amiante comme agent stabilisant s'avère un choix justifiable. De plus, le MTQ a régulièrement utilisé les fibres d'amiante pour plusieurs formulations d'enrobés (on peut nommer les enrobés EGA-10 et Bicompoflex) et c'est également le type d'agent stabilisant qui a été employé dans les enrobés SMA québécois, le Médiflex.

Il a donc été décidé de prioriser l'emploi des fibres d'amiante comme agent stabilisant dans les enrobés SMA produits au cours de cette étude. En parallèle, un enrobé SMA de base confectionné avec des fibres de cellulose sera testé pour s'assurer des performances et de la validité de ce choix.

2.4.6 Synthèse des critères liés au choix des constituants

Compte tenu des exigences de performance et d'économie fixées à la section 2.2 et des utilisations envisagées, les constituants devant servir à la réalisation d'enrobés SMA doivent présenter certaines caractéristiques spécifiques. Ces caractéristiques constituent, comme pour les enrobés conventionnels, un compromis entre la performance et le coût de l'enrobé SMA. Ainsi, pour les enrobés SMA, les caractéristiques des granulats sont beaucoup plus liées à la performance de l'enrobé tandis que les caractéristiques du filler, du bitume et des fibres font référence à la fois à l'économie et à la performance de l'enrobé.

Les critères établis pour les granulats fin et grossier et pour le filler sont en quelque sorte un amalgame des valeurs suggérées par le MTQ pour les enrobés posés en couche de surface pour une route à trafic élevé et des valeurs trouvées dans le devis des enrobés Médiflex.

Un résumé des caractéristiques choisies pour les constituants est donné au tableau III.

2.5 Formulation des enrobés SMA

Cette étude vise à étudier les effets de certains paramètres de formulation sur les performances et les caractéristiques de base des enrobés SMA. Il a donc été décidé de définir une formulation initiale de base de l'enrobé SMA et de faire varier certains paramètres jugés importants. La formulation de base a été établie à partir de la revue de la documentation en combinant les résultats de plusieurs études : la recette dite scandinave qui a servi de prémissse à plusieurs expérimentations, les valeurs moyennes des cinq premières années d'expérimentations américaines, la formulation des enrobés Médiflex québécois, l'approche allemande, etc.

Tableau III

Synthèse des caractéristiques choisies des matériaux

MATÉRIAUX	CARACTÉRISTIQUE	EXIGENCE ÉTABLIE
Gros granulat	Caractéristiques intrinsèques	1
	Caractéristiques de fabrication	A
	Classe granulaire	5-10 mm
Granulat fin	Caractéristiques intrinsèques	1
	Coefficient d'écoulement	Supérieur à 80
	Proportion de matériau manufacturé	100%
	Classe granulaire	0-2,5 mm
Filler	Type	Couramment utilisé
Bitume	Type	Conventionnel
	Grade	PG-58-28
Agent stabilisant	Matériau	Amiante

Les principales caractéristiques de formulation de l'enrobé de base, la formulation initiale, sont données au tableau IV.

Dans les documents consultés pour établir cette formulation de base de l'enrobé, aucun de ceux-ci n'exprimait la teneur en bitume sous la forme du volume de bitume effectif ($V_{be}\%$) exprimé en pourcentage par rapport au volume total de l'enrobé à 0% de vides. En effet, cette façon de faire est une caractéristique spécifique de la méthode de formulation du Laboratoire des Chaussées qui sera employée dans le programme expérimental. Même le guide de réalisation des enrobés Médiflex ne suggère pas d'exprimer la teneur en bitume de cette façon. En fait, les formulations consultées pour

évaluer la valeur de base de $V_{bs}\%$ exprimaient toutes la teneur en bitume sous forme de pourcentage massique par rapport à la masse totale de l'enrobé. L'évaluation du $V_{bs}\%$ par rétro-calcul à partir de ces données était sujette à une part d'imprécision car on ne connaissait pas l'absorption réelle du bitume par les granulats. De plus, la densité relative des matières premières n'était pas toujours fournie. Néanmoins, il apparaît clair qu'un volume de bitume effectif de 14,5% est tout à fait approprié.

Tableau IV
Sommaire des caractéristiques de base de l'enrobé SMA étudié

CARACTÉRISTIQUES	CHOIX EFFECTUÉ
Refus au tamis de 5 mm	70%
Tamisat au tamis de 80 μm	10%
Type de fibres	Amiante
Teneur en fibres	1,0%
Volume de bitume effectif	14,5%

CHAPITRE 3

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

La revue de la documentation a permis de constater que les enrobés SMA possèdent de nombreuses caractéristiques et propriétés intéressantes. Les applications possibles des enrobés SMA sont également nombreuses. De plus, les différentes recherches élaborées récemment un peu partout dans le monde nous en ont appris plus sur les paramètres de formulation propres à ce type d'enrobé.

Toutefois, dans le contexte québécois où non seulement les enrobés SMA sont peu connus et peu employés, mais où également on utilise maintenant une méthode de formulation comportant des différences importantes par rapport à celles employées ailleurs en Amérique du Nord ou en Europe, il fallait synthétiser les notions spécifiques à ce type d'enrobé et les adapter à la réalité québécoise. Les enrobés SMA ont le potentiel de devenir un outil important pour combattre l'orniérage de plus en plus présent sur nos chaussées.

À partir d'un processus expérimental, il convient maintenant de préciser et de valider les paramètres de la formulation initiale pour l'enrobé SMA recherché. L'élaboration de ce programme expérimental vise 3 principaux objectifs : 1) étudier l'influence des différents paramètres de formulation quant à leurs effets sur les propriétés recherchées ; 2) ajuster le dosage de la formulation initiale afin d'optimiser certaines propriétés et ainsi proposer une formulation optimale ; 3) vérifier la performance et l'applicabilité de cette formulation optimale.

La figure 3.1 présente de façon schématique le processus d'expérimentation en quatre phases utilisé lors de cette recherche. Les figures 3.2 à 3.5 détaillent le processus spécifique à chacune des quatre phases. Les phases 1 à 3 ont été réalisées dans le cadre de cette recherche ; les résultats et leur analyse sont présentés dans ce mémoire. La phase 4 du processus sera réalisée ultérieurement sur chantier pour

s'assurer de la corrélation entre les hypothèses et les mesures de laboratoire et la performance réelle de l'enrobé sur route.

Même si l'application d'un plan d'expérience factoriel aurait pu permettre de mieux cerner l'influence de chaque paramètre et surtout l'importance des effets combinés de ces paramètres, il a été décidé d'employer un plan d'expérimentation simple où un seul paramètre varie à la fois. Ce type de plan d'expérimentation permet par contre d'étudier les variations de façon plus intuitive. La présence dans cette étude d'évaluations qualitatives rend le plan d'expérimentation factoriel moins apte à répondre à nos besoins d'analyse. Le tableau V présente les paramètres de formulation étudiés et les valeurs employées lors du dosage ; les éléments en caractères gras correspondent aux valeurs choisies pour la formulation de base.

En fonction de ces paramètres et des valeurs employées, on a donc confectionné dans un premier temps l'enrobé SMA de la formulation initiale, l'enrobé SMA STD et neuf autres enrobés SMA dans le but d'étudier les effets des différentes variations de formulation (paramètres et dosage : tableau 3.1) et pour en arriver à une optimisation ultérieure du dosage.

3.1 Paramètres de formulation étudiés

L'optimisation en laboratoire d'une formulation d'enrobé SMA a pour but de cibler l'effet des paramètres de formulation jugés importants sur les propriétés de l'enrobé telles que définies au tableau 2.1 (critères de conception).

Pour ce faire, il faut a priori cibler les paramètres importants et fixer les limites acceptables de variation de ces paramètres. C'est à partir de la revue de la documentation que nous avons défini les paramètres et les dosages étudiés.

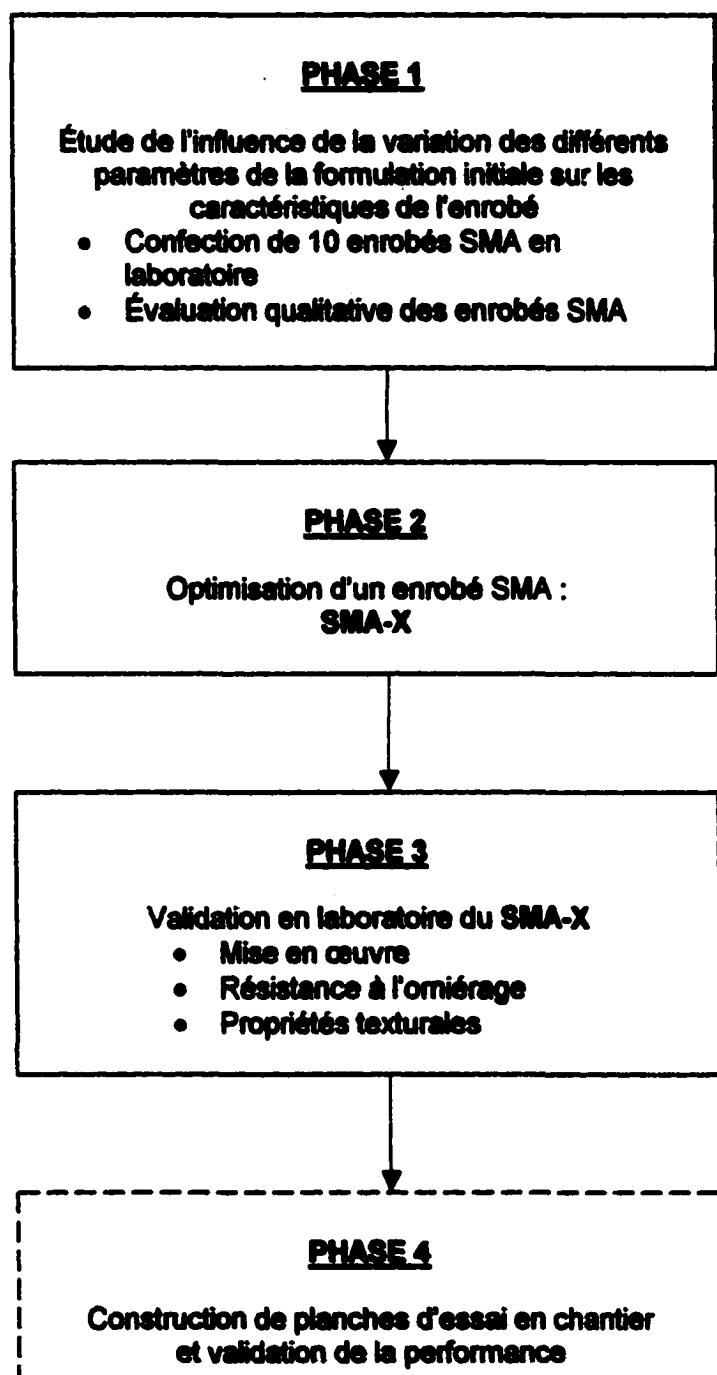


Figure 3.1 Synthèse du processus expérimental mis en œuvre

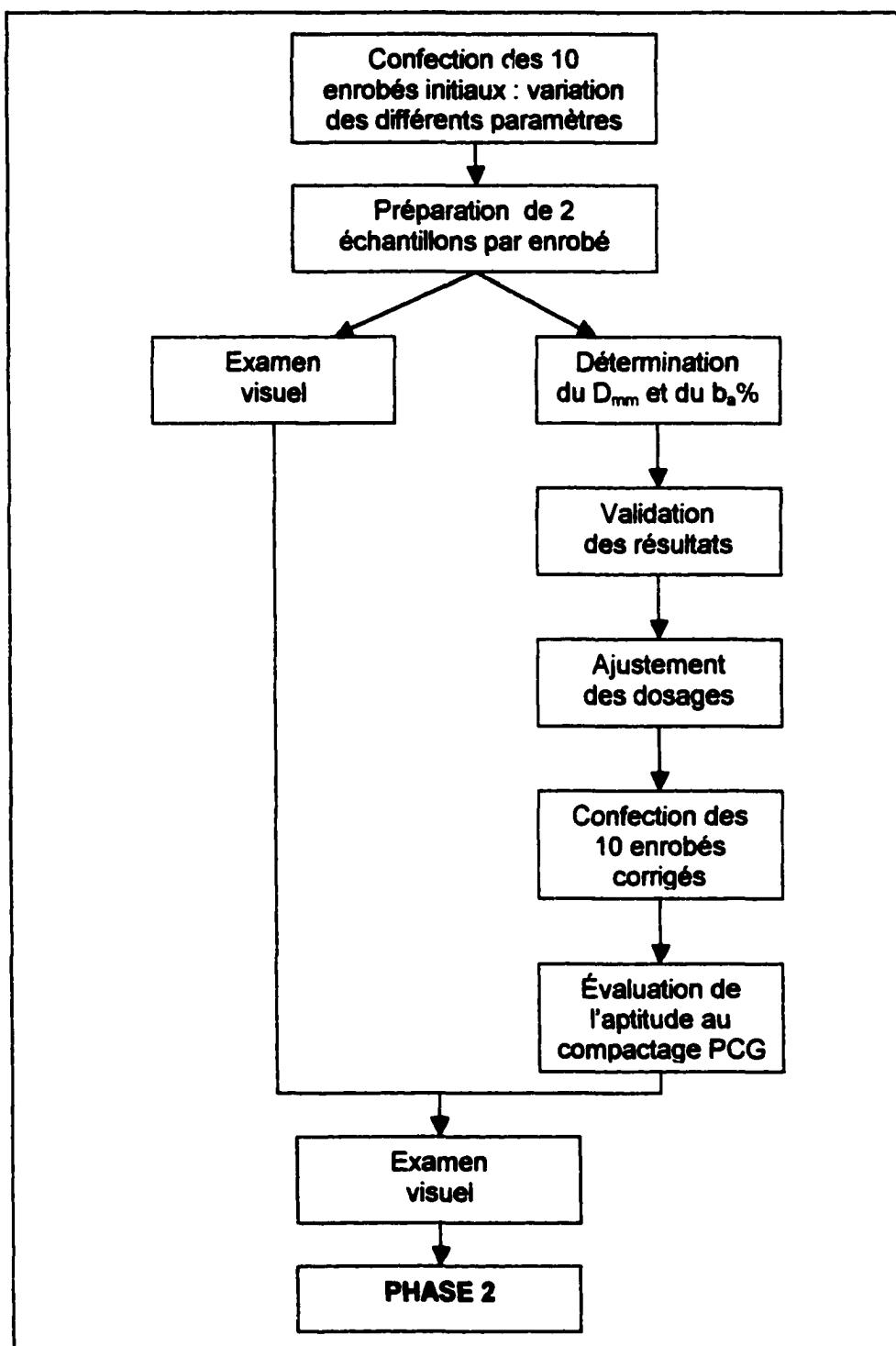


Figure 3.2 Synthèse des principales étapes de la phase 1 du processus expérimental

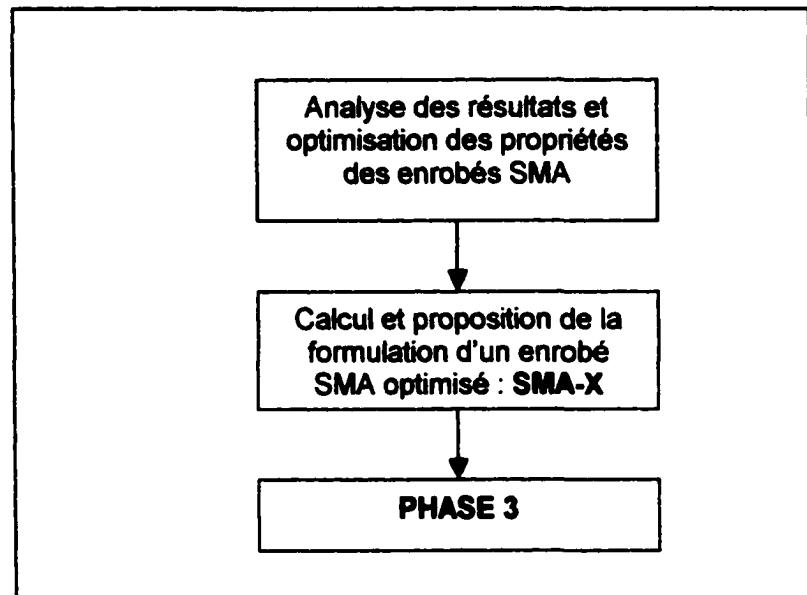


Figure 3.3 Synthèse des principales étapes de la phase 2 du processus expérimental

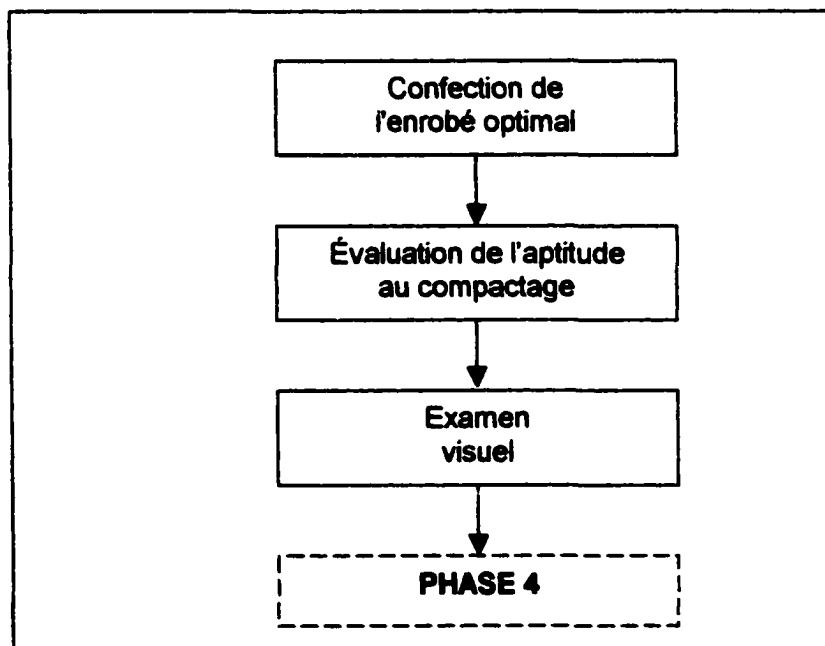


Figure 3.4 Synthèse des principales étapes de la phase 3 du processus expérimental

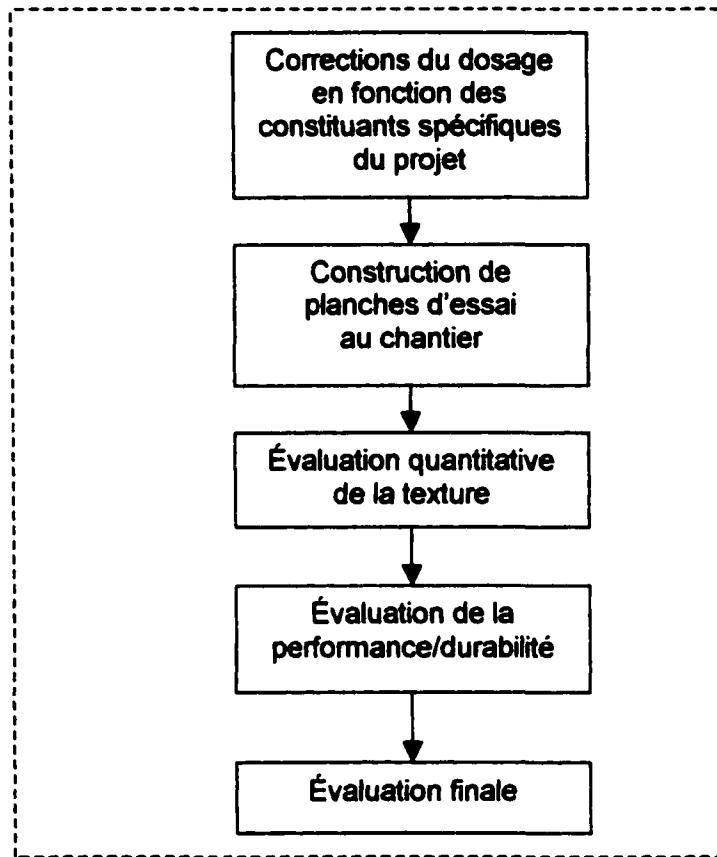


Figure 3.5 Synthèse des principales étapes de la phase 4 du processus expérimental

Il a été décidé d'étudier, dans un premier temps, dix formulations différentes, soit une formulation de base qui est en quelque sorte une moyenne des valeurs employées sur plusieurs projets, et neuf variantes de celles-ci. Même si l'application d'un plan d'expérience factoriel aurait permis de mieux cerner l'influence de chaque paramètre et surtout des différentes combinaisons de paramètres, il a été décidé d'employer un plan d'expérimentation simple où un seul paramètre à la fois varie par rapport à la formulation de base. Ce type de plan d'expérimentation permet d'étudier les variations de façon plus intuitive. Un plan d'expérimentation factoriel est très approprié pour des résultats numériques ; la présence dans cette étude d'éléments qualitatifs (examen visuel) le rend moins apte à satisfaire nos besoins d'analyse.

Tableau V

**Paramètres de formulation des enrobés SMA confectionnés
dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental**

PARAMÈTRE	VARIATION	VALEUR EMPLOYÉE
Refus au tamis de 5 mm (%)	Moins	65
	STD	70
	Plus	75
Tamisat au tamis de 80 µm (%)	Moins	8
	STD	10
	Plus	12
Type et dosage des fibres	Amiante	1,0% et 1,5%
	Cellulose	0,3%
Volume de bitume effectif, V _{be} (%)	Moins – Moins	13,7
	Moins	14,1
	STD	14,5
	Plus	14,9

CHAPITRE 4

DESCRIPTION DES MATERIAUX UTILISES POUR LA CONFECTON DES ENROBES SMA EN LABORATOIRE ET DES ESSAIS DE LABORATOIRE

4.1 Introduction

En fonction des caractéristiques choisies (tableau III) pour les différents constituants des enrobés SMA à confectionner dans le cadre de cette recherche, des matériaux ont été sélectionnés. Des essais de laboratoire sont également requis pour vérifier la conformité face aux critères de conception (tableau II) établis des enrobés SMA confectionnés dans le cadre du programme expérimental. Ce chapitre décrira les différents matériaux et essais employés.

4.2 Matériaux utilisés

Dans le cadre du programme expérimental, les matières premières de base requises pour la confection des enrobés SMA étaient : un gros granulat, un granulat fin, un filer minéral, un liant bitumineux et un agent stabilisant. Nous exposerons ici les principales caractéristiques des différents matériaux choisis

4.2.1 Granulats

Les granulats utilisés lors du programme d'expérimentation proviennent de la carrière Raycar située à Saint-Flavien, près de la ville de Québec. Il s'agit de matériaux concassés composés principalement de basalte. Le granulat est de couleur grisâtre avec quelques particules de couleur blanche, orangée ou noire. Après séchage, quelques particules montrent la présence en surface d'oxyde de fer (rouille). Deux calibres de pierre ont été choisis pour produire les différentes combinaisons

granulaires : le granulat fin de calibre 0-2,5 mm et le gros granulat de calibre 5-10 mm. Les caractéristiques physiques des granulats utilisés dans la confection des enrobés SMA sont données au tableau VI.

4.2.1.1 Granulat fin de calibre 0-2,5 mm

Les particules du granulat fin sont très anguleuses tel que le démontre le coefficient d'écoulement de 109 (tableau VI) ; cette valeur est sensiblement plus élevée que celle des granulats fins généralement employés dans la production des enrobés bitumineux. Les caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure (Micro-Deval) et de friabilité de ce granulat permettent de le classer d'emblée dans la catégorie 1. Le granulat fin est donc conforme aux exigences ciblées au chapitre 2 (tableau III).

4.2.1.2 Gros granulat de calibre 5-10 mm

Le gros granulat utilisé pour la confection des enrobés est essentiellement composé de particules angulaires. Il y avait une proportion appréciable de particules plates et allongées (tableau VI). Les caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure (Micro-Deval) et à la fragmentation (Los Angeles) de ce granulat sont nettement supérieures à la moyenne et permettent de la classer dans la catégorie 1. À ce niveau, le gros granulat est donc conforme aux exigences ciblées au chapitre 2 (tableau III).

En ce qui concerne les caractéristiques de fabrication, le gros granulat remplit toutes les exigences de la catégorie « A » sauf en ce qui concerne la teneur en particules plates (31% comparativement à un maximum permis de 25%). Toutefois, spécifions que le test de détermination des particules plates a été effectué sur la fraction du granulat qui est retenue sur le tamis de 10 mm. Ici, cette partie de l'échantillon ne représente qu'environ 4% du granulat et ne semble pas représentative de l'ensemble du matériau.

Tableau VI

Caractéristiques des granulats

PROPRIÉTÉS	Symbol	Norme	5-10 mm	0-2,5 mm
Densité relative brute	D_{gb}	BNQ 2560-065 et 067	2,827	2,744
Absorption en eau (%)	A	BNQ 2560-065 et 067	1,73	1,46
Friabilité (%)		BNQ 2560-080		19,0
Module de finesse (fraction <5 mm)				2,65
Fragmentation (%)		LC-21-100	100	
Particules plates (%)		BNQ 2560-265	31	
Particules allongées (%)		BNQ 2560-265	27	
Coefficient d'écoulement	C_e	NQ 2560-075		109
Résistance à la fragmentation Los Angeles (%)		BNQ 2560-400	12,4	
Résistance à l'usure Micro-Deval (%)		BNQ 2560-070 LC-21-101	6,6	24,3
Granulométrie (tamisats) %	14,0 mm	BNQ 2560-040	100	100
	10,0 mm		96	100
	5,0 mm		8	100
	2,50 mm			91
	1,25 mm			52
	630 μm			31
	315 μm			19
	160 μm			12
	80 μm		0,9	7,9

4.2.1.3 Filler minéral

Le filler utilisé est un calcaire finement pulvérisé. C'est un matériau couramment employé dans l'industrie pour la confection d'enrobés bitumineux. Il est également utilisé à d'autres fins, par exemple comme chaux agricole. Ce filler est produit par la compagnie CALCO. Les caractéristiques physiques et chimiques de base du filler calcaire sont présentées au tableau VII.

Il est à noter que la granulométrie du filler utilisé n'est pas tout à fait conforme aux exigences du Cahier des Charges et Devis Général (CCDG). En effet, celui-ci exige un tamisat au tamis de 80 μm compris entre 70% et 100% pour ce tamis alors qu'on a seulement 58% de tamisat. La granulométrie de ce filler est toutefois conforme pour les tamis de 630 et 315 μm . Rappelons que la confection des enrobés conventionnels exige un ajout nettement moindre de filler comparativement aux enrobés SMA. À des taux d'ajout relativement faibles (souvent moins de 2% pour les enrobés conventionnels), la non-conformité granulométrique du filler n'a probablement pas d'effets appréciables sur la performance de l'enrobé. Par contre, dans les enrobés SMA où on requiert un ajout beaucoup plus important de filler, une non-conformité pourrait éventuellement se révéler plus néfaste. Notons toutefois que plusieurs recherches récentes semblent montrer que la finesse du filler mesurée par le tamisat au tamis de 80 μm n'a pas d'influence significative sur la performance d'un enrobé SMA.

4.2.2 Agents stabilisants

Deux types de fibres ont été étudiés dans le cadre de cette recherche : les fibres végétales de cellulose et les fibres minérales d'amiante.

Tableau VII

Caractéristiques chimiques et physiques du filer calcaire

PROPRIÉTÉS		RÉSULTAT	NORME
Composition chimique (%)	CaCO ₃	97,9	
	MgO	0,52	
	Fe ₂ O ₃	0,42	
	Al ₂ O ₃	0,40	
Couleur		Gris pâle	—
Densité relative brute		2,72	C-110-85
Dureté (échelle de Mohs)		3	—
Densité en vrac lâche (g/cm ³)		1,04	C-110-85
Densité en vrac compactée (g/cm ³)		1,72	C-110-85
Taille moyenne (D50)		57 µm	C-110-85
Granulométrie (tamisats) %	630 µm	100	100
	315 µm	99	95-100
	160 µm	77	—
	80 µm	58	70% min

4.2.2.1 Fibres d'amiante

Les fibres d'amiante employées ont été fournies par la compagnie J-M Asbestos. Les fibres sont courtes comparativement à celles utilisées dans l'industrie du béton de ciment (produits d'amiante-ciment). La fibre utilisée est la même fibre d'amiante employée dans les enrobés de type EGA-10 et Médiflex du MTQ. Le tableau VIII présente les propriétés physiques et chimiques de la fibre d'amiante dans la confection des enrobés SMA.

Compte tenu des risques pour la santé liés à l'absorption de ce produit par les voies respiratoires, et tel que spécifié dans la fiche signalétique du produit, des précautions ont été prises lors de la manipulation des fibres d'amiante et lors de la confection des enrobés : entreposage des fibres dans des sacs doublés et scellés ; malaxage des enrobés sous une hotte de ventilation ; éviter de créer de la poussière ; port de dispositifs respiratoires protecteurs appropriés ; etc.

Tableau VIII

Caractéristiques physiques et chimiques de la fibre d'amiante utilisée dans la confection des enrobés SMA

CARACTÉRISTIQUES		RÉSULTATS
Nom de commerce		Asbaltic
Provenance		Asbestos, Québec
Famille chimique		Silicates hydratés fibreux
Formule chimique		$Mg_3(Si_2O_3)(OH)_4$
Proportion des constituants principaux (%)	Amiante chrysotile	95-98
	Magnétite	0,5-5
pH		~ 10
Apparence		Fibres blanches mattes
Densité relative brute		2,4-2,6
Surface spécifique (en cm^2/g)		11 000
Granulométrie exprimée en tamisat (%)	3,35 mm* (tamis no 6)	100
	1,40 mm* (tamis no 14)	98
	850 μm^* (tamis no 20)	91
	656 μm^* (tamis no 28)	73
	500 μm^* (tamis no 35)	55
	230 μm^* (tamis no 65)	36

* valeurs équivalentes approximatives des ouvertures des tamis impériaux

4.2.2.2 Fibres de cellulose

La fibre de cellulose utilisée est produite par la compagnie Interfibe. La cellulose est une fibre extraite du bois et spécialement adaptée pour la réalisation d'enrobés bitumineux. Les fibres de cellulose sont stabilisées avec du kaolin. Tout comme les fibres d'amiante, les fibres de cellulose employées dans la confection des enrobés SMA sont très fines. Les propriétés physiques et chimiques de ce matériau sont données au tableau IX.

La fiche signalétique de sécurité fournie par le manufacturier mentionne d'éviter la respiration prolongée des poussières de cellulose ; des précautions élémentaires ont donc été prises au laboratoire lors de la préparation des enrobés.

Tableau IX

Caractéristiques physiques et chimiques des fibres de cellulose utilisées dans la confection des enrobés SMA

CARACTÉRISTIQUES	RÉSULTATS
Nom commercial	Road-Cell
Provenance	Portage, Michigan
Apparence	Fibres blanchâtres mattes
Tamisat au tamis de 150 µm (%)	70 ± 10
Dimension maximale (Longueur)	5 mm
Teneur en cendres (%)	< 20
pH	7.5 ± 1.0
Absorption d'huile (%)	6.0 ± 1.0
Teneur en eau (%)	< 5
Densité relative brute	1,15
Masse volumique (kg/m ³)	550

4.3 Bitume

Le bitume employé a été produit par la compagnie Shell. Il s'agissait d'un bitume standard, c'est-à-dire sans ajout de polymère, de classification PG58-28.

Ce grade de bitume correspond au type de liant bitumineux recommandé par le MTQ pour la production des enrobés avec fibres d'amiante en zone 2 ou 3 (ce qui correspond à la majorité du territoire du Québec sauf la région de Montréal-Sud).

4.4 Formulation

Les différents enrobés confectionnés (10) dans le cadre de la phase 1 ont été établis à partir de la formulation initiale en variant le dosage des paramètres étudiés (voir tableau V). Même si une formulation semblable à la formulation initiale a donné de bons résultats à certains endroits, il faut toujours l'adapter compte tenu de la spécificité des matières premières utilisées. C'est également le cas pour un enrobé conventionnel où la formulation devrait être optimisée pour les matériaux spécifiques employés.

Les principales caractéristiques de la formulation initiale sont les suivantes :

- Refus au tamis de 5 mm : 70%
- Tamisat au tamis de 0,080 mm : 10,0%
- Volume de bitume effectif (V_{be}%) : 14,5%
- Type de fibre : amiante
- Teneur en fibres : 1,0%

Dans le but d'alléger le texte, la formulation initiale, établie par analyse des différentes formulations présentées dans la documentation, sera identifiée par l'acronyme STD dans ce mémoire. Les deux caractéristiques granulométriques de la formulation initiale sont calquées sur la formulation scandinave qui a servi de base pour la formulation de plusieurs enrobés SMA. Le volume de bitume effectif utilisé dans la formulation initiale constitue une valeur moyenne évaluée à partir de plusieurs formulations nord-

américaines ; il y a une certaine imprécision dans cette évaluation, car les différents organismes de transport, à l'exception du MTQ, emploient le pourcentage massique pour exprimer la teneur en bitume. Il a donc fallu partir des densités des matériaux utilisés (lorsque disponibles) pour évaluer les volumes de bitume effectif des différents projets. La valeur initiale employée correspond à un enrobé SMA moyennement riche en bitume. Certains des mélanges allemands répertoriés étaient beaucoup plus riches que cette valeur.

Un enrobé a été confectionné avec la fibre de cellulose. Dans ce cas, la teneur en fibres était de 0,3%, ce qui est la valeur la plus employée pour cet agent stabilisant. La teneur en fibres plus faible s'explique en bonne partie par la densité beaucoup plus faible de la cellulose par rapport à l'amiante (1,15 comparativement à 2,50). L'effet d'une augmentation de la proportion de fibres a également été vérifié.

Enfin, on a étudié les effets d'une variation de la teneur en bitume ; on a fait varier celle-ci en plus et en moins. On sait qu'on peut généralement augmenter sensiblement la teneur en bitume d'un enrobé SMA sans réduire de façon appréciable la résistance à l'omiérage. Toutefois, la revue de la documentation ne dit pas jusqu'où on peut réduire la teneur en bitume sans affecter drastiquement la performance et les caractéristiques de l'enrobé. Spécifiquement, on a produit une formulation qui correspond à un enrobé à matrice de pierre qu'on pourrait qualifier de « pauvre », c'est-à-dire avec une teneur en bitume relativement faible. Cette caractéristique de formulation va à l'encontre des éléments de base de ce type d'enrobé : on fait souvent référence au mortier riche en bitume des enrobés SMA. L'avantage d'un tel enrobé SMA, s'il s'avère suffisamment performant, se situera à un niveau économique puisque le bitume constitue, et de loin, la matière première la plus onéreuse.

Le tableau X énumère les principales caractéristiques de formulation des dix enrobés étudiés, ainsi que les acronymes qui seront utilisés pour les identifier. L'objectif de ces acronymes est de permettre d'identifier rapidement quelle est la différence dans la formulation par rapport à l'enrobé standard. Ainsi, l'enrobé « GG + » correspond à une formulation où la proportion de gros granulat a été augmentée par rapport à la valeur

Tableau X

Caractéristiques des dix enrobés SMA confectionnés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental

Mélange	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Acronyme	STD	Cell	GG+	GG-	Fibr+	Fibr -	Fibr +	Bi -	Bi +	Bi --
Refus % au 5 mm	70	70	75	65	70	70	70	70	70	70
Tamisat% au 80 µm	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	8,0	12,0	10,0	10,0	10,0
Vbe%	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,1	14,9	13,7
Type de fibres	Amiante	Cellulose	Amiante							
Teneur en fibres (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

de base ; l'enrobé « Bi – » correspond quant à lui à une formulation avec une teneur réduite en bitume, et ainsi de suite. Ces acronymes seront constamment employés dans les sections sur la présentation et l'analyse des résultats.

4.5 Description des essais en laboratoire

Cette section décrit les essais réalisés en laboratoire. Ces essais ont pour objectif : 1) déterminer des caractéristiques requises pour le calcul des dosages ; 2) étudier l'impact de la variation des paramètres de formulation proposés dans le programme expérimental ; 3) évaluer la performance des enrobés.

4.5.1 Techniques de fabrication

Les enrobés SMA confectionnés dans le cadre de cette étude ont été malaxés suivant la procédure décrite dans la norme LC 26-003 « Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire ». La procédure ne fait pas mention des fibres. Celles-ci ont été ajoutées après l'ajout du bitume, tout juste avant le début du malaxage. À environ mi-chemin de l'étape de malaxage, le malaxeur était arrêté et les parois du bol et le batteur étaient raclés pour s'assurer de l'homogénéité de l'enrobé produit. En raison des différences appréciables entre les enrobés SMA confectionnés, la durée de malaxage était variable. L'élément essentiel pris en considération, tel que spécifié dans la norme, était l'obtention d'un enrobé homogène. Quand l'enrobé semblait homogène et que toutes les particules minérales et les fibres étaient bien enrobées de bitume, le malaxage était prolongé d'environ 20 secondes. Pour les enrobés SMA confectionnés pour le test à la PCG, la masse produite était supérieure de 25 grammes à la masse requise pour la préparation de la briquette.

Les échantillons requis pour les différents essais ont été prélevés suivant la procédure décrite dans la norme LC 26-010 « Réduction en laboratoire d'échantillons en vue d'essai ».

4.5.2 Détermination de la densité maximale de l'enrobé, D_{mm}

Pour chaque formulation d'enrobé SMA confectionné, deux échantillons ont été prélevés pour la détermination de la densité maximale de l'enrobé. L'essai a été effectué conformément à la procédure décrite dans la norme LC 26-045 « Détermination de la densité maximale ».

4.5.3 Calcul des proportions corrigées

La formulation des dix enrobés SMA produits en laboratoire a été corrigée en fonction des taux réels d'absorption de bitume par les granulats. La méthode et les formules employées sont décrites à la norme LC 26-004 « Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du Laboratoire des Chaussées ». Vu le caractère exploratoire de cette phase du projet, on n'a pas déterminé en laboratoire la densité maximale des enrobés à la formulation corrigée ; la densité maximale des enrobés corrigés a plutôt été estimée par calcul avec la formule de la norme.

4.5.4 Détermination de l'aptitude au compactage

Exception faite du nombre d'échantillons testés, la détermination de l'aptitude au compactage des enrobés SMA produits a été effectuée conformément à la procédure décrite dans la norme LC 26-003 « Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire ». La procédure spécifie de mettre à l'essai trois échantillons pour une même formulation, tandis que dans le cadre de ce

programme expérimental, deux échantillons ont été testés pour chaque enrobé. Deux raisons principales ont justifié ce choix : 1) après examen des résultats, l'uniformité des valeurs pour les deux échantillons d'un même enrobé a été jugée suffisante et 2) il s'agit essentiellement d'une phase exploratoire. Dans l'étape ultérieure du projet de recherche (phase 4), pour les enrobés qui seront optimisés en vue d'être posés au chantier, il est prévu de se conformer intégralement à la norme et de produire 3 échantillons par formulation.

4.5.5 Mesure de la résistance à l'omiérage

La détermination de la résistance à l'omiérage avec l'omiéreur de laboratoire de type LCPC a été effectuée conformément à la norme AFNOR P98-253-1 « Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés ; partie 1 : Essai d'omiérage ». Pour un même enrobé, deux plaques de 50 mm d'épaisseur ont été produites avec le compacteur de plaques conformément à la norme AFNOR P98-250-2 « Préparation des mélanges hydrocarbonés ; partie 2 : Compactage des plaques »..

La détermination en laboratoire de la résistance à l'omiérage a été réalisée à 60°C. Tel que demandé dans la norme, les mesures de hauteur ont été faites à 15 endroits sur chaque plaque. On a mesuré les déformations après 300, 1 000, 3 000 et 10 000 passages. Même si les exigences établies (tableau II) pour la résistance à l'omiérage ne dépassaient pas 3000 passages, il a été décidé de prolonger le test jusqu'à 10 000 passages pour pouvoir mieux juger de l'évolution de l'omiérage en fonction du nombre de passages.

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

5.1 Introduction

Le programme expérimental prévoyait la mesure de certains indicateurs quantitatifs et qualitatifs de la performance des enrobés SMA produits. Certaines mesures volumétriques étaient également nécessaires pour l'ajustement des quantités requises dans les différents enrobés. Il convient maintenant de présenter une synthèse des résultats obtenus.

Dans un premier temps, on présentera les dosages initiaux et les résultats des essais de détermination de la densité maximale des dix enrobés confectionnés dans le cadre de la phase 1 du projet ; de ces résultats seront calculées les teneurs réelles en bitume absorbé par les granulats. Dans un deuxième temps, on présentera les résultats des essais à la PCG de ces enrobés, ainsi que les compositions réelles de chacun des enrobés SMA confectionnés. Enfin, on donnera les commentaires relatifs à l'examen visuel des différents enrobés confectionnés.

5.2 Dosages initiaux des enrobés SMA

La méthode de formulation LC requiert, pour chaque formulation, la confection d'un enrobé d'essai préliminaire pour déterminer la teneur réelle de bitume absorbé par les granulats ($b_s\%$) par la mesure de la densité maximale (D_{mm}) de l'enrobé. Pour ce faire, on doit calculer et confectionner chaque enrobé en estimant la teneur en bitume initial, le $P_b\%$, requis pour satisfaire l'exigence fixée de $V_{b_s}\%$.

Les dosages initiaux des dix enrobés SMA confectionnés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental sont présentés au tableau XI ; ces dosages ont été

calculés en fonction du niveau estimé d'absorption de bitume par les granulats, lequel correspond à la moitié de l'absorption en eau. Les granulométries des dix enrobés sont présentées au tableau XII.

Tableau XI

Dosages initiaux utilisés pour la confection des enrobés SMA confectionnés en laboratoire lors de la phase 1 du programme expérimental

Tableau XII

**Granulométries des enrobés SMA confectionnés dans le cadre
de la phase 1 du programme expérimental**

	TAMIS	TYPE D'ENROBÉ SMA				
		STD, Cell, Fibr+, Bi -, Bi + et Bi --	GG +	GG -	Fill. -	Fill. +
T A M I S A T (%)	14 mm	100	100	100	100	100
	10 mm	97	97	97	97	97
	5 mm	30	25	35	30	30
	2,5 mm	24	20	29	24	25
	1,25 mm	21	18	23	19	23
	630 μm	19	18	20	16	22
	315 μm	18	17	18	14	21
	160 μm	14	13	14	11	16
	80 μm	10,0	10,0	10,0	8,0	12,0

5.3 Densité maximale, D_{mm} , et teneur réelle en bitume absorbé, $P_{\text{ba}}\%$

Deux échantillons représentatifs ont été prélevés de chacun des dix enrobés confectionnés pour déterminer la densité relative maximale de l'enrobé. La densité maximale de l'enrobé est une caractéristique importante puisqu'elle permet de

déterminer la teneur réelle en bitume absorbé en plus de servir pour le calcul de la masse de l'échantillon pour l'essai à la PCG. Le tableau XIII présente les densités maximales mesurées en laboratoire pour chacun des échantillons testés, les densités maximales moyennes de chacun des enrobés, les écarts entre les deux échantillons d'un même enrobé et les teneurs réelles en bitume absorbé.

Tableau XIII

Compilation des résultats des densités maximales et des teneurs réelles en bitume absorbé mesurées sur les enrobés d'essai préliminaires confectionnés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental

Caractéristique	Enrobés										
	STD	Cell	GG+	GG -	Fibr+	Fill -	Fill +	Bi -	Bi +	Bi --	
D_{mm}	Échantillon 1	2,541	2,544	2,539	2,541	2,541	2,550	2,537	2,546	2,541	2,561
	Échantillon 2	2,540	2,540	2,539	2,546	2,541	2,553	2,537	2,545	2,546	2,559
	Moyenne	2,540	2,542	2,539	2,543	2,541	2,551	2,537	2,545	2,543	2,560
	ΔD_{mm}	0,001	0,004	0,000	0,005	0,000	0,003	0,000	0,001	0,005	0,003
Bitume absorbé B_a (%)		0,30	0,46	0,21	0,41	0,33	0,47	0,26	0,26	0,47	0,38
Vbe réel (%)		14,8	14,4	15,0	14,6	14,8	14,5	14,9	14,5	14,9	13,9

5.3.1 Remarques relatives aux résultats de la teneur en bitume absorbé

Les teneurs réelles en bitume absorbé, présentées au tableau XIII, se situent entre 0,21% et 0,47% (par rapport à la masse des constituants solides). Ces résultats sont à prime abord normaux, c'est-à-dire qu'il s'agit de valeurs assez semblables à celles

d'enrobés conventionnels. Les variations entre les teneurs en bitume absorbé des différents enrobés SMA produits ne sont pas négligeables puisqu'on parle d'un écart allant du simple au double entre l'enrobé ayant le moins d'absorption et ceux qui ont eu le plus d'absorption de bitume. Toutefois, compte tenu des différences au niveau de la composition de chacun de ces enrobés, ces variations sont tout à fait normales et explicables.

Deux mécanismes s'opposent dans le phénomène d'absorption du bitume par les granulats dans les enrobés bitumineux, et plus particulièrement dans le cas des enrobés SMA. Il faut savoir que le phénomène d'absorption est étroitement lié aux propriétés de surface des matériaux. Le bitume, tout comme les granulats, possède une énergie de surface. Il est bien connu que le bitume chaud, en interaction, mouille la surface d'un granulat. Le bitume est mouillant parce que l'énergie de cohésion interne du bitume à haute température est inférieure à celle qui prévaut à l'interface bitume/granulat (Young et coll. 1998). Ce n'est pas toujours le cas puisque certains liquides, comme le mercure, ne mouillent pas la plupart des solides avec lesquels ils entrent en contact à cause de leur forte cohésion interne. Sans entrer dans les détails, on sait que ce phénomène fait référence aux tensions de surface des matériaux, lesquels sont, entre autres, tributaires des forces de Van der Waals.

Donc, il existe une attraction de surface entre le bitume chaud et le granulat qui force le bitume à pénétrer les pores ouverts du granulat, c'est l'effet capillaire. Évidemment, si la cohésion interne du bitume augmente, le bilan des énergies de surface change et le bitume pénètre moins dans la porosité du granulat. Ainsi, plus le bitume est cohésif, par exemple si sa température est plus basse, moins il y aura d'absorption dans un granulat possédant une porosité ouverte donnée. Un granulat plus poreux absorbera également plus de bitume.

D'autre part, il faut comprendre que l'enchevêtrement des grains, notamment des petits grains tels le filler et même les fibres, va exercer sur le bitume une force capillaire qui s'oppose à l'absorption capillaire du bitume dans les pores d'un granulat. Cet effet modifie également le volume du bitume absorbé par la porosité ouverte des granulats.

D'un tout autre point de vue, on sait que plus les particules sont fines et plus leur surface spécifique est grande, plus il faudra de liquide (ici, du bitume) pour les mouiller et les enrober. La teneur en bitume plus élevée des enrobés à matrice de pierre est en bonne partie attribuable à la plus grande quantité de filler présent dans ces mélanges, de même qu'à la présence de fibres courtes. Les particules de filler, majoritairement plus petites que 80 µm, possèdent une grande surface spécifique ; les fibres, de part leur faible longueur et leur forme allongée, possèdent également une grande surface spécifique. L'enrobé SMA nécessite donc plus de bitume pour couvrir l'ensemble de la surface des particules (incluant les fibres).

Lors du malaxage de l'enrobé à matrice de pierre, le bitume va donc combler une partie de la porosité ouverte des particules du granulat tout en enrobant toute leur surface et celle du filler et des fibres. On peut donc imaginer que, pour une quantité fixe et limitée de bitume, plus la surface spécifique des particules solides est grande, plus l'absorption de bitume par les granulats sera faible. Une augmentation de la teneur en fibres ou en filler minéral devrait donc résulter en une diminution du taux de bitume absorbé. On peut également présenter le phénomène d'une autre façon : plus il y a de filler ou de fibres dans le mastic bitumineux, plus celui-ci devient cohésif, ce qui se traduit par une réduction de l'absorption par les granulats. Plusieurs études antérieures ont démontré que les fibres et le filler ont un effet de raidissement prononcé sur le mastic bitumineux.

Comme nous venons de le souligner, la cohésion du bitume modifiée par la présence du filler et des fibres influence le volume de bitume absorbé. Les valeurs présentées au tableau XIII vont dans ce sens. Comparons les résultats pour les enrobés STD et Cell pour lesquels les teneurs en fibres sont très différentes, soit respectivement 1,0% de fibres d'amiante et 0,3% de fibres de cellulose. Les absorptions de bitume mesurées sont respectivement de 0,30% et 0,46%, ce qui semble cohérent, même si la nature des fibres diffère, puisque leur forme et leur dimension sont relativement semblables. De la même façon, on constate que les absorptions mesurées pour des teneurs différentes en filler calcaire, les enrobés Fill – et Fill +, sont nettement différents, soit

respectivement de 0,47% pour Fill – et de 0,26% pour Fill +. Les résultats montrent clairement l'influence du filer sur la cohésion du bitume.

Également, une augmentation de la teneur en bitume devrait logiquement se traduire par une augmentation des absorptions de bitume par les granulats : plus il y a de bitume disponible pour remplir la porosité ouverte des particules granulaires, plus l'absorption sera importante. Parmi les quatre enrobés où on a fait varier les teneurs initiales en bitume (les autres paramètres étant constants), l'enrobé avec la teneur initiale en bitume la plus élevée, l'enrobé Bi +, est celui qui a le degré d'absorption le plus grand, soit 0,47%.

5.3.2 Remarques relatives aux résultats de densité maximale, D_{mm}

Pour chacun des dix enrobés, et dans le but de s'assurer d'une plus grande précision, nous avons réalisé deux déterminations de la densité maximale de l'enrobé. Les valeurs moyennes des densités maximales des différentes formulations, présentées au tableau XIII, et les variations des valeurs de densités maximales entre les deux spécimens d'un même échantillon seront étudiées séparément

Valeurs des densités maximales des différents enrobés – Globalement, il y a relativement peu de variations dans les différentes valeurs mesurées des densités maximales. En utilisant la valeur moyenne des deux échantillons, on obtient pour les dix enrobés des valeurs de densité maximale qui varient alors entre 2,537 et 2,560. Cela s'explique par le fait que le programme expérimental ne préconisait pas de variations drastiques des proportions relatives des paramètres étudiés : l'écart entre les valeurs employées pour les paramètres étudiés étant faibles, il est normal que les densités expérimentales soient rapprochées.

Tel que souligné dans la revue de la documentation, ces proportions relatives des paramètres étudiés sont assez critiques et spécifiques pour les enrobés SMA. Si, par exemple, la proportion de gros granulat (i.e. le refus au tamis de 5,0 mm) baisse de façon significative, disons de 70% à 55%, l'enrobé n'aura plus les caractéristiques du

squelette granulaire typique d'un mélange SMA qui lui permet de favoriser le contact pierre sur pierre comme méthode privilégiée de transfert des efforts. La marge de manœuvre pour certains critères était donc faible.

Même si ces variations sont faibles, elles sont significatives. En effet, le mélange ayant la densité maximale la plus faible, l'enrobé **Fill +** avec une valeur moyenne de 2,537, correspond à l'enrobé possédant le plus de filler calcaire. Le filler calcaire a une densité plus faible que celle des granulats grossiers et fins employés dans les enrobés. Une augmentation du dosage de filler, réduisant par le fait même la proportion des granulats, conduit à une baisse de la densité maximale de l'enrobé. Suivant la même logique, une baisse de la proportion de filler calcaire devrait se traduire par une augmentation de la valeur de la densité maximale : les résultats du tableau XIII montrent effectivement que l'enrobé avec la teneur réduite en filler, l'enrobé **Fill -**, possède une densité maximale de 2,545 comparativement à 2,540 pour le mélange de base, l'enrobé **STD**.

De la même façon, l'enrobé possédant la densité maximale la plus élevée, soit l'enrobé **Bi - -** avec un D_{mm} de 2,260, est celui dont la teneur en bitume est la plus faible. Il faut toutefois pondérer quelque peu ces variations puisqu'elles sont également tributaires des taux réels de bitume absorbé.

Écarts des valeurs des densités maximales pour un même mélange — L'étude des écarts des valeurs de la densité maximale entre les deux échantillons d'un même enrobé permet de juger de la constance du procédé opératoire et de la variabilité des résultats. Ces valeurs sont présentées au tableau XIII. La variation des densités entre les deux échantillons d'un même enrobé est inférieure à 0,006 pour un écart moyen de 0,002. Ces écarts sont minimes et largement acceptables. Ils montrent que les résultats obtenus pour les densités maximales sont fiables. De plus, les deux enrobés présentant les écarts les plus importants, soit les enrobés **GG -** et **Bi +** sont quelque peu sujets au phénomène de saignement du bitume (voir tableau XVI). Cette difficulté

à garder l'enrobé homogène peut éventuellement expliquer en partie ces écarts légèrement plus élevés que pour les autres enrobés.

5.3.3 Sommaire des résultats

Dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental, les résultats obtenus pour la densité maximale et la teneur en bitume absorbé des enrobés SMA présentent relativement peu de variabilité et semblent acceptables. Les écarts mesurés entre les différents enrobés sont explicables compte tenu des variations spécifiques des paramètres de formulation. Les dosages des dix enrobés SMA ont été ajustés pour prendre en compte les taux réels d'absorption du bitume par les granulats.

5.4 Détermination de l'aptitude au compactage

La détermination de l'aptitude au compactage à la PCG est effectuée sur une masse précise d'échantillon, laquelle correspond à la quantité d'enrobé requise à 0% de vides pour avoir une hauteur d'éprouvette de 115 mm. La détermination de la masse requise est effectuée conformément à la procédure décrite dans la méthode LC (LC 26-004). Le calcul prend en compte la densité maximale de l'enrobé ajusté et le diamètre du cylindre de moulage. La masse requise est donc différente pour chaque enrobé SMA confectionné.

En comparant les résultats obtenus pour les $V_{be}\%$ prévus (tableau XI) et réels (tableau XIII), on s'aperçoit qu'il y a des écarts, plus ou moins grands selon les cas, pour chacun des dix enrobés SMA produits. Compte tenu des différences entre les valeurs prévues et les valeurs réelles de $V_{be}\%$, il a fallu procéder à une correction des dosages en bitume pour confectionner les enrobés qui seront testés à la PCG. Les dosages des dix enrobés SMA ont alors été corrigés sur la base des résultats présentés au tableau XIII et les enrobés ont été confectionnés à nouveau pour évaluer l'aptitude au compactage à la PCG.

Les dosages réels des enrobés SMA confectionnés à nouveau en laboratoire sont présentés au tableau XIV. Les granulométries des dix enrobés confectionnés dans cette phase du programme expérimental sont les mêmes que pour les formulations initiales et étaient présentées au tableau XII.

Tableau XIV

Dosages réels des enrobés SMA confectionnés en laboratoire après ajustement

		Type d'enrobés SMA									
		STD	Cell	GG+	GG -	Fibr +	Fill -	Fill +	Bi -	Bi +	Bi -
Caractéristiques spécifiques des enrobés	Refus 5 mm	70,0	70,0	75,0	65,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0
	Tamisat 80 μm	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	8,0	12,0	10,0	10,0	10,0
	V ₀ % réel	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,1	14,9	13,7
Dosage Massique (%)	Granulat 5-10 mm	70,5	70,8	75,6	65,4	70,1	70,4	70,5	70,7	70,3	70,7
	Granulat 0-2,5 mm	7,7	7,8	1,9	13,6	7,7	11,4	4,0	7,8	7,7	7,8
	Filler	14,7	14,8	15,5	13,9	14,6	11,0	18,4	14,7	14,7	14,8
	Pbi%	6,06	6,21	5,97	6,16	6,09	6,21	6,02	5,85	6,38	5,79
	Amiante	1,0		1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Cellulose			0,3							

Pour chaque enrobé, deux mélanges ont été confectionnés séparément ; chaque mélange a été soumis au curage normalisé directement dans le cylindre de moulage pour une période de temps ne dépassant pas 2 heures, puis a servi à la confection de l'éprouvette cylindrique à la PCG ($\phi \approx 150$ mm). Les teneurs en vides des éprouvettes compactées à la PCG, exprimées en pourcentage du volume de l'enrobé à 0% de

vides, ont été calculées pour les niveaux de compactage correspondant à 10, 60, 80, 100 et 200 girations. On trouve au tableau XV la synthèse des résultats obtenus pour les 20 éprouvettes confectionnées en laboratoire et compactées à la PCG. Même si il a précédemment été établi que, dans le cadre de cette recherche, la valeur considérée pour N_{design} est 60 girations, les résultats pour les valeurs potentielles des 80 et 100 girations sont également présentés dans ce tableau. Les courbes de la teneur en vides à la PCG en fonction du nombre de girations sont présentées à la figure 5.1. Les cinq graphiques de cette figure permettent de comparer séparément l'influence sur l'aptitude au compactage des cinq principaux paramètres de formulation soit : le type de fibre, la proportion de fibres, la proportion de gros granulat, la proportion de particules fines et la teneur en bitume.

La figure 5.1 montre que les courbes de compactage à la PCG des 10 enrobés sont sensiblement toutes parallèles. Toutefois, si certains paramètres étudiés n'ont pas eu une influence significative sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA, d'autres paramètres ont montré un effet beaucoup plus significatif. Ainsi, l'influence de la nature et du dosage des fibres semble faible (graphiques a) et b) de la figure 5.1). Par contre, une variation de la proportion de gros granulat, le refus au tamis de 5 mm, se traduit par une variation beaucoup plus grande de la compacité de l'enrobé (graphique c) de la figure 5.1)

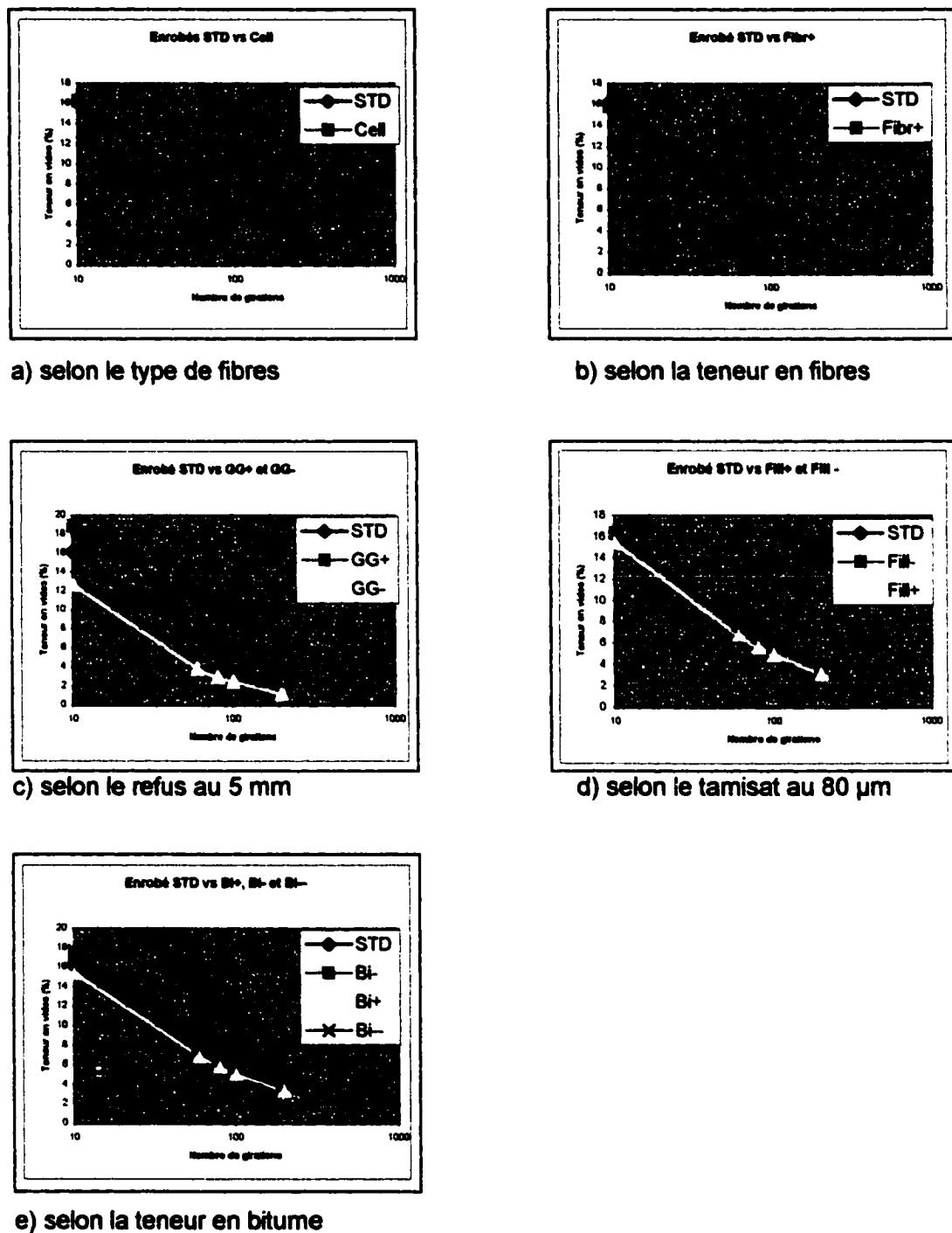


Figure 5.1 Courbes des teneurs en vides en fonction du nombre de girations pour les enrobés SMA du programme expérimental selon les différentes caractéristiques de formulation

5.4.1 Variations entre les deux échantillons pour un même enrobé

En vue de juger de la variabilité des résultats, les écarts entre les deux éprouvettes d'un même enrobé ont été calculés, de même que la moyenne des deux éprouvettes, pour tous les niveaux de compaction considérés. Les résultats sont présentés au tableau XV.

Les variations entre les deux échantillons d'un même enrobé des teneurs en vides mesurées à la PCG telles qu'on peut les voir au tableau XV sont généralement modestes et semblent très acceptables. On peut toutefois identifier deux enrobés pour lesquels on a enregistré des variations plus importantes : il s'agit des mélanges **GG+** et **GG-**. Parmi les dix enrobés confectionnés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental, ces deux enrobés, **GG+** et **GG-**, ont montré une plus grande susceptibilité face aux phénomènes de ségrégation (**GG+**) et de saignement du bitume (**GG-**), ce qui peut expliquer en partie la variabilité plus importante des résultats. Il a déjà été mentionné que la proportion de refus au tamis de 5,0 mm constitue un paramètre critique de la formulation d'un enrobé SMA, tant en ce qui concerne le contact pierre sur pierre qu'en ce qui concerne les vides dans l'enrobé ; l'étude en laboratoire du comportement des enrobés SMA à la presse à cisaillement giratoire semble le confirmer.

Même si la variabilité des résultats est plus grande pour les enrobés **GG+** et **GG-**, il n'a pas été jugé nécessaire de répéter les essais car il s'agit, de par leur propension à la ségrégation ou au saignement du bitume, de formulations moins propices à être utilisées comme couche de roulement pour la construction de chaussées.

En ce qui concerne les huit autres enrobés, l'uniformité semble très acceptable puisque toutes les variations des pourcentages de vides sont inférieures à 0,5% pour les mesures de compaction à 10, 60, 80 100 et 200 girations. De plus, pour chacun de ces enrobés, l'écart des vides à la PCG entre les deux échantillons (tableau XV) reste passablement constant au cours du compactage (entre N_{min} girations et N_{max} girations). C'est donc dire que les courbes du pourcentage de vides en fonction du

nombre de girations pour les deux échantillons d'un même enrobé sont très semblables et rapprochées. Il semble donc exister une bonne reproductibilité de l'essai de détermination de l'aptitude au compactage pour les enrobés SMA.

Il est intéressant de mentionner qu'une étude est actuellement en cours au ministère des Transports du Québec pour évaluer la reproductibilité des résultats avec l'essai de la mesure de l'aptitude au compactage des enrobés bitumineux à l'aide de la presse à cisaillement giratoire.

L'ensemble des résultats de la performance à la PCG des dix enrobés confectionnés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental sera analysé en détails au chapitre suivant.

Tableau XV

Performance à la PCG des enrobés SMA du programme expérimental
(teneurs en vides exprimées en % du volume de l'enrobé à 0% de vides)

		Enrobé STD				Enrobé Cell				Enrobé GG +				Enrobé GG -				Enrobé Fibr +				
		# 1	# 2	Moy	Δ	# 1	# 2	Moy	Δ	# 1	# 2	Moy	Δ	# 1	# 2	Moy	Δ	# 1	# 2	Moy	Δ	
PCG : Volume des vides (%)	N = 10G	15,5	15,9	16,2	0,6	16,5	16,1	16,3	0,4	18,3	19,7	18,9	1,2	12,0	13,3	12,6	1,3	15,8	15,9	15,8	0,2	
	N = 60G	7,6	7,3	7,4	0,4	7,9	7,6	7,7	0,4	10,5	11,7	11,1	1,2	3,2	4,4	3,8	1,2	7,1	7,4	7,3	0,3	
	N = 80G	6,5	6,1	6,3	0,4	6,8	6,5	6,7	0,3	9,5	10,6	10,1	1,2	2,5	3,4	3,0	1,0	6,0	6,4	6,2	0,4	
	N = 100G	5,7	5,4	5,5	0,2	6,1	5,7	5,9	0,3	8,7	9,9	9,3	1,1	2,0	2,9	2,5	0,8	5,2	5,5	5,4	0,4	
	N = 200G	3,7	3,7	3,7	0,0	4,3	3,9	4,1	0,3	6,9	8,1	7,5	1,2	1,5	1,9	1,7	0,3	3,3	3,6	3,5	0,4	
PCG : Volume des vides (%)		Enrobé FIII -				Enrobé FIII +				Enrobé Bi -				Enrobé Bi +				Enrobé Bi --				
		# 1	# 2	Moy	Δ	# 1	# 2	Moy	Δ	# 1	# 2	Moy	Δ	# 1	# 2	Moy	Δ	# 1	# 2	Moy	Δ	
		N = 10G	16,6	16,2	16,4	0,4	15,4	15,4	15,4	0,1	17,0	17,3	17,2	0,3	15,6	15,2	15,4	0,4	17,8	17,5	17,7	0,2
		N = 60G	7,8	7,6	7,7	0,2	6,7	6,7	6,7	0,1	8,3	8,5	8,4	0,2	6,8	7,0	6,9	0,2	9,1	9,2	9,1	0,1
		N = 80G	6,7	6,5	6,6	0,2	5,7	5,6	5,6	0,1	7,2	7,4	7,3	0,2	5,8	5,9	5,9	0,1	7,9	8,0	7,9	0,2
		N = 100G	5,8	5,7	5,7	0,2	5,0	4,8	4,9	0,2	6,4	6,7	6,5	0,3	5,0	5,2	5,2	0,2	7,0	7,2	7,1	0,2
		N = 200G	3,9	3,8	3,9	0,2	3,2	3,0	3,1	0,2	4,4	4,8	4,6	0,4	3,3	3,4	3,4	0,2	5,0	5,3	5,1	0,3

5.5 Examen visuel des enrobés SMA confectionnés en laboratoire

L'apparence des différents enrobés SMA confectionnés en laboratoire a été notée à différents moments : soit à l'état lâche, après le malaxage et avant le test à la PCG, et après la compaction. La synthèse de l'examen visuel des dix enrobés est présentée au tableau XVI.

Tous les enrobés SMA confectionnés avec des fibres d'amiante présentaient une apparence sensiblement moins lustrée (brillante) que l'enrobé produit avec les fibres de cellulose (ou qu'un enrobé conventionnel). Également, il est intéressant de mentionner qu'une fois refroidis, les enrobés confectionnés avec de l'amiante n'avaient, pour ainsi dire, aucune odeur perceptible comparativement à un enrobé conventionnel (ou à un enrobé SMA confectionné avec des fibres de cellulose). Il semble donc que les fibres d'amiante fixent (ou absorbent) de façon sélective certains composants des bitumes.

On sait que le bitume est composé de plusieurs éléments, entre autres les asphaltènes, les huiles et les résines (Young et coll. 1998). Les huiles et les résines du bitume semblent être beaucoup plus absorbées par les fibres d'amiante que par les fibres de cellulose, d'où l'aspect plus mat et la quasi-absence d'odeur de bitume ; on sait que les huiles sont responsables de l'aspect plus ou moins lustré de l'enrobé tandis que l'odeur du bitume est tributaire des résines (plus spécifiquement les maltènes), qui sont des produits hydrocarbonés cycliques.

Aucun des dix enrobés confectionnés en laboratoire ne semblait présenter de propension marquée au saignement. Toutefois, l'examen des briquettes compactées à la PCG nous montre que l'enrobé GG- se compacte plus facilement et pourrait être plus sujet au saignement ; par contre, à l'état lâche, nous n'avons pas observé une tendance au saignement de sorte que sa confection et son transport pourraient se faire sans problème.

Tableau XVI

**Examen visuel des enrobés SMA confectionnés en laboratoire
dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental**

Identification de l'enrobé	Examen visuel à l'état lâche	Observations des éprouvettes après compactage
STD	<ul style="list-style-type: none"> Assez raide et pierreux Aspect plutôt mat 	<ul style="list-style-type: none"> Homogène Macro-texture assez prononcée
Cell	<ul style="list-style-type: none"> Apparence plus lustrée 	<ul style="list-style-type: none"> Apparence plus lustrée Odeur de bitume
GG +	<ul style="list-style-type: none"> Très raide Très pierreux L'homogénéité semble déficiente 	<ul style="list-style-type: none"> Beaucoup de vides répartis non uniformément Macro-texture très prononcée
GG -	<ul style="list-style-type: none"> Moins pierreux Mastic prédominant 	<ul style="list-style-type: none"> Texture plus fine et assez fermée Saignement (1)
Fibr +	<ul style="list-style-type: none"> Forte cohésivité 	<ul style="list-style-type: none"> Assez semblable à l'enrobé STD
Fill -	<ul style="list-style-type: none"> Le volume du mortier bitumineux est plus faible 	<ul style="list-style-type: none"> Beaucoup de vides Texture plus grenue
Fill +	<ul style="list-style-type: none"> Très raide et cohésif Plus pâteux Difficile à manipuler 	<ul style="list-style-type: none"> Mélange dense Texture un peu plus fermée
Bi -	<ul style="list-style-type: none"> Plus raide 	<ul style="list-style-type: none"> Plus de vides Texture plus ouverte
Bi +	<ul style="list-style-type: none"> Plus pâteux Semblé bien équilibré 	<ul style="list-style-type: none"> Mélange dense Texture plus fermée Saignement (1)
Bi --	<ul style="list-style-type: none"> Il semble manquer de bitume Raide 	<ul style="list-style-type: none"> Beaucoup de vides Texture très ouverte

(1) : Lors du compactage à la PCG, une quantité de mortier bitumineux s'est infiltrée entre le moule cylindrique et sa plaque supérieure.

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS

L'analyse des résultats portera sur différents points selon l'ordre chronologique de réalisation et d'expérimentation pour un même enrobé : la teneur réelle en bitume absorbé (B.%), la densité maximale de l'enrobé (D_{mm}), l'aptitude au compactage et l'examen visuel des échantillons. Par la suite, compte tenu de l'analyse des résultats de la phase initiale d'expérimentation, une optimisation de la formulation sera effectuée et le comportement de ce nouvel enrobé SMA sera également vérifié. De plus, une évaluation de la résistance à l'orniérage sera effectuée en laboratoire sur l'enrobé SMA optimisé

6.1 Notes générales sur les résultats du programme expérimental

Avant d'analyser de façon plus systématique les résultats de la phase 1 du programme expérimental présentés dans le chapitre précédent, il convient de discuter brièvement de certains éléments plus généraux.

6.1.1 Étude de l'aptitude au compactage des dix enrobés SMA

L'aptitude au compactage étant un des principaux critères établis au départ pour évaluer la performance des enrobés SMA dans ce programme expérimental, il a été jugé préférable que les résultats de cet essai soient traités en quatre différentes sections correspondant aux paramètres de formulation qu'on a fait varier : les fibres (dosage et type), la proportion de gros granulat, la proportion de fines et la teneur en bitume.

6.1.2 Examen visuel des échantillons compactés à la PCG

Même si un tel examen reste très subjectif, une évaluation visuelle à l'aveugle a été effectuée sur les briquettes compactées à la PCG correspondant aux 10 différents enrobés SMA confectionnés lors du programme d'expérimentation dans le but de cibler les trois formulations présentant un meilleur équilibre. Les paramètres considérés étaient l'uniformité, l'absence de ségrégation, la texture et la quantité de vides apparents. Les enrobés Bit+, Fill+ et Fibr+ sont les trois formulations apparaissant comme les plus intéressantes.

De façon plus systématique, les résultats de l'examen visuel seront traités en quatre sections correspondant aux paramètres de formulation qu'on a fait varier : les fibres, la proportion de gros granulat, la proportion de filler et la teneur en bitume seront traités de façon comparative (et non pas par rapport à l'ensemble des différents enrobés).

6.1.3 Analyse de l'aptitude au compactage

L'analyse de l'aptitude au compactage des enrobés SMA se fera essentiellement sur deux points, soit sur les variations des valeurs moyennes de teneurs en vides entre les dix enrobés SMA étudiés et sur la conformité des différents enrobés SMA face aux exigences établies. L'objectif visé est de cerner l'influence des paramètres déterminants de formulation face à l'aptitude au compactage.

6.1.4 Conformité des enrobés SMA produits face aux exigences établies

Rappelons que parmi les dix enrobés SMA originaux testés à la PCG pour évaluer leur aptitude au compactage, on savait dès le départ que certains de ceux-ci sortaient littéralement des limites de composition typiques des enrobés SMA. Par conséquent, il était alors prévisible qu'on obtienne des résultats pas toujours probants c'est-à-dire en dehors des critères d'acceptation visés. L'objectif principal visé était plutôt de voir comment évolue l'aptitude au compactage des enrobés SMA en fonction du changement de certains de ces paramètres de formulation.

Par rapport aux exigences de compacité établis au départ, quatre enrobés sont clairement non-conformes : il s'agit des enrobés Bi -, Bi --, GG + et GG -. Pour les enrobés Bi -, Bi -- et GG +, la teneur en vides à la PCG est supérieure à 7% à la valeur de N_{design} girations. Il s'agit donc d'enrobés SMA qui se compactent trop lentement. L'enrobé GG + montre des teneurs en vides à la PCG trop faibles à N_{design} girations ainsi qu'à 200 girations ; il s'agit dans ce cas d'un enrobé qui se compacte trop facilement.

Quatre autres enrobés remplissent partiellement les exigences établies pour l'essai de détermination de l'aptitude au compactage à la PCG, soit les enrobés STD, Cell, Fibr + et Fill -. Dans ces quatre cas, les exigences sont remplies pour les niveaux de compaction correspondant à N_{init} et N_{final} . Par contre, ces enrobés SMA dépassent la valeur maximale de 7% de vides pour un N_{design} de 60 girations, ce qui veut dire, compte tenu des critères arbitraires établis au départ, qu'ils se compactent trop lentement. Ces quatre formulations auraient présenté des niveaux de compaction acceptables si on avait fixé la valeur de N_{design} à 80 girations comme c'est le cas pour les autres enrobés normalisés d'une dimension nominale de 10 millimètres.

Enfin, seulement deux enrobés testés, soit les enrobés Fill+ et Bi+, rencontrent toutes les exigences de compacité, que ce soit à N_{init} ou à N_{final} (soit respectivement 10 et 200 girations) qu'à une valeur de N_{design} de 60 girations (ces enrobés seraient également conformes si la valeur de N_{design} était établie à 80 ou encore 100 girations). Ces résultats ne sont guère surprenants puisque deux conditions étaient réunies pour réduire l'aptitude au compactage des enrobés produits : 1) la grande angularité des granulats employés et 2) la plus grande cohésivité des enrobés SMA. Ainsi, les granulats employés possèdent une angularité plus prononcée que la moyenne des granulats couramment employés pour la réalisation des enrobés bitumineux au Québec. Pour le granulat fin spécifiquement, cette caractéristique de fabrication est perceptible avec le coefficient d'écoulement de 109 (voir tableau VI), une valeur nettement plus élevée que les granulats fins typiques employés dans la confection des enrobés bitumineux. Par le passé, au cours de divers projets, ces mêmes granulats ont

montré une moins bonne aptitude au compactage que beaucoup d'autres granulats. Par contre, l'expérience sur chaussée a également montré que ces granulats pouvaient efficacement servir à produire des enrobés résistants à l'usure et à l'orniérage. Ainsi, il était donc prévisible qu'on observe des niveaux de compaction plus faibles (i.e. des teneurs en vides plus élevées) avec des enrobés réalisés avec de tels granulats. Le tableau XVII résume la performance à la presse à cisaillement giratoire des dix enrobés SMA expérimentaux.

6.2 Influence du type et du dosage des fibres sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA

Les fibres employées dans les enrobés SMA ont deux effets diamétralement opposés. En premier lieu, l'ajout de fibres permet de limiter les risques d'hétérogénéité de l'enrobé (ségrégation et saignement) en augmentant la cohésivité du mortier bitumineux, mais elles rendent alors l'enrobé plus difficile à compacter. D'un autre côté, les fibres agissent un peu comme un filler et augmentent le volume du mortier bitumineux améliorant ainsi l'aptitude au compactage. Compte tenu de ces deux effets opposés, il aurait été quelque peu difficile de prédire à priori l'effet global sur les résultats à la PCG d'un changement au niveau des fibres. On peut toutefois supposer qu'il existe un optimum quant au dosage des fibres. Toutefois, ce n'est pas but de cette recherche et nous n'explorerons pas davantage cette facette dans ce mémoire.

Dans cette section, nous tenterons de déterminer, pour les enrobés SMA testés, deux choses : 1) est-ce que les fibres d'amiante et les fibres de cellulose donnent les mêmes résultats à la PCG et 2) est-ce qu'un dosage de 1,5% de fibres d'amiante donne de meilleures performances qu'un dosage de 1,0%. Rappelons que les fibres sont utilisées comme agent stabilisant dans les enrobés SMA et que leur rôle principal est donc d'augmenter la cohésion du mortier bitumineux pour éviter le phénomène de saignement.

Le tableau XVIII présente la compilation des résultats de l'essai à la PCG pour les enrobés STD, Cell et Fibr +.

Tableau XVII

Résumé des performances des mélanges expérimentaux lors des essais à la PCG
 (les valeurs ombragées correspondent à une éventuelle non-conformité pour le nombre de girations choisi).

Résultats à la PCG	Identification des enrobés									
	STD	Cell	GG+	GG-	Fibr+	Fibr-	Fibr+	Bi-	Bi+	Bi--
Vides à 10G	Vi% > 11	Vi% > 11	Vi% > 11	Vi% > 11	Vi% > 11	Vi% > 11	Vi% > 11	Vi% > 11	Vi% > 11	Vi% > 11
Vides à 60G	Vi% > 7	Vi% > 7	Vi% > 7	Vi% < 4	Vi% > 7	Vi% > 7	4 < Vi% < 7	Vi% > 7	4 < Vi% < 7	Vi% > 7
Vides à 80G	4 < Vi% < 7	4 < Vi% < 7	Vi% > 7	Vi% < 4	4 < Vi% < 7	4 < Vi% < 7	4 < Vi% < 7	Vi% > 7	4 < Vi% < 7	Vi% > 7
Vides à 100G	4 < Vi% < 7	4 < Vi% < 7	Vi% > 7	Vi% < 4	4 < Vi% < 7	4 < Vi% < 7	4 < Vi% < 7	4 < Vi% < 7	4 < Vi% < 7	Vi% > 7
Vides à 200G	Vi% > 2	Vi% > 2	Vi% > 2	Vi% < 2	Vi% > 2	Vi% > 2	Vi% > 2	Vi% > 2	Vi% > 2	Vi% > 2
Conformité globale	Oui sauf à 60G	Oui sauf à 60G	Non sauf à 200G	Aucune	Oui sauf à 60G	Oui sauf à 60G	OUI	non pour 60-80G	OUI	Non sauf à 200G
Remarques			Sujet à la ségrégation	Sujet à la ségrégation						

Tableau XVIII

Influence du type et du dosage des fibres sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA (refus 5 mm : 70% ; tamisat 80 µm : 10% ; V_{bs} % : 14,5 %)

		Identification de l'enrobé		
		STD	Cell	Fibr +
	Teneur en fibres * (%)	1,0	0,3	1,5
PCG : Teneur en Vides (%)	N = 10 girations	16,2	16,3	15,8
	N = 60 girations	7,4	7,7	7,3
	N = 80 girations	6,3	6,7	6,2
	N = 100 girations	5,5	5,9	5,4
	N = 200 girations	3,7	4,1	3,5

* le détail des formulations est présenté au tableau XIV

Ainsi, les fibres de cellulose, même si leur dosage était plus faible, ont eu pour effet de réduire quelque peu l'aptitude au compactage des enrobés SMA (figure 6.1). Dans ce cas précis, il est difficile de déterminer si cette augmentation des vides a été provoquée par le dosage plus faible en fibres ou par la nature différente des fibres. Les dosages employés pour les deux types de fibre sont des valeurs typiques pour les enrobés SMA qui ont été utilisés lors de plusieurs projets. Il y a lieu ici de poser deux questions concernant le dosage des fibres de cellulose : 1) quel est l'effet d'une augmentation ou d'une baisse de la proportion de fibres de cellulose ? et 2) pourrait-on réduire le dosage de fibres de cellulose tout en gardant une performance acceptable et en empêchant le saignement ? Pour y répondre il faudrait une recherche plus poussée où on étudierait le comportement d'enrobés SMA confectionnés avec plusieurs teneurs en fibres de cellulose.

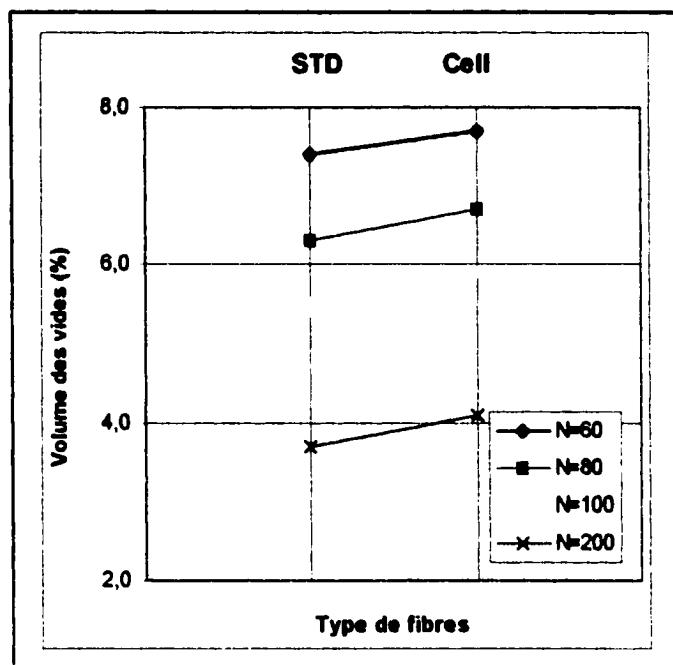


Figure 6.1 Influence du type de fibres sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA

À l'opposé, la figure 6.2 indique qu'un dosage de fibres d'amiante plus élevé s'est traduit par des vides plus faibles lors de l'essai à la PCG. L'augmentation de la teneur en fibres d'amiante dans le programme expérimental était assez restreinte et on ne peut affirmer qu'une augmentation prononcée de la teneur en fibres d'amiante (par exemple, quatre ou cinq fois plus) provoquerait une baisse des vides à la PCG ; il n'est pas impossible qu'avec des dosages sensiblement plus élevés, on observe un raidissement prononcé du mortier bitumineux et que l'enrobé devienne moins apte au compactage (i.e. vides plus élevés). À la lueur de ces résultats, on peut s'interroger quant à l'optimisation de la teneur en fibres : peut-être qu'une teneur en fibres d'amiante de l'ordre de 0,75% ou 0,50% pourrait s'avérer optimale.

Ainsi, globalement, le type de fibres étudié dans le programme expérimental et leur dosage ne semblent pas avoir eu une influence prépondérante sur l'aptitude au

compactage des enrobés SMA. Les variations observées sont généralement inférieures à 0,5% entre les 3 enrobés pour les 5 niveaux de compactage analysés.

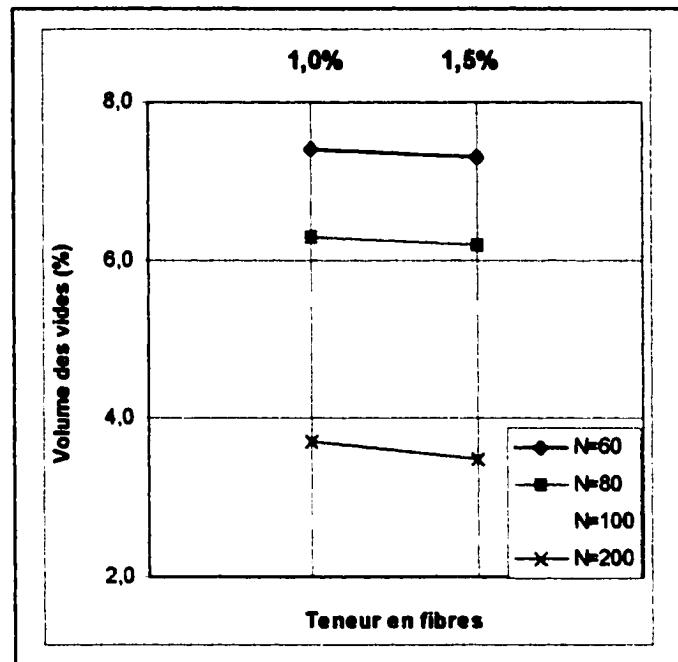


Figure 6.2 Influence de la proportion de fibres d'amiante sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA

6.2.1 Aspect visuel comparatif des enrobés SMA confectionnés avec des fibres de type ou dosage différent

Si on compare l'apparence des éprouvettes compactées à la PCG des deux enrobés **STD** et **Cell**, on ne remarque aucune différence significative (figure 6.3) autre que le lustre. À l'état lâche, ces deux enrobés n'étaient pas enclins aux phénomènes de saignement et de ségrégation. Lors du malaxage, l'enrobé **Cell** semblait présenter du saignement ou encore un surdosage en bitume (à cause de son aspect lustré), mais un examen visuel plus approfondi avant le compactage a permis de constater une bonne homogénéité de cet enrobé.



Figure 6.3 Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD et Cell

Il est clair que le dosage en fibres a une influence sur la cohésivité de l'enrobé. L'enrobé Fibr + semblait plus collant et se maniait un peu plus difficilement. L'examen des briquettes compactées à la PCG permet de constater qu'il y a un peu moins de vides sur la paroi et, également, que la texture superficielle de l'enrobé Fibr + est un peu plus fermée sur le dessus de la briquette tel que montré à la figure 6.4. Cette constatation s'explique du fait que l'augmentation du volume de fibres se traduit par une augmentation du volume du mortier bitumineux. Par contre, ce même mortier bitumineux est plus cohésif. On peut donc croire qu'en pratique, sur chantier, une augmentation de la quantité de fibres dans un enrobé SMA permet de produire un enrobé plus fermé (i.e. moins de vides) mais pour lequel il est plus difficile de faire des corrections manuelles même s'il se compactera plus facilement.

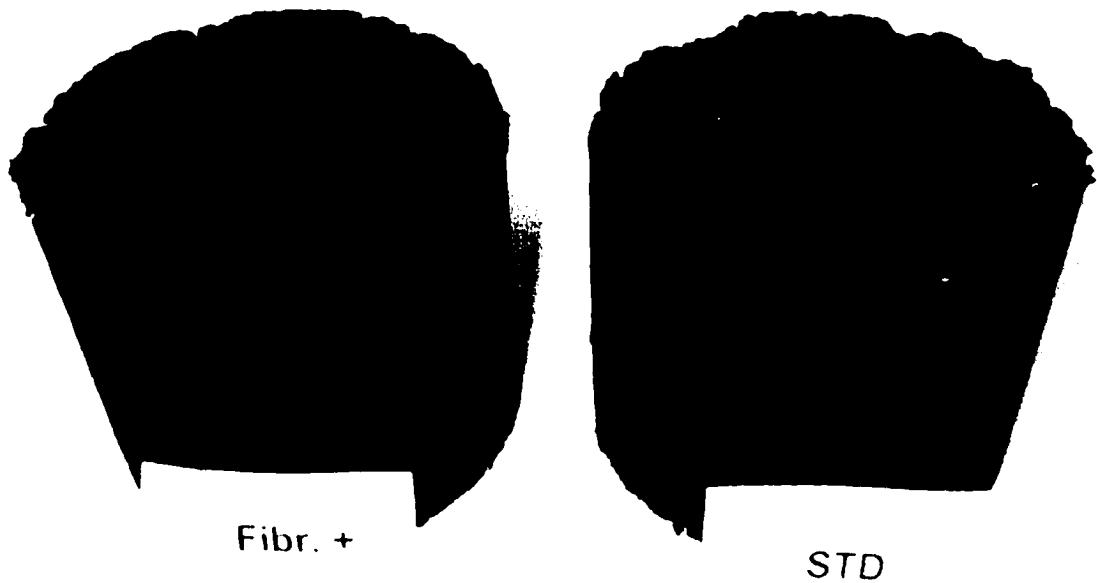


Figure 6.4 Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés **STD** et **Fibr +**

6.3 Influence de la proportion de gros granulat (%refus au tamis 5 mm) sur la performance des enrobés SMA

Le tableau XIX synthétise les résultats des teneurs en vides à la PCG des enrobés SMA où variait la proportion de gros granulat, soit plus spécifiquement les enrobés identifiés **STD**, **GG+** et **GG-**. La figure 6.5 illustre graphiquement l'influence de ce paramètre de formulation.

Tableau XIX

Influence de la proportion de gros granulat sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA (tamisat 80 μm : 10% ; $V_{\text{b}}\%$: 14,5 ; fibres d'amiante 1%)

		Identification de l'enrobé		
		STD	GG+	GG-
Proportion de gros granulat : refus tamis 5 mm (%) *		70	75	65
PCG : Teneur en Vides (%)	N = 10 girations	16,2	19,5	12,6
	N = 60 girations	7,4	11,7	3,8
	N = 80 girations	6,3	10,1	2,9
	N = 100 girations	5,5	9,3	2,5
	N = 200 girations	3,7	7,5	1,7

* le détail des formulations est présenté au tableau XIV

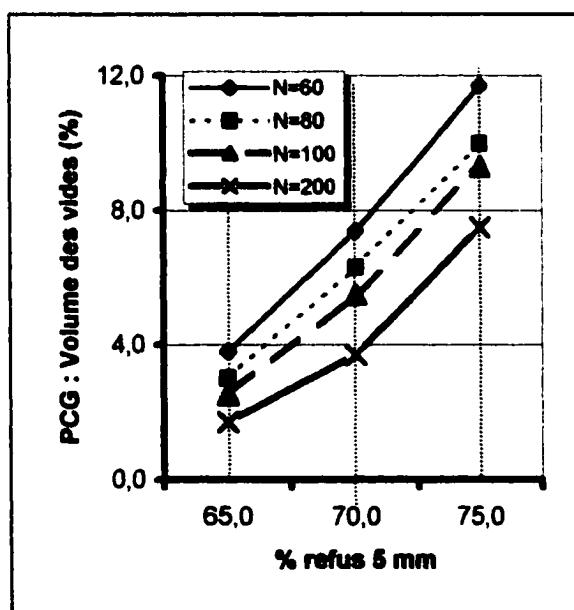


Figure 6.5 Influence de la proportion de gros granulat sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA

On peut voir qu'une augmentation (de 5%) de la proportion de gros granulat (i.e. l'enrobé GG+ par rapport à l'enrobé STD) se traduit par un enrobé beaucoup plus difficile à compacter et qu'à l'inverse, une baisse de la proportion de gros granulat (i.e. l'enrobé GG- par rapport à l'enrobé STD) provoque une baisse importante des vides. Le fait d'augmenter la proportion de gros granulat dans un enrobé SMA a pour effet d'éloigner davantage la courbe granulométrique de l'enrobé de la courbe de densité maximale, ce qui se traduit par une augmentation des vides entre les particules. La figure 6.6 illustre ce phénomène.

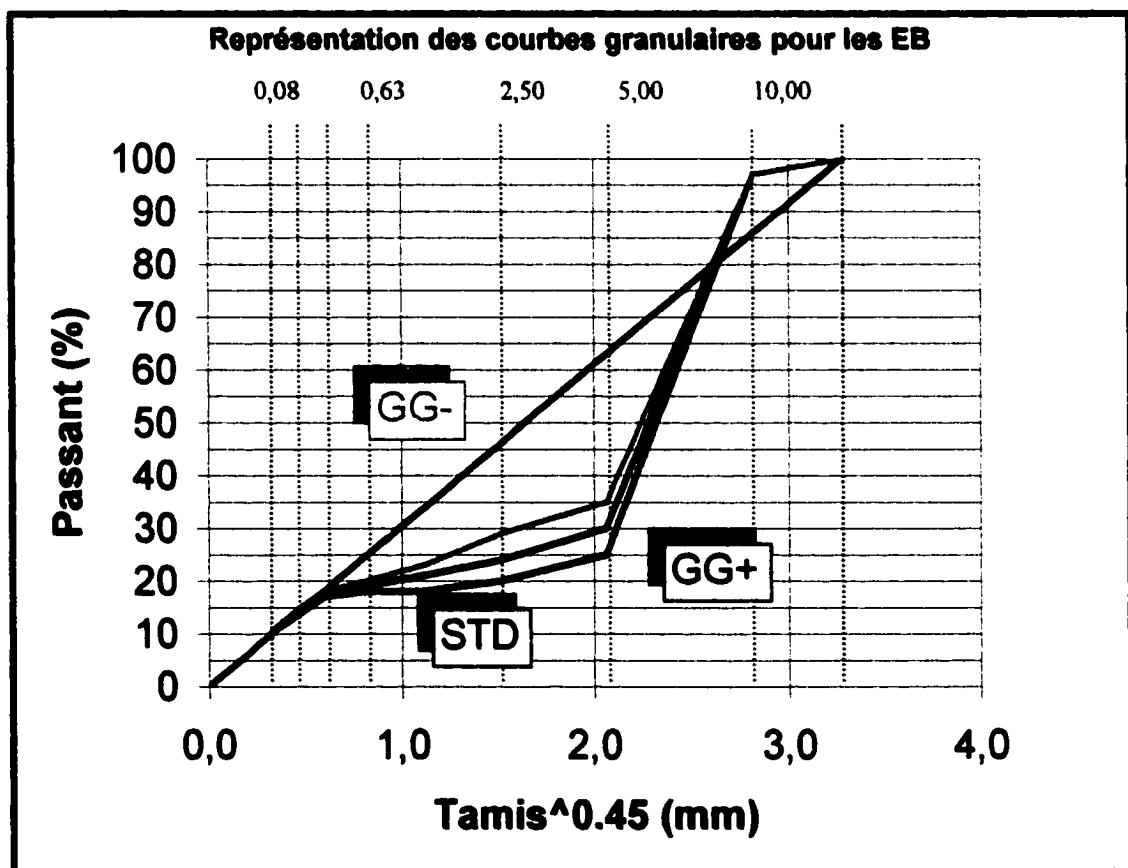


Figure 6.6 Granulométries comparatives des enrobés SMA STD, GG+ et GG- ; la droite correspond à la courbe granulométrique de densité maximale

L'effet sur l'aptitude au compactage de l'enrobé de la proportion de gros granulat est nettement plus critique que celui des fibres. Une variation de la proportion de gros granulat lors de la fabrication à l'usine se traduira en chantier par des différences majeures quant au niveau de compactage obtenu. Puisque le degré de compactage a une influence importante sur la durabilité à la sécurité de l'enrobé, le contrôle de ce paramètre de production s'avère particulièrement critique. Lors de la production d'enrobé SMA, on devrait donc en usine apporter un grand soin au contrôle de la granulométrie, tant en ce qui concerne l'uniformité granulométrique du gros granulat comme tel qu'en ce qui concerne le respect des proportions des différents matériaux granulaires.

Il est possible que la grande sensibilité observée de ce paramètre de formulation soit en partie causée par la grande angularité des granulats employés dans ce programme expérimental ; il serait intéressant de répéter l'expérimentation avec des granulats concassés moins anguleux pour vérifier si la sensibilité liée à ce paramètre de formulation est moins accentuée.

Les niveaux de vides observés avec le mélange GG+ laissent croire qu'il s'avérerait impossible de produire un enrobé SMA conforme aux normes d'aptitude au compactage (spécifiquement à N_{design} girations) avec une telle proportion (i.e. 75%) de gros granulat. Pourtant, en Angleterre (Richardson, 1999) on produit régulièrement des enrobés SMA ayant des proportions de gros granulat comprises entre 75 et 80% de la masse granulaire. Toutefois, il faut mettre en perspective qu'une telle proportion de gros granulat génère beaucoup de vides inter-granulaires et que ceux-ci devront éventuellement être comblés en bonne partie si on veut un comportement adéquat de l'enrobé. Ainsi, il faudrait pour ce faire augmenter la teneur en bitume et éventuellement les proportions de fibres et de filler ; tous ces éléments tendent à faire baisser les vides. C'est une alternative que nous traiterons à la section 6.6. Deux facteurs expliquent également la forte teneur en vides mesurée avec l'enrobé. Premièrement, un granulat possédant une grande angularité a des vides inter-granulaires plus qu'un granulat moins angulaire de même classe granulaire ; il a déjà été mentionné que le granulat employé dans le programme expérimental est très

angulaire. Deuxièmement, la granulométrie du gros granulat est très serrée, ce qui tend à augmenter les vides inter-granulaire. Si le gros granulat employé pour confectionner les enrobés SMA avait été moins uniforme, par exemple en combinant les granulats des classes granulaires 5-10mm et 10-14 mm, les vides mesurés à la PCG auraient éventuellement été moindres pour un même volume de mortier bitumineux.

6.3.1 Aspect visuel comparatif des enrobés SMA confectionnés avec des teneurs différentes en gros granulat

Tout comme pour l'aptitude au compactage, l'examen visuel nous montre clairement que la proportion de gros granulat (calculée par la proportion de refus au tamis de 5 mm) constitue une caractéristique de formulation très significative pour les enrobés SMA. Une variation, même faible, de la proportion de gros granulat se traduit par une énorme différence en ce qui concerne la texture superficielle des enrobés. Ainsi, la texture superficielle de l'enrobé GG+ est très pierreuse et présente beaucoup de vides après compaction à la PCG, tel que le montre la figure 6.7. Après le malaxage, cet enrobé était également difficile à manipuler et sujet à la ségrégation. On a littéralement l'impression d'avoir oublié d'y mettre du granulat fin.

À l'opposé, dans l'enrobé SMA comportant 5% moins de gros granulat, l'enrobé GG-, la phase mortier est visuellement beaucoup plus perceptible. Même si les proportions de particules fines (passant le tamis de 80 µm) et de fibres sont les mêmes que dans l'enrobé STD, l'enrobé GG- semble nettement plus maniable. Les briquettes de l'enrobé GG- compactées à la PCG présentaient une texture superficielle très fermée et probablement inacceptable pour un enrobé de surface utilisé sur route (adhérence pneumatique/chaussée insuffisante).

La proportion de gros granulat à utiliser dans un enrobé SMA est une caractéristique de formulation critique : une différence de quelques degrés de pourcentage entre la formulation optimale établie en laboratoire et la formulation réelle produite au chantier

pourra se traduire par une différence appréciable dans l'apparence et la consistance de l'enrobé.

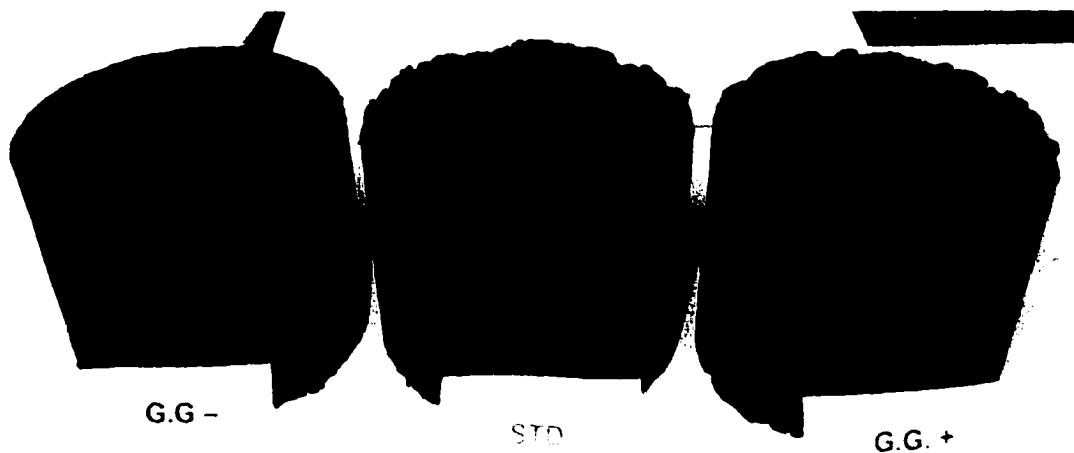


Figure 6.7 Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD, GG - et GG +

6.4 Influence de la teneur en particules fines, passant le tamis de 80 µm, sur la performance d'un enrobé SMA

Le tableau XX synthétise les résultats à la PCG des enrobés SMA où variait la teneur en fines (déterminée par le tamisat en % au tamis de 80 µm), soit plus spécifiquement les enrobés STD, Fill+ et Fill-. L'ensemble des ces résultats est représenté graphiquement à la figure 6.8.

Tableau XX

Influence de la proportion de fines sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA
 (refus 5 mm : 70% ; V_{be} % : 14,5 ; amiante : 1%)

		Identification de l'enrobé		
		STD	Fill.+	Fill.-
	Proportion de fines : tamisat tamis 80 µm (%)*	10,0	12,0	8,0
PCG : Teneur en Vides (%)	N = 10 girations	16,2	15,4	16,4
	N = 60 girations	7,4	6,7	7,7
	N = 80 girations	6,3	5,6	6,6
	N = 100 girations	5,5	4,9	5,7
	N = 200 girations	3,7	3,1	3,9

* le détail des formulations est présenté au tableau XIV

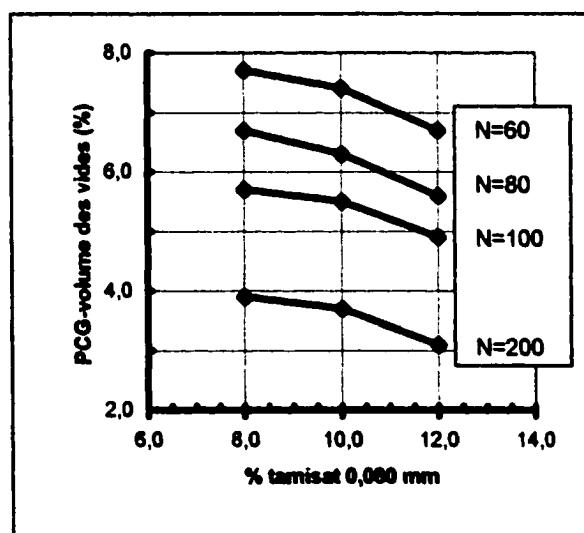


Figure 6.8 Influence de la proportion de fines sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA

Les résultats montrent qu'une augmentation de la teneur en particules fines se traduit par une augmentation de l'aptitude au compactage de l'enrobé SMA. En effet, les résultats présentés au tableau XX et à la figure 6.8 indiquent une baisse des vides dans un enrobé SMA après compaction à la PCG. Pour les enrobés conventionnels, le dosage en filler est souvent modifié pour ajuster la quantité de vides interstitiels ; la même logique semble s'appliquer pour les enrobés SMA. L'augmentation de la quantité de particules fines, même si elle permet d'augmenter le volume du mortier bitumineux et ainsi réduire les vides, a également pour effet d'augmenter la cohésivité du mortier bitumineux. D'un autre côté, un dosage plus élevé en particules fines se traduit également par une plus grande surface spécifique de la masse minérale qui, si elle n'est pas accompagnée par une augmentation de la teneur en bitume, réduira l'épaisseur du film de bitume effectif sur les particules.

6.4.1 Aspect visuel comparatif des enrobés SMA confectionnés avec des teneurs différentes en particules fines

L'observation des éprouvettes compactées à la PCG (figure 6.9) montre que la texture superficielle de l'enrobé SMA contenant une teneur plus élevée en particules fines, l'enrobé **Fill+**, est plus fermée et dense. À l'inverse, la texture superficielle de l'enrobé **Fill-** est plus grenue. Également, lors de la confection, l'enrobé **Fill+** nous est apparu plus cohésif que les deux autres. L'enrobé **Fill +** semblait être un des enrobés SMA les plus équilibrés parmi les dix différentes formulations confectionnées dans le cadre du programme expérimental.

Toutefois, aucun de ces enrobés, même l'enrobé **Fill -** avec une proportion plus faible en fines, ne présentait de saignement ou de ségrégation perceptible, probablement à cause de la présence d'une quantité suffisante d'agent stabilisant.

Lors de l'optimisation d'un enrobé SMA, il y a lieu de croire que la modification du dosage en fines servira probablement à deux fonctions principales : l'ajustement des vides interstitiels et la modification de la texture superficielle à des fins de sécurité.

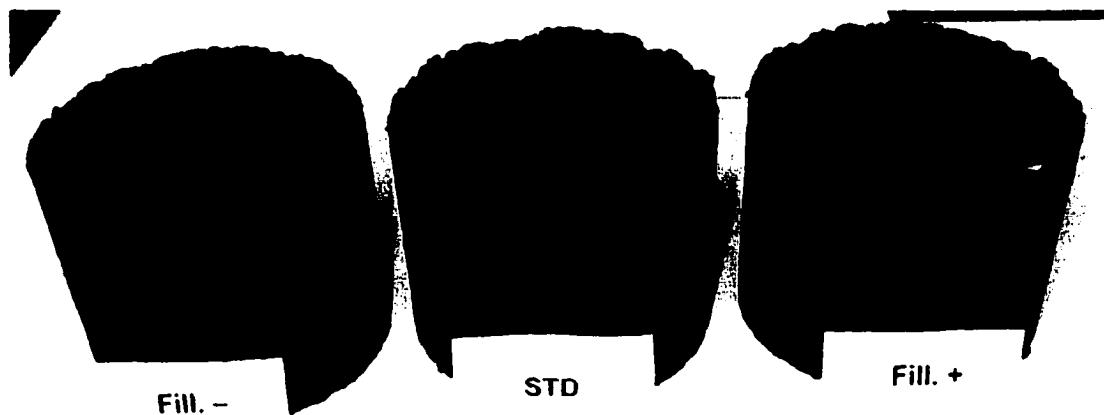


Figure 6.9 Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD, Fill. – et Fill. +

6.5 Influence du volume de bitume effectif, $V_{be}\%$, sur la performance de l'enrobé SMA

Le tableau XXI présente le sommaire des résultats du volume des vides mesuré à la PCG des enrobés SMA confectionnés dans le cadre de la phase 1 du programme expérimental mis en perspective de la variation du volume de bitume effectif, $V_{be}\%$. L'ensemble des ces résultats est également présenté sous forme graphique à la figure 6.10.

Tableau XXI

Influence de la teneur en bitume sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA
 (refus 5 mm : 70% ; tamisat 80 μm : 10% ; amiante : 1%)

		Identification de l'enrobé			
		STD	Bi +	Bi -	Bi ..
Volume de bitume effectif $V_{be}(\%)^*$		14,5	14,9	14,1	13,7
PCG : Teneur en Vides (%)	N = 10 girations	16,2	15,4	17,2	17,7
	N = 60 girations	7,4	6,9	8,4	9,1
	N = 80 girations	6,3	5,9	7,3	7,9
	N = 100 girations	5,5	5,1	6,5	7,1
	N = 200 girations	3,7	3,4	4,6	5,1

* le détail des formulations est présenté au tableau XIV

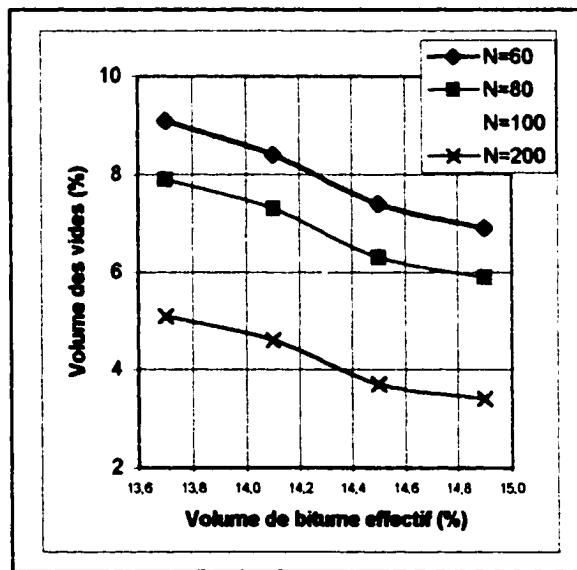


Figure 6.10 Influence de la teneur en bitume (exprimée en $V_{be}\%$) sur l'aptitude au compactage des enrobés SMA

Tout comme pour un enrobé conventionnel, les résultats du tableau XXI indiquent qu'une diminution de la teneur en bitume se traduit par une augmentation de la quantité de vides dans l'enrobé SMA, et ce, pour tous les niveaux de compactage. Un premier élément évident permet d'expliquer cette tendance : une augmentation de la teneur de bitume agit au niveau du mortier bitumineux pour en augmenter le volume et ainsi remplir une plus grande part des vides entre les particules du gros granulat. On peut également supposer que le bitume a une action lubrifiante lors de l'action de pétrissage de l'enrobé dans la presse à cisaillement giratoire et qu'une plus grande teneur en bitume augmente l'action lubrifiante, laquelle augmentation se traduit à son tour par une baisse de la quantité de vides à la PCG.

La revue de la documentation a mis en perspective que la teneur élevée en bitume constitue une des caractéristiques de base des enrobés SMA. Les résultats obtenus pour l'enrobé Bi --, et à un niveau moindre avec l'enrobé Bi --, montrent qu'une faible teneur en bitume diminue l'aptitude au compactage de l'enrobé SMA. Ainsi, il est probablement illusoire de formuler des enrobés SMA pauvres ou économiques (tel l'enrobé Bi --), c'est-à-dire avec une teneur en bitume réduite. Une économie est réalisée au niveau du coût de fabrication au détriment d'une diminution de la performance et de la durabilité.

La revue de la documentation montrait également que la stabilité à l'omérage des enrobés SMA était en majeure partie tributaire du squelette granulaire spécifique à ce type d'enrobé. Un tel squelette granulaire riche en grosses particules contient par contre beaucoup de vides et une teneur élevée en bitume constitue un moyen approprié pour réduire les vides interstitiels, à condition de doser adéquatement le filer et l'agent stabilisant pour éviter le problème du saignement associé aux teneurs élevées en bitume.

6.5.1 Aspect visuel comparatif des enrobés SMA confectionnés avec différentes teneurs en bitume effectif

Tout comme pour les enrobés conventionnels, le bitume, de par ses propriétés liantes, de remplissage et lubrifiantes, joue un rôle important en ce qui concerne l'apparence des enrobés SMA. Les enrobés SMA confectionnés dans le cadre du programme expérimental semblaient être très riches en bitume, même dans le cas des enrobés ayant une teneur en bitume plus faible ; la quantité supplémentaire de filler minéral et la présence de fibres augmentent le volume du mastic bitumineux et donnent l'impression d'un enrobé plus riche.

Par contre, les enrobés SMA les moins riches en bitume, soit les enrobés Bi - et Bi --, semblaient plus raides. Leur texture superficielle après compaction était également plus ouverte et moins intéressante, tel qu'on peut le voir à la figure 6.11. De plus, il faut garder à l'esprit qu'un enrobé SMA ayant une teneur en bitume réduite risque de présenter d'autres désavantages majeurs comme une perméabilité plus grande, une durabilité inférieure et un plus grand risque d'arrachement.

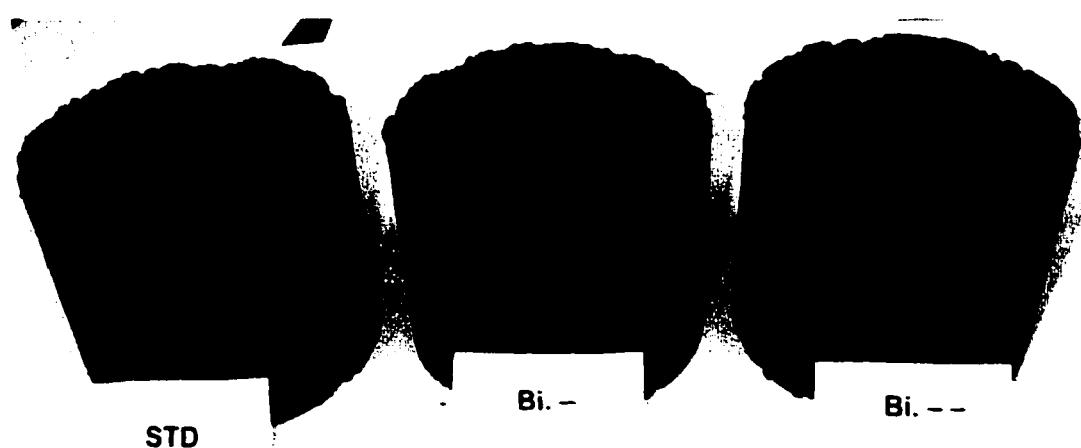


Figure 6.11 Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD, Bi- et Bi--

À l'inverse, une augmentation de la teneur en bitume, par rapport à l'enrobé de base, n'a semblé présenter que des avantages. Tout en présentant un aspect très pierreux à l'état lâche, l'enrobé Bi + semblait très équilibré ; en fait, d'après son apparence, on pourrait sûrement le classer, parmi les dix enrobés SMA confectionnés dans la phase 1 du programme expérimental, comme un des trois plus prometteurs. Cet enrobé présentait un bon compromis entre la cohésivité et la maniabilité. Les vides après compaction semblaient également raisonnables et bien répartis, tel qu'on peut le voir à la figure 6.12, assurant ainsi une bonne durabilité et une perméabilité réduite. Même si la teneur en bitume de l'enrobé Bi + était sensiblement plus élevée que celle d'un enrobé conventionnel, il ne semblait pas sujet au saignement. L'inconvénient principal de cet enrobé plus riche en bitume est son coût de fabrication un peu plus élevé, compte tenu que le bitume constitue la matière première la plus coûteuse.

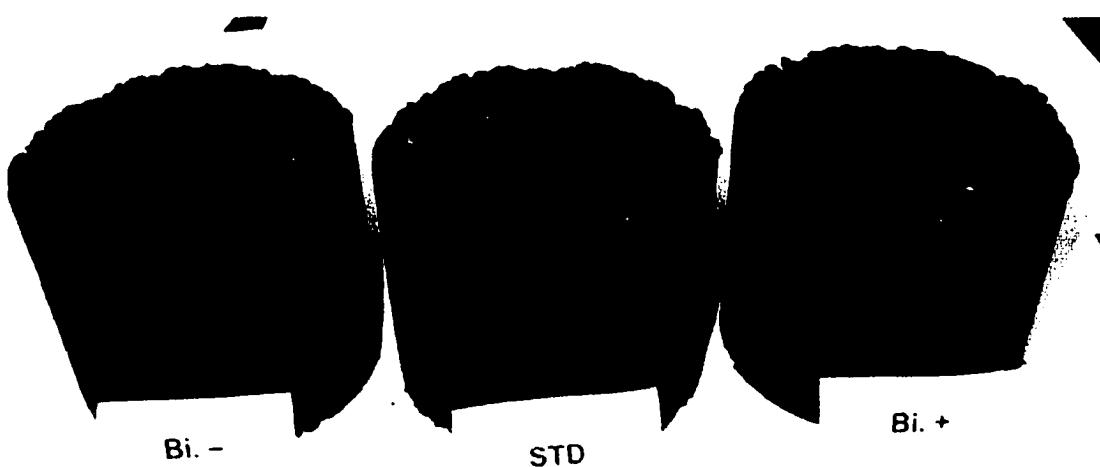


Figure 6.12 Aspect superficiel des briquettes compactées à la PCG des enrobés STD, Bi- et Bi+

6.6 Phase 2 - Optimisation de la formulation

La phase initiale d'expérimentation nous a permis de constater l'effet spécifique de différents paramètres de formulation sur les propriétés des enrobés SMA et également d'évaluer les formulations qui semblaient les plus prometteuses. Ces effets ont clairement été illustrés et commentés dans les sous-sections précédentes. Maintenant, il y a lieu d'examiner les résultats obtenus dans l'optique de préciser une formulation optimisée et de tenter la formulation, compte tenu des critères qualitatifs sélectionnés au départ et des éléments d'analyse mis en perspective jusqu'à maintenant.

6.6.1 Buts visés par l'optimisation

Même si deux des dix enrobés SMA du programme expérimental étaient conformes aux exigences établies au départ, telles qu'évaluées par l'examen visuel et par la détermination de l'aptitude au compactage à la PCG, il y a lieu de viser une optimisation de la formulation parce que l'ensemble des résultats, pour ces deux enrobés, est à la limite des critères pré-établis. En effet, les deux mélanges conformes pour le test à la PCG, soit les enrobés Bit+ et Fill+, ont donné des résultats assez près de la valeur limite supérieure des exigences de compaction à N_{design} girations : les résultats sont respectivement de 6,9% et 6,7% comparativement aux limites établies du critère pour N_{design} , soit entre 4 et 7% de vides. L'étude comparative des dix enrobés SMA a montré qu'une faible variation de certains paramètres de formulation peut dans certains cas changer de façon plus que significative l'aptitude au compactage de l'enrobé SMA. On peut alors considérer que, même pour les deux enrobés jugés conformes, une variation entre la formulation théorique en laboratoire et la formulation réelle en chantier pourrait se traduire par une non-conformité de l'enrobé. L'optimisation visera donc, en premier lieu, à formuler un enrobé SMA qui se rapprochera de la valeur médiane des exigences de vides à N_{design} girations, tout en respectant les exigences à N_{min} et à N_{max} girations. En quelque sorte, on cherche à obtenir un enrobé SMA un peu plus compactable mais qui conserve des bonnes propriétés de surface.

6.6.2 Séquence d'optimisation

Deux nouveaux enrobés à matrice de pierre ont été conçus lors de la phase optimisation : l'enrobé **SMA-X** et l'enrobé **SMA-Y**. Ces deux enrobés optimisés sont le fruit de deux approches sensiblement différentes. La figure 6.13 présente le logigramme employé lors de la phase optimisation de cette recherche et permet de comparer la séquence d'optimisation des deux approches. On peut décrire simplement la différence entre les deux approches par l'énoncé suivant : l'enrobé optimisé **SMA-X** priviliege l'économie (coût de production) tout en assurant une performance supérieure alors que l'enrobé optimisé **SMA-Y** priviliege la performance tout en visant un coût de production raisonnable. Toutefois, les deux approches utilisées ne sont pas les seules qu'on aurait pu employer.

6.6.3 L'enrobé optimisé **SMA-Y**

Même si les résultats laissent croire qu'il n'existe pas de variation linéaire entre les taux de compaction et les différents paramètres quantitatifs de formulation, une interpolation linéaire a été effectuée pour optimiser la formulation initiale de l'enrobé SMA en faisant varier plus d'un paramètre à la fois. Il y a tout lieu de croire qu'en interpolant de façon linéaire, l'imprécision restera raisonnable.

L'enrobé **SMA-Y** est surtout optimisé sur la performance. Or, la revue de la documentation a clairement montré que la résistance supérieure des enrobés SMA est en bonne partie tributaire du squelette granulaire permettant un contact pierre sur pierre. On sait également qu'une forte proportion de gros granulat est requise pour assurer ce contact pierre sur pierre. La première modification de la formulation consistera donc en une augmentation de la proportion de gros granulat (refus au tamis de 5 mm). Par contre, les résultats expérimentaux ont montré qu'une augmentation de la proportion de gros granulat se traduit par une baisse importante de l'aptitude au compactage de l'enrobé. Compte tenu de la grande sensibilité de ce paramètre de formulation, nous avons proposé d'augmenter légèrement la proportion de gros

granulat et de la faire passer à 70,5%. Par interpolation linéaire, on déduit que cette augmentation de la proportion de gros granulat amènera une augmentation des vides d'environ 0,7% à 60 girations (figure 6.14) par rapport à l'enrobé STD.

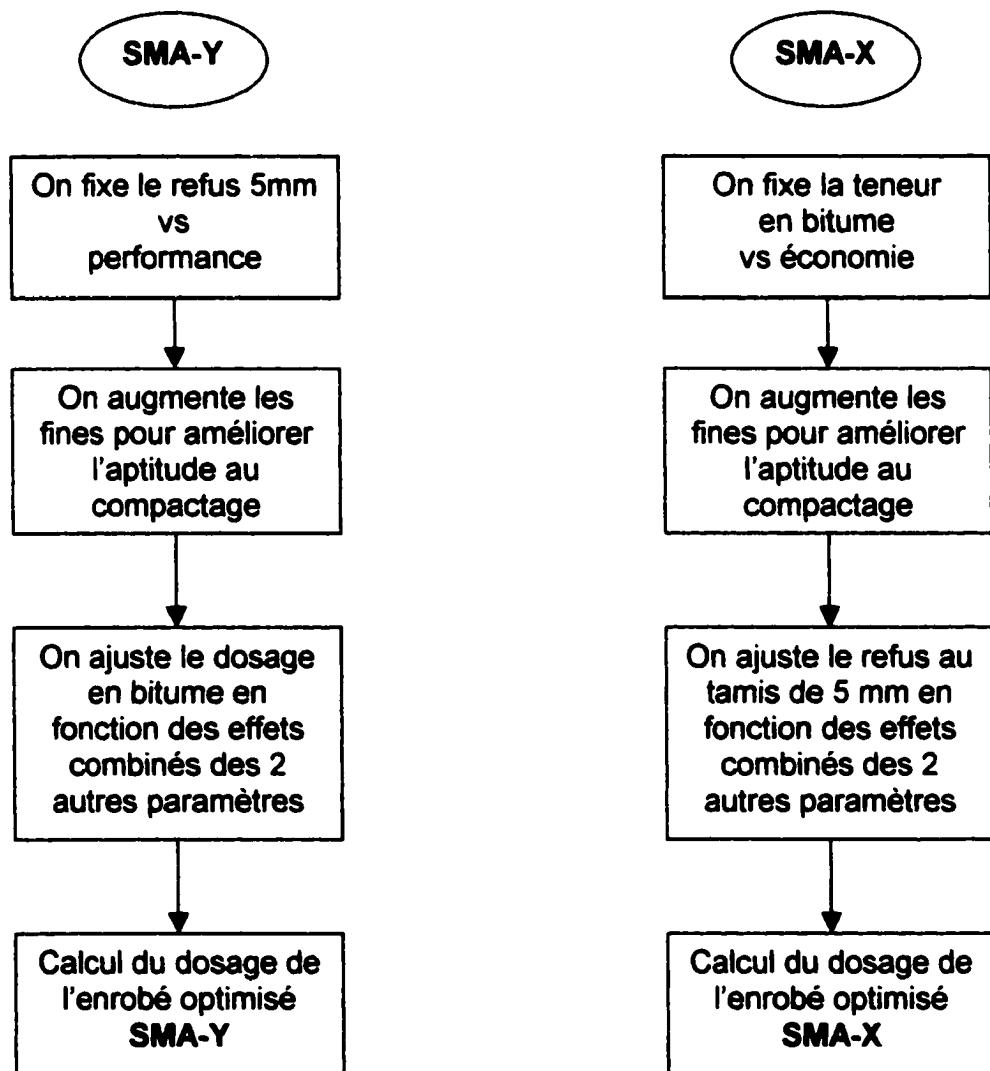


Figure 6.13: Logigramme des séquences d'optimisation des enrobés SMA-Y et SMA-X

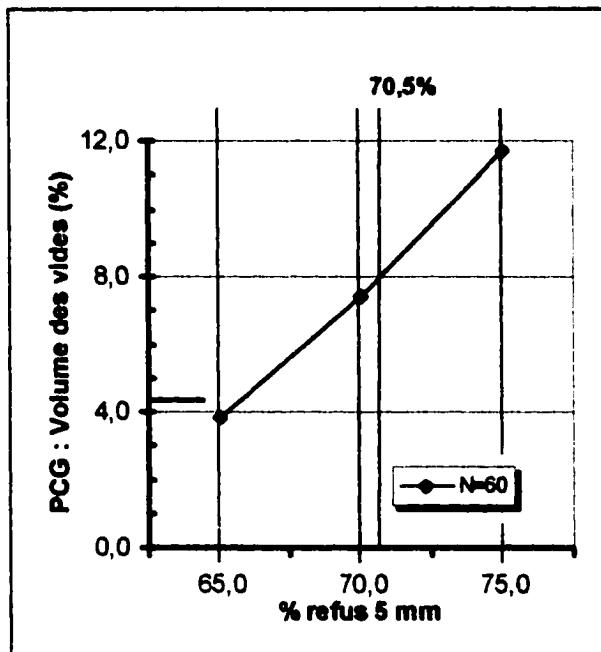


Figure 6.14 Interpolation de l'effet d'une augmentation de la proportion de gros granulat

Deux choix s'offrent à nous pour compenser cette baisse de l'aptitude au compactage et pour ramener l'enrobé au centre des limites acceptables : 1) augmenter la proportion de filler et/ou 2) augmenter la proportion de bitume. La première solution est favorisée pour réduire le coût de l'enrobé.

Dans un deuxième temps, la proportion de particules fines (tamisat au $80 \mu\text{m}$) sera fixée à une valeur de 12% qui correspond à la limite supérieure fixée pour ce paramètre de formulation dans le programme expérimental. Le même type d'interpolation est effectué pour vérifier l'effet de cette augmentation. Le volume de bitume effectif requis est celui qui permettra d'obtenir, en tenant compte de l'effet de la variation des deux premiers paramètres, une valeur d'environ 5,5% de vides à la PCG après 60 girations. Comme pour les deux premiers paramètres, l'interpolation peut être faite graphiquement ou par calcul. Les paramètres de formulation de l'enrobé optimisé SMA-Y sont présentés au tableau XXII.

6.6.4 L'enrobé optimisé SMA-X

Les résultats de la phase 1 du programme expérimental ont montré que seuls deux enrobés ont répondu à toutes les exigences d'aptitude au compactage, soit les enrobés **Fill+** et **Bit+**. Il y a lieu de croire qu'un enrobé présentant simultanément une augmentation modérée des proportions de particules fines et de bitume pourrait performer adéquatement à la PCG. Compte tenu que la solution proposée par l'enrobé **SMA-Y** comporte une augmentation sensible de la proportion de bitume (V_{bo} de 15,2% comparativement à 14,5% pour l'enrobé **STD**), la stratégie associée à l'optimisation de l'enrobé **SMA-X** propose de fixer au départ la proportion de bitume. Dans ce cas, une valeur de V_{bo} de 14,6% semblait raisonnable.

Le calcul des autres caractéristiques de formulation a été fait par interpolation comme pour la première stratégie d'optimisation. L'obtention d'une teneur en vides se rapprochant de la valeur médiane à 60 girations s'est faite à l'aide d'une baisse de la proportion de gros granulat. Les paramètres de formulation de l'enrobé optimisé **SMA-X** sont présentés au tableau XXII.

6.7 Phase 3 : Validation en laboratoire de l'enrobé optimisé

Pour des raisons pratiques, nous n'avons procédé qu'à la validation d'un seul des deux enrobés SMA optimisés. Compte tenu de son avantage économique à court terme, le choix s'est porté sur l'enrobé **SMA-X**. Rappelons toutefois qu'un enrobé SMA possédant une teneur en bitume plus élevée pourra éventuellement présenter des avantages (à plus long terme) associés à une plus grande durabilité.

L'enrobé optimisé **SMA-X** a été confectionné en laboratoire et soumis à différentes évaluations pour vérifier sa conformité face aux exigences de qualité et de performance établis au départ : examen visuel, détermination de l'aptitude au compactage et détermination de la résistance à l'omiérage.

Tableau XXII

Caractéristiques de formulation des enrobés optimisés SMA-X et SMA-Y

		Identification des enrobés		
		STD	SMA-X	SMA-Y
Caractéristiques de formulation	Refus au 5 mm	70,0	68,5	70,5
	Tamisat au 80 µm	10,0	10,5	12,0
	V _{be} %	14,5	14,6	15,2
	Densité maximale	2,540	2,542	---
	B _a %	0,30	0,37	---
Proportions massiques (%)	Granulat 5-10 mm	70,5	68,9	---
	Granulat 0-2,5 mm	7,7	8,6	---
	Filler calcaire	14,7	15,4	---
	Pbi%	6,06	6,17	6,8*
	Amiante (%)	1,0	1,0	1,0

* valeur approximative

6.7.1 Examen visuel

L'enrobé SMA-X semble bien équilibré ; on n'y voit pas de ségrégation ni de saignement et il est assez cohésif. Après la compaction à la PCG, les briquettes sont homogènes avec des vides assez faibles et uniformément répartis. La surface des éprouvettes a une texture plus prononcée qu'un enrobé conventionnel, mais pas aussi grenue que certains enrobés SMA de la première phase d'expérimentation (comme l'enrobé GG+).

6.7.2 Aptitude au compactage

La presse à cisaillement giratoire a également été utilisée dans la troisième phase du programme expérimental pour évaluer l'aptitude au compactage de l'enrobé optimisé. L'enrobé **SMA-X** a réagi comme prévu lors de l'expérimentation à la PCG, c'est-à-dire que la teneur en vides à 60 girations a été amenée dans le créneau recherché tandis qu'aux autres niveaux de compaction, les teneurs en vides ont également été abaissées tout en ne s'approchant pas trop des valeurs limites des exigences. Les résultats synthétisés de l'évaluation de l'aptitude au compactage à la PCG de l'enrobé **SMA-X** sont présentés au tableau XXIII.

Il semble donc possible, tout au moins pour l'aptitude au compactage, d'interpoler le comportement des enrobés SMA à partir des résultats obtenus pour quelques formulations différentes.

Tableau XXIII

Performance à la PCG de l'enrobé optimisé **SMA-X**

	Identification de l'enrobé		Exigences établies
	STD	SMA-X	
PCG : Volume des vides (%)	N=10 girations	16,2	14,7
	N=60 girations	7,4	5,9
	N=80 girations	6,3	4,9
	N=100 girations	5,5	4,2
	N=200 girations	3,7	2,5

6.7.3 Résistance à l'omiérage

Une évaluation en laboratoire de la résistance à l'omiérage de l'enrobé **SMA-X** a été réalisée avec l'omiéreur de type LCPC. Deux plaques de 50 mm d'épaisseur ont été testées. La confection des plaques et la réalisation de l'essai à l'omiéreur ont été effectuées conformément à la méthode du laboratoire LC. Les résultats de l'essai, de même que les exigences du MTQ pour un enrobé de grosseur maximale nominale de 10 mm sont présentés au tableau XXIV.

Tableau XXIV

Performance à l'omiéreur de laboratoire de l'enrobé **SMA-X**

Nombre de cycles	Taux de déformation en % (moyenne des 2 plaques)	Exigences MTQ (en %)
1000	3,26	< 10
3000	4,56	< 20
10000	6,03	---

On peut constater que l'enrobé optimisé **SMA-X** répond très adéquatement aux exigences de résistance à l'omiérage : les valeurs moyennes obtenues sont très largement au-dessous des déformations maximales permises à 1000 et 3000 cycles. Compte tenu de ce fait, il a été décidé de prolonger l'essai jusqu'à 10 000 cycles ; étonnamment, même à ce niveau élevé de sollicitation, l'enrobé **SMA-X** ne présente qu'environ la moitié de la déformation maximale permise à 1000 cycles. C'est donc dire que cet enrobé devrait très bien se comporter comme couche de surface sur une chaussée soumise à un trafic élevé et lourd. Rappelons que l'essai à l'omiéreur ne

constitue qu'une prédition en laboratoire du comportement réel de l'enrobé sur une chaussée. Par contre, une étude récente (Cooley et coll. 2000) semble montrer que l'orniére de laboratoire de type LCPC s'avère une méthode d'évaluation offrant une bonne corrélation vis-à-vis du comportement *in situ*.

CONCLUSION

Les caractéristiques et avantages des enrobés à matrice de pierre sont tributaires d'exigences qualitatives spécifiques au niveau des matières premières et de paramètres de formulation qui lui sont propres. Le squelette granulaire pierre sur pierre confère à l'enrobé SMA une résistance supérieure à la déformation par fluage.

L'étude de l'influence des différents paramètres de formulation sur la performance (ici, principalement l'aptitude au compactage) a permis de déterminer quels sont les paramètres qui sont les plus critiques. Ainsi, le dosage en fibres et la nature des fibres influencent peu l'aptitude au compactage (pour les limites employées). Une étude plus poussée avec une plus large gamme de dosages en fibres pourrait éventuellement permettre d'évaluer quel est le dosage optimal pour chacun des types de fibre.

La proportion de gros granulat constitue de loin le critère de formulation le plus critique en ce qui concerne l'aptitude au compactage des enrobés SMA. Une variation somme toute assez faible du pourcentage de refus au tamis de 5 mm aura une influence très sensible sur les vides mesurés à la PCG, que ce soit à $N_{initial}$ girations, à N_{design} girations ou encore à N_{final} girations. La grande sensibilité de ce paramètre de formulation nous obligera à porter, au niveau de la confection en usine, une attention particulière au contrôle de la granulométrie de l'enrobé. Sinon, l'enrobé montrera des variations importantes au niveau de son aptitude au compactage. Cet élément constitue sans doute le plus grand handicap des enrobés SMA.

Plusieurs approches sont possibles pour optimiser un enrobé SMA à partir des résultats qualitatifs des quelques formulations. Le choix dépend essentiellement des critères qu'on privilégie ; ainsi, par exemple, on peut optimiser un enrobé SMA par rapport au coût de production, à l'aptitude au compactage ou à la texture de surface. Si le critère de texture de surface est celui qu'on veut optimiser, améliorant ainsi la drainabilité et la sécurité de l'enrobé, il faudrait alors maximiser la proportion de gros granulat dans l'enrobé. Par contre, cette variation dans le dosage se traduira par une diminution de l'aptitude au compactage et éventuellement par une augmentation du

coût. Il y aurait également lieu de regarder de plus près, et éventuellement d'adopter ou d'adapter la procédure développée par la N.C.A.T. pour déterminer la présence de contact pierre sur pierre dans l'enrobé SMA.

Même si les résultats de cette recherche semblent montrer qu'on peut interpoler, avec une précision acceptable, les teneurs en vides à la PCG à partir des résultats expérimentaux, la principale incertitude rencontrée au niveau de cette recherche se situe au niveau de l'évaluation de la valeur appropriée pour N_{design} . Les résultats préliminaires et la revue de la documentation nous incitent à employer une valeur de N_{design} plus petite que pour un enrobé conventionnel confectionné avec une pierre de même dimension. Par contre, le choix effectué reste arbitraire et devra être confirmé par la réalisation de planches d'essai sur route (future phase 4).

L'enrobé SMA optimisé confectionné en laboratoire a montré une résistance à l'omiérage, telle que mesurée en laboratoire avec l'omiéreur de type LCPC, nettement supérieure aux exigences. Compte tenu des résultats obtenus en laboratoire, cet enrobé SMA tend donc à confirmer sa réputation d'enrobé très peu vulnérable à l'omiérage par fluage.

La réalisation de planches d'essai sur route s'avérerait la meilleure façon de valider les choix proposés et de vérifier la performance réelle de l'enrobé. Elle permettrait également d'évaluer le comportement de l'enrobé à travers le temps vis-à-vis de problématiques telles la fissuration de réflexion, la fissuration thermique, l'évolution de la texture superficielle, etc.

ANNEXES

PRÉLIMINAIRE

GUIDE DE RÉALISATION

PROCÉDÉ MÉDIFLEX

COMPOSANTS - FORMULATION - VALIDATION

SECTEUR ENROBÉS

15 mars 1995

3. COMPOSANTS

Les enrobés Bicomopoflex et Médiflex sont fabriqués à partir de matériaux neufs seulement.

3.1 Granulats

Les enrobés additionnés de fibres d'amiante nécessitent l'utilisation de classes granulaires.

- Bicomopoflex: 0/5 ou (0/2,5 et 2,5/5), filler;
- Médiflex: 0/2, 5/10, filler.

Les réserves de granulats de l'entrepreneur doivent respectées les granulométries suivantes:

Tamis (mm)	Filler	0 - 2,5	2,5 - 5	0 - 5	5-10
14					100
10			100	100	85-100
5		100	85-100	85-100	1-15
2,5		85-100			
1.25			1-15		
0.630	100				
0.315					
0.160					
0.080	75-100	max. 35		max. 13	

3.1.1 Granulat fin

- 1- Le granulat fin est composé de criblure.
- 2- Les caractéristiques intrinsèques et de fabrication doivent respectées les exigences de la catégorie 1 de la norme 2101.
- 3- Le coefficient d'écoulement doit être supérieur ou égal à 80. Il est mesuré sur le mélange combiné, selon les proportions de la formule de mélange. La norme utilisée est la norme NQ-2560-075.

3.1.2 Gros granulat

Les caractéristiques intrinsèques des résistances à l'usure et aux chocs doivent respectées les exigences de la catégorie 1 ou 2. Et la caractéristique de fragmentation respecte l'exigence de la catégorie a ou b de la norme 2101. Catégories possiblement utilisées: 1a, 2a ou 2b. De plus, une caractéristique complémentaire est le coefficient de polissage par projection qui doit être supérieur ou égal à 50. Aucun granulat calcaire ne peut être utilisé pour la fabrication du gros granulat, sauf s'il s'agit de dolomie gréuese du groupe «Beckmantown».

3.2 Fines d'apport

Les fines d'apport sont indispensables pour les enrobés additionnés de fibres d'amiante. Il faut donc que l'entrepreneur organise leur approvisionnement et dispose d'un silo.

Les caractéristiques des fines d'apport doivent respectées la norme ASTM D 242.

3.3 Liant

Pour la fabrication des mélanges Bicompoflex et Médiflex, l'entrepreneur utilise un bitume 150-200 de pénétration. L'entrepreneur s'approvisionne à partir de fournisseurs qui satisfont aux dispositions relatives à l'assurance de la qualité décrites dans la DGA-DB-5610-1 du ministère de l'Approvisionnement et services.

3.4 Fibres

Les fibres ont un double rôle: d'une part, elles permettent de fixer une quantité supplémentaire de bitume sans risque de fluage; d'autre part, leur géométrie et leur adhérence au liant se traduisent par un renforcement du mastic d'enrobage, donc par une augmentation des résistances mécaniques de l'enrobé au cisaillement, à la traction et à la compression.

Le procédé Médiflex nécessite l'incorporation de fibres d'amiante de type Médiflex. Ces fibres doivent parvenir dans des sacs thermofusibles qui ne laissent échapper aucune fibre lors du transport.

Le format du sac doit permettre le malaxage sans qu'il soit nécessaire de l'ouvrir et de partager son contenu entre deux fournées.

4. FORMULATION

4.1 Granulométrie

L'entrepreneur soumet au Service des matériaux du Laboratoire des chaussées une première formule de mélange sans fibre d'amiante. En utilisant les calibres mentionnés au point 3.1, l'entrepreneur présente un combiné qui respecte les exigences suivantes:

TAMIS (MM)	ENROBÉ BICOMPOFLEX % PASSANT	ENROBÉ MÉDIFLEX % PASSANT
14		100
10		70-85
5	100	28-33
2.5	50-60	28-33
1.25	≈ 37	21-28
0.630	≈ 22	15-22
0.315	≈ 15	11-18
0.160	≈ 14	9-15
0.080	11-13	7-10
Amiante (%)	1.5	1.0
Bitume (%)	8.5	5.8 - 6.5
Épaisseur prévue (mm)	≈ 20	≈ 30

L'entrepreneur fournit au Ministère une quantité suffisante de chaque calibre de granulats, de filler et de fibres pour fabriquer 100 kg de Bicompoflex et 300 kg de Médiflex.

Ensuite l'entrepreneur soumet une deuxième formule de mélange pour laquelle les fibres d'amiante sont incluses aux granulats.

Cette deuxième formule est utilisée lors de la vérification de la granulométrie, puisqu'à l'extraction les fibres d'amiante se retrouvent avec les granulats.

Un délai minimum de 21 jours de calendrier est requis entre la réception des échantillons et l'acceptation de la formule de mélange théorique.

4.2 Presse à cisaillement giratoire (P.C.G.)

L'essai à la P.C.G. caractérise l'évolution dans le temps de la compaction ou l'évolution du pourcentage de vides d'une éprouvette d'enrobé; ce qui nous renseigne sur la maniabilité des mélanges.

À partir du moment où le Service des matériaux de chaussées reçoit les granulats, les fines d'apport et les fibres d'amiante, il peut procéder aux essais de performance. La préparation du mélange en laboratoire suit les mêmes étapes qu'à l'usine. Les fibres sont ajoutées aux granulats chauds, ensuite le tout est malaxé à sec pendant quelques secondes, puis il y a l'ajout du bitume. La température de malaxage est d'environ 160 °C.

Médiflex

Les critères pour le Médiflex sont:

$$\% \text{ vides à 10 girations} \geq 9\%$$

$$6 < \% \text{ vides à 40 girations} < 12$$

Ces critères n'en sont pas de contrôle, mais ils servent simplement à la formulation pour déterminer les proportions des calibres de granulats à froid à utiliser pour obtenir un pourcentage de liant se situant entre 5.8 et 6.5%.

Bicompoflex

Ce type d'enrobé n'a pas à subir d'essais à la P.C.G. et à l'orniéreur.

La formulation en laboratoire sera optimisée en fabriquant des dalles de 5 cm au compacteur de plaque et les proportions de granulats et la teneur en liant seront ajustées en fonction du comportement de l'enrobé au compactage.

4.3 Orniéreur

L'essai à l'orniéreur détermine la profondeur d'ornières par fluage à l'aide d'un simulateur de trafic sur un enrobé de composition et de densité connues.

Les exigences pour le Médiflex sur les plaques de 50 mm conditionnées à 60 °C sur la pleine épaisseur sont:

1000 cycles \leq 10%
3000 cycles \leq 20%

4.4 Tenue à l'eau

L'essai de tenue à l'eau simule un vieillissement accéléré d'un enrobé sous l'action de l'eau et donne un aperçu de la résistance au désenrobage de cet enrobé. Nous diagnostiquons un enrobé susceptible au désenrobage lorsque son rapport de stabilité conservée est inférieur à 75%.

Les mélanges Bicompoflex et Médiflex sont soumis à cette exigence.

5 VALIDATION DE LA FORMULE DE MÉLANGE

Après l'étape de la vérification de la formule, l'entrepreneur soumet cette dernière à la direction territoriale afin qu'elle puisse être validée sur une production témoin. La planche d'essai est réalisée à l'endroit indiqué par le surveillant.

L'évaluation de la formule de mélange est réalisée à l'aide des résultats d'analyses effectuées par le Ministère sur cinq échantillons prélevés au cours de la production témoin.

L'échantillonnage pour l'évaluation de la formule de mélange est effectué conjointement par l'entrepreneur et le représentant du Ministère pour obtenir trois portions représentatives de l'enrobé provenant d'une production contrôlée.

Deux des trois portions servent à l'analyse par les parties et la troisième, scellée par le Ministère, est conservée par l'entrepreneur pour expertises ultérieures en cas de litige.

L'entrepreneur est tenu de fournir les analyses granulométriques ainsi que la teneur en bitume.

Chaque formule de mélange est évaluée selon l'article 28.14.2.1 e) i) option 3. Cependant, trois jours ouvrables, aux termes du Ministère, sont alloués pour l'analyse des échantillons.

Pour qu'une formule de mélange soit validée et que l'entrepreneur soit autorisé à poursuivre ses travaux, la moyenne des résultats d'analyse du mélange doit être comprise à l'intérieur des écarts tolérables indiqués à l'article 28.14.5 et conforme aux exigences de l'article 4.1. Pour le Bicompoflex, se sont les écarts tolérables du MB-10 qui sont utilisés tandis que pour le Médiflex, il s'agit des écarts tolérables du MB-12,5. La distribution granulométrique obtenue doit être corrigée pour tenir compte du pourcentage de fibres passant le tamis 80 μm .

Parallèlement, il y a l'évaluation de la formule de mélange par les essais de performances: orniéreux et P.C.G. Pour cette évaluation, c'est le Laboratoire des chaussées qui prélève ces échantillons afin d'effectuer les essais immédiatement après le prélèvement pour éviter le refroidissement de l'enrobé. Les exigences sont les mêmes qu'à la formulation. Cinq jours ouvrables, aux termes du Ministère, sont alloués pour l'analyse de cette évaluation.

Lorsque la moyenne des résultats d'analyse ne rencontre pas les critères mentionnés ci-haut, la formule de mélange ne peut être validée. Une nouvelle formule de mélange doit donc être présentée et le processus de validation est repris selon l'option 3. (Article 28.14.12.1 e) i) du C.C.D.G.)

Toute divergence entre les résultats des essais réalisés par l'entrepreneur et par le Ministère doit être signalée. Un effort conjoint est alors déployé pour identifier et corriger la source d'écart.

La formule de mélange finale peut être soit la formule théorique soumise, soit la moyenne des résultats d'analyse du mélange en autant que les exigences de l'article 4.1 soient rencontrées.

L'entrepreneur doit signifier, par écrit, au Ministère, la formule finale qu'il entend suivre pour sa production avant de poursuivre ses travaux.

BIBLIOGRAPHIE

- AASHTO, (1991), Report on the 1990 European Asphalt Study Tour, Washington, D.C.
- Bateman, A., (2000), Stone Mastic Asphalt – Investing in the Future, Aggregate and Roadbuilding Magazine, www.rocktoroad.com, consulté le 2000-11-30
- Brown, E. R., (1993), Experience with Stone Matrix Asphalt in the United States, NCAT report 93-4, Auburn, Alabama
- Brown, E. R., (1992), Evaluation of SMA Used in Michigan, NCAT report 92-3, Auburn, Alabama
- Brown, E.R., Cooley, L.A. Jr, (1999), Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements, National Cooperative Highway Research Program report 425, Washington, DC
- Brown, E. R., Haddock, J. E., (1997), A Method to Ensure Stone-on-Stone Contact in Stone Matrix Asphalt Paving Mixtures, NCAT Report 97-2, Auburn, Alabama
- Brown, E. R., Haddock, J. E., Crawford, C., (1996), Investigation of Stone Matrix Asphalt Mortars, Transportation Research Board issue 1530, pp 95-102, Washington, DC
- Brown, E. R., Haddock, J. E., Mallick, R. B., Lynn, T. A., (1997A), Development of a Mixture Design Procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA), NCAT report 97-3, Auburn, Alabama
- Brown, E. R., Haddock, J. E., Mallick, R. B., Bukowski, J., (1997B), Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures in the United States, NCAT report 97-1, Auburn, Alabama
- Brown, E. R., Mallick, R. B., (1994), Stone Matrix Asphalt - Properties Related to Mixture Design, NCAT report 94-2, Auburn, Alabama
- Brown, E. R., Manglorkar, H., (1993), Evaluation of Laboratory Properties of SMA Mixtures, NCAT report 93-5, Auburn, Alabama
- Buchanan, S., (2000), Evaluation of the Effect of Flat and Elongated Particles on the Performance of Hot Mix Asphalt Mixtures, NCAT report 2000-01, Auburn, Alabama
- Camargo E. J., (1998), Pavimentos Asfalticos de Comportamiento Superior : Stone Mastic Asphalt (SMA), Publication Internet Mexicaine,

- Cooley, L.A.Jr, Kandhal, P.S., Buchanan, M.S., Fee, F., Epps, A., (2000), Loaded Wheel Testers in the United States : State of the Practice, NCAT report 2000-4, Auburn, Alabama
- Creyton, L., (1994), Pavement Surface Courses : Stone Mastic Pavements and Asphalt Concrete Recycling, National Research Council, Washington, D.C.
- Haddock, J.E., (1998), Characterization of Stone Matrix Asphalt Mortars, Thèse de doctorat, Auburn, Alabama
- Harris, B.M., Stuart, K.D., (1995), Analysis of Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt, Proceedings of the technical Sessions 64 – Association of Asphalt Paving Technologists pp 54-95,
- Julien, S., Tremblay, G., Bérubé, M.A., Auger, B., (1994), Relation entre la nature des granulats et la glissance des chausses, Présentation au 29^{ème} congrès de l'AQTR
- Kandhal, P.S., Chakraborty, S., (1996), Effect of Asphalt Film Thickness on Short and Long Term Aging of Asphalt Paving Mixtures, NCAT report 96-1, Auburn, Alabama
- Kandhal, P.S., Lynn, C.Y., Parker, F., (1998) Characterization Tests for Mineral Fillers Related to Performance in Pavements, NCAT report 98-2, Auburn, Alabama
- Kandhal, P.S., Mallick, R.B., Brown E.R., (1998), Hot Mix Asphalt Mixes for Intersections, NCAT report 98-6, Auburn, Alabama
- Langlois Pierre, (Déc. 2000), communication personnelle, Ste-Foy
- Mallick, R.B., Buchanan S. et coll, (1998), Evaluation of Superpave Gyratory Compactor, NCAT report 98-5, Auburn, Alabama
- Mogawer, W.S., Stuart, K.D., (1996), Effect of mineral Fillers on Properties of Stone Matrix Asphalt Mixtures, Transportation Research Board issue 1530, pp 86-94, Washington, DC
- Mogawer, W.S., Stuart, K.D., (1995A), Effect of Coarse Aggregate Content on Stone Matrix Asphalt Rutting and Draindown, Transportation Research Board issue 1492, pp 1-11, Washington, DC
- Mogawer, W.S., Stuart, K.D., (1995B), Effect of Coarse Aggregate Content on Stone Matrix Asphalt Durability and Low-Temperature Cracking, Transportation Research Board issue 1492, pp 26-35, Washington, DC
- NAPA, (1999), Designing and Constructing Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures – State of the Practice, National Asphalt Pavement Association, Maryland

Paradis, M., (2001), Les produits expérimentaux et spéciaux utilisés au ministère des Transports du Québec, présentation faite dans le cadre de la journée bitume 2001, Drummondville, QC.

Rademaker, M., Evaluation of Stone Matrix Asphalt – Final Report, (1996), Federal Highway Administration Report, Washington, DC

Richardson, J.T.G., (1999), Stone Mastic Asphalt in the UK, travail présenté au symposium sur les enrobés minces et les enrobés à matrice de pierre, Londres, Angleterre.

Schmiedlin, R.B., (1998), Stone Matrix Asphalt: the Wisconsin Experience, Transportation Research Board issue 1616, pp 34-41, Washington, DC

SMART (Stone Matrix Asphalt Research Team of Malaysia), www.eng.upm.edu.my/~ratnas/sma, consulté le 1999-12-01

Summers, C.J., The Idiots' Guide to Highways Maintenance, www.asphaltmaintenance.com, consulté le 2000-12-10

Technical Solutions, The Road Authority Newsletter, www.roadauthority.com, consulté le 2000-12-11

Veizer, R., (1993), Design of a Crumb Rubber Modified Asphalt Pavement using the Stone Mastic Asphalt Concept, rapport de maîtrise, Université Carleton, Ottawa, Canada

Watanabegumi Co., Stone Matrix Asphalt, www.watanabegumi.co.jp/pavements, consulté le 2000-12-10

West, R.C., (1995), Mix Design and Aggregate Requirements for Stone Matrix Asphalt Mixtures, Rapport de doctorat, Université de Floride.

Young, J.F., Mindness, S., Gray, R.J., Bentur, A., (1998), The Science and Technology of Civil Engineering Materials, Prentice-Hall, Saddle River, N.J.