

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
SÉBASTIEN LAMOTHE

ENROBÉ GRENU :
INFLUENCE DU DOSAGE EN FILLER ET DE L'AJOUT D'UN
SABLE ROULÉ SUR LE COUPLE OUVRABILITÉ-ORNIÉRAGE

MONTRÉAL, LE 17 MARS 2004

© Droits réservés de Sébastien Lamothe

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel Perraton, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Michèle St-Jacques, codirectrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Robert Leconte, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Pierre Langlois, chargé de projets
Ministère des Transports du Québec – Laboratoire des chaussées

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

LE 18 FÉVRIER 2004

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ENROBÉ GRENU :
INFLUENCE DU DOSAGE EN FILLER ET DE L'AJOUT D'UN
SABLE ROULÉ SUR LE COUPLE OUVRABILITÉ-ORNIÉRAGE

Sébastien Lamothe

SOMMAIRE

Depuis le début des années 80 et ce, à l'échelle mondiale, l'orniérage des enrobés est devenu problématique en raison de l'augmentation des débits routiers, des pourcentages de véhicules lourds, des charges par essieu et des nouveaux pneumatiques. Afin d'obtenir des enrobés résistants à l'orniérage, des granulats très angulaires sont parfois utilisés au détriment de l'aspect d'ouvrabilité.

A l'aide de la revue de la littérature, ce mémoire tente d'établir une corrélation entre l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage des enrobés. Les types d'ornières et les constituants des enrobés sont traités afin de faire ressortir les facteurs influençant le couple ouvrabilité-orniérage.

Deux facteurs importants sont sélectionnés pour le programme expérimental, soit la variation de la teneur en filler et l'ajout d'un sable roulé. La méthode de formulation du Laboratoire des chaussées est utilisée pour analyser ces deux facteurs en trois phases, soit : la formulation, l'aptitude au compactage et la résistance à l'orniérage des enrobés. L'enrobé EG-10 est sélectionné car il est utilisé pour les couches de roulement exigeant une bonne ouvrabilité et une résistance à l'orniérage de moyenne à élevée.

La hausse de la teneur en filler permet de combler une partie des vides entre les particules grossières et assure un certain blocage du squelette granulaire. Par contre, un surdosage crée un desserrement de la structure granulaire nuisant à l'agencement optimal des particules. Par ailleurs, l'augmentation de la teneur en filler accroît et diminue respectivement l'orniérage initial et global des enrobés.

L'augmentation de l'ajout en sable se traduit par une amélioration de l'ouvrabilité et une perte au niveau de la performance à l'orniérage des enrobés. Dépendamment de la dispersion des particules arrondies dans la structure granulaire, une différence majeure de comportement des enrobés est observée.

Finalement, l'analyse des résultats montre que le couple ouvrabilité-orniérage est bien représenté par les cinq critères de design qui comprennent tous les facteurs établis dans la revue de la littérature.

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé et mené à terme grâce au soutien, à l'aide et à l'encouragement de plusieurs personnes. Je tiens particulièrement à remercier mon directeur et ma codirectrice de recherche, M. Daniel Perraton, ing., D.Sc.A. et Mme Michèle St-Jacques, ing., M.Ing. pour leurs soutiens constants, tant technique que moral, sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pu être complétée. Par ailleurs, je tiens à remercier M. Perraton pour sa patience et son dévouement qu'il m'a accordé tout au long de ma maîtrise.

Je tiens également à remercier mes collègues de travail, Mélanie Bertrand, Alan Carter et Sébastien Drainville pour leurs précieuses aides et M. Alain Desjardins pour son assistance à la réalisation de mes essais.

Je ne peux passer sous silence le support moral de ma famille, spécialement ma mère, ma sœur, mon parrain et ma marraine et de deux de mes amis, Pascal et Richard, qui m'ont encouragé grandement et sans relâche lors de la réalisation de ce laborieux travail.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES	xii
MISE EN CONTEXTE.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Les types d'ornières.....	3
1.1.1 Ornières dans la fondation.....	3
1.1.2 Ornières dans l'enrobé bitumineux.....	4
1.1.2.1 Ornières de consolidation	4
1.1.2.2 Ornières de déformation plastique : ornières de fluage.....	6
1.1.2.3 Ornières d'usure.....	7
1.1.2.3.1 Ornières d'usure dues au polissage des granulats.....	7
1.1.2.3.2 Ornières d'usure dues à l'arrachement des granulats	8
1.1.2.3.3 Ornières d'usure dues au désenrobage des granulats	9
1.2 Constituants d'un enrobé	9
1.2.1 Les vides interstitiels (Vi).....	11
1.2.1.1 Réflexion sur le rôle des vides au sein de l'enrobé	13
1.2.1.2 Sommaire.....	15
1.2.2 Le bitume	15
1.2.2.1 Bitume : matière première	16
1.2.2.1.1 Composition chimique des bitumes.....	16
1.2.2.1.2 Structure des bitumes.....	18
1.2.2.1.3 Le vieillissement du bitume.....	19
1.2.2.2 Teneur en bitume (Pb)	20
1.2.2.3 Bitume absorbé par les granulats (Pba)	21
1.2.2.4 Bitume effectif.....	22
1.2.2.4.1 Volume de bitume effectif (Vbe).....	23
1.2.2.4.2 Vides comblés par le bitume (VCB).....	24

1.2.2.4.3	Film de bitume effectif (FBE).....	27
1.2.2.5	Sommaire.....	28
1.2.3	Granulats.....	29
1.2.3.1	Sources de granulats.....	30
1.2.3.2	Caractéristiques des granulats et essais de caractérisation.....	30
1.2.3.3	Granularité.....	31
1.2.3.3.1	Granulat présentant une granulométrie uniforme.....	34
1.2.3.3.2	Granulat à granulométrie étalée continue.....	36
1.2.3.3.3	Granulat à granulométrie étalée discontinue.....	38
1.2.3.4	Relation de Fuller et Thompson.....	39
1.2.3.5	Tamis à la puissance 0,45.....	41
1.2.3.6	Représentation graphique de la courbe de masse volumique maximale (CMVM).....	42
1.2.3.7	Rôle du VAM dans le couple ouvrabilité-orniérage.....	43
1.2.3.7.1	Influence de la granulométrie sur le VAM, évaluée à l'aide de la CMVM.....	44
1.2.3.7.1.1	Granulométrie croisant la CMVM.....	46
1.2.3.7.2	Influence du pourcentage de particules passant le tamis de 80 µm sur le VAM.....	49
1.2.3.7.3	Effet de la forme des particules sur le VAM.....	51
1.2.3.7.4	Effet de la texture de surface des particules sur le VAM.....	51
1.2.3.7.5	Effet de la dimension maximale des particules sur le VAM.....	52
1.2.3.7.6	Évolution des normes relativement au VAM en relation avec la grosseur nominale maximale (GNM).....	53
1.2.3.7.7	Synthèse.....	56
1.3	Sommaire.....	57
CHAPITRE 2 APPROCHE GLOBALE DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL.....		60
2.1	Introduction.....	60
2.2	Méthodologie de formulation d'un enrobé sur la base du couple ouvrabilité-orniérage.....	61
2.3	Famille d'enrobés ciblée.....	61
2.4	Enrobé ciblé au sein de la famille des enrobés utilisés en resurfaçage.....	62
2.5	Mise en perspective des facteurs significatifs vis-à-vis l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage de l'enrobé EG-10.....	64
2.6	Programme expérimental.....	66
2.6.1	Phase I : Formulation des enrobés.....	67
2.6.2	Phase II : Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés.....	68
2.6.3	Phase III : Détermination de la résistance à l'orniérage des enrobés.....	68

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA CONFECTION DES ENROBÉS	69
3.1 Matériaux utilisés.....	69
3.1.1 Granulats concassés	69
3.1.1.1 Gros granulats de calibre 5-10mm	70
3.1.1.2 Granulats fins de calibre 2,5-5mm.....	72
3.1.1.3 Granulats fins de calibre 0-2,5mm.....	72
3.1.2 Sable naturel	73
3.1.3 Filler minéral	74
3.1.4 Bitume.....	75
CHAPITRE 4 ASPECTS TECHNIQUES LIÉS À LA MISE EN ŒUVRE DES ENROBÉS EN LABORATOIRE	77
4.1 Formulation des enrobés EG-10	77
4.1.1 Combinaison granulaire.....	78
4.1.2 Températures d'enrobage et de compactage.....	78
4.1.3 Établissement de la teneur en bitume	79
4.1.4 Malaxage de l'enrobé	79
4.1.5 Mesure de la densité maximale, Dmm	81
4.1.6 Réajustement du Pbi et de la Dmm.....	82
4.2 Détermination de l'aptitude au compactage : essai à la PCG.....	82
4.3 Détermination de la résistance à l'orniérage des enrobés.....	83
4.3.1 Confection et compactage des plaques	84
4.3.2 Essai à l'orniéreur	85
CHAPITRE 5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	87
5.1 Formulation des enrobés.....	87
5.1.1 Dosages initiaux des enrobés.....	88
5.1.1.1 Dosages initiaux des enrobés ayant diverses teneurs en filler : volet 1	88
5.1.1.2 Dosages initiaux des enrobés confectionnés avec diverses teneurs en sable : volet 2.....	90
5.1.2 Dosages réels des enrobés confectionnés dans le cadre des volets 1 et 2	92
5.1.2.1 Densité maximale, Dmm, et teneur réelle en bitume absorbé, Pba%.....	92
5.1.3 Correction de la teneur en bitume et de la valeur de la Dmm	95
5.2 Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à l'aide de la PCG.....	96
5.3 Résistance à l'orniérage des enrobés	99

CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS.....	100
6.1 Couple ouvrabilité-ornièreage.....	100
6.1.1 Influence du dosage en filler (volet 1).....	100
6.1.1.1 Aptitude au compactage.....	101
6.1.1.2 Résistance à l'orniérage.....	102
6.1.2 Substitution de particules angulaires par du sable roulé (volet 2).....	109
6.1.2.1 Aptitude au compactage.....	109
6.1.2.2 Résistance à l'orniérage.....	111
6.1.2.3 Sommaire.....	115
6.1.3 Étude complémentaire portant sur l'influence des particules arrondies sur le couple ouvrabilité-ornièreage : volet 3.....	116
6.1.3.1 Formulation des enrobés à granulométrie fixe constitués d'un sable roulé.....	116
6.1.3.2 Aptitude au compactage.....	118
6.1.3.3 Résistance à l'orniérage.....	119
6.1.3.4 Sommaire.....	120
6.1.4 Réflexion portant sur l'influence des particules arrondies sur le couple ouvrabilité-ornièreage.....	120
6.1.4.1 Modification de la granulométrie (élément du 3 ^{ième} critère de design).....	121
6.1.4.2 Dispersion des particules arrondies dans la structure granulaire.....	124
6.1.4.3 Sommaire.....	125
6.1.5 Bilan de la méthodologie.....	126
6.1.5.1 La prédominance des points de contact (1 ^{er} critère de design).....	126
6.1.5.2 La qualité des points de contact (2 ^{ème} critère de design).....	129
6.1.5.3 La valeur du VAM (3 ^{ème} critère de design).....	130
6.1.5.4 La rhéologie du bitume (4 ^{ème} critère de design).....	134
6.1.5.5 La quantité de bitume : Vbe, VCB et le FBE (5 ^{ème} critère de design).....	135
CONCLUSION.....	136
ANNEXES	
1 : Définitions relatives aux différentes phases de l'enrobé.....	139
2 : Complément d'informations sur la rhéologie et la structure des bitumes.....	142
3 : Détails sur les caractéristiques des granulats.....	150
4 : Réajustement du Pbi et de la Dmm.....	156
5 : Formulation des enrobés à granulométrie contrôlée contenant du sable arrondi.....	159
BIBLIOGRAPHIE.....	162

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Critères de conception pour les enrobés selon la méthode Marshall26
Tableau II	Facteurs qui sont relatifs au bitume et qui affectent l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage.....29
Tableau III	VAM théorique de motifs constitués d'empilements réguliers de sphères unidimensionnelles35
Tableau IV	Normes du MTQ (cahier des charges et devis généraux,1986).....54
Tableau V	Relation entre le VAM minimum et la GNM des enrobés en considérant de 3 à 5% de vides dans l'enrobé54
Tableau VI	Valeurs du VAM calculées à partir du V_{be} et du V_i spécifiés par la méthode de formulation LC du MTQ.....56
Tableau VII	Facteurs relatifs aux granulats et influençant le VAM et par conséquent, interféreront sur son ouvrabilité et sa résistance à l'orniérage57
Tableau VIII	Caractéristiques des enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées du MTQ63
Tableau IX	Caractéristiques des granulats utilisés70
Tableau X	Caractéristiques du filler minéral utilisé.....74
Tableau XI	Caractéristiques physiques du bitume utilisé.....76
Tableau XII	Granulométries des cinq enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1 : variation du pourcentage passant au 80 μ m.....89
Tableau XIII	Dosages initiaux des matières premières pour les cinq enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1 : variation du pourcentage passant au tamis de 80 μ m89
Tableau XIV	Granulométries des trois enrobés confectionnés dans le cadre du volet 2 : ajout de sable roulé90

Tableau XV	Dosages initiaux des matières premières pour les trois enrobés confectionnés dans le cadre du volet 2 : ajout d'un sable roulé91
Tableau XVI	Résultats des densités maximales mesurées en laboratoire et des teneurs réelles en bitume absorbé pour les enrobés constitués de diverses teneurs en filler (volet 1)93
Tableau XVII	Résultats des densités maximales mesurées en laboratoire et des teneurs réelles en bitume absorbé pour les trois enrobés (ajout de sable roulé : volet 2)94
Tableau XVIII	Valeurs de la teneur en bitume et de la densité maximale avant et après correction pour les enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1 : différentes teneurs en filler95
Tableau XIX	Valeurs de la teneur en bitume et de la densité maximale avant et après correction pour les enrobés confectionnés dans le cadre du volet 2 : diverses teneurs en sable roulé96
Tableau XX	Granulométrie et aptitude au compactage des enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1 : variation de la teneur en filler97
Tableau XXI	Granulométrie et aptitude au compactage des enrobés confectionnés dans le cadre du volet 2 : ajout de sable roulé98
Tableau XXII	Orniéragé des six enrobés99
Tableau XXIII	Synthèse de la compacité des plaques soumises à l'orniéreur et des briquettes obtenues à la PCG105
Tableau XXIV	Propriétés du sable roulé SNA113
Tableau XXV	Dosages finaux des enrobés à granulométrie contrôlée contenant du sable arrondi confectionnés dans le cadre de l'étude complémentaire118
Tableau XXVI	Performance à l'orniéragé de deux enrobés à granulométrie contrôlée120

Tableau XXVII	Proportion de particules arrondies et angulaires retenues sur chacun des tamis (%).....	124
Tableau XXVIII	Granulométrie des cinq enrobés contenant diverses teneurs en filler.....	132
Tableau XXIX	Surface totale confinée entre la granularité de l'enrobé et la CMVM pour les cinq enrobés étudiés	133

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Modélisation du développement d'ornières dans l'enrobé bitumineux.....5
Figure 2	Représentation volumétrique d'un enrobé compacté.....10
Figure 3	Influence de la compacité sur la résistance à l'orniérage, essai à l'orniéreur.....12
Figure 4 a)	Enrobé contenant le plus de vides et le moins de bitume (enrobé A).....14
Figure 4 b)	Enrobé contenant le plus de bitume et le moins de vides (enrobé B).....14
Figure 5	Relation entre le V_i , le VAM et le VCB.....24
Figure 6	Différents types de granulométrie.....32
Figure 7	Représentation de la courbe de masse volumique maximale et exigences proposées pour le calibre de 10mm.....42
Figure 8	Exemples de granulométrie qui produit des enrobés tendres47
Figure 9	Relation entre le VAM minimum et la GNM pour des chaussées souples durables en considérant de 3 à 5% de vides.....55
Figure 10	Courbe de masse volumique maximale et fuseaux granulométriques pour l'enrobé EG-1063
Figure 11	Organigramme des principales phases du programme expérimental66
Figure 12	Granulométries des granulats concassés.....71
Figure 13	Granulométrie du sable naturel, SN.....73
Figure 14	Granulométrie du filler et la CMVM pour ce calibre75
Figure 15	Étuve ventilée80
Figure 16 a)	Malaxeur d'une capacité de 8kg81
Figure 16 b)	Malaxeur d'une capacité de 60kg81
Figure 17 a)	Compacteur de plaques.....85
Figure 17 b)	Balance et bain rempli d'eau (méthode volumétrique).....85
Figure 18	Orniéreur de type LCPC86

Figure 19	Formulation des huit enrobés de base testés dans le cadre du programme expérimental (bitume PG 58-28; EG-10; Vbe de 12,4%)87
Figure 20	La CMVM et la granulométrie des enrobés ayant diverses teneurs en sable92
Figure 21	Influence de la teneur en filler sur l'aptitude au compactage (volet 1).....101
Figure 22	Influence de la teneur en filler sur la performance à l'orniérage.....103
Figure 23	Évolution de l'orniérage des trois enrobés présentant diverses teneurs en filler104
Figure 24	Relation entre la compacité des plaques soumises à l'orniérage et celle des briquettes obtenues à la PCG (variation de la teneur en filler).....106
Figure 25	Influence de l'ajout de sable sur l'aptitude au compactage110
Figure 26	Influence du sable sur la performance à l'orniérage.....111
Figure 27	Influence de l'ajout de sable sur la performance à l'orniérage.....114
Figure 28	Formulation des quatre enrobés possédant la même granulométrie que l'enrobé EG10-9,4 (bitume PG 58-28; EG-10; Vbe de 12,4%).....117
Figure 29	Aptitude au compactage des enrobés à granulométrie contrôlée contenant du sable arrondi119
Figure 30	Granulométries des enrobés à granulométrie modifiée contenant diverses teneurs en sable122
Figure 31	Aire confinée entre la CMVM et les courbes granulométriques de chacun des enrobés.....123
Figure 32	Granulométrie des enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1127
Figure 33	Surface totale confinée entre la granularité de l'enrobé et la CMVM pour les cinq enrobés étudiés133

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AFNOR	Association française de normalisation
AIPCR	Association internationale permanente des Congrès de la Route
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ce	Coefficient d'écoulement
coll.	Collaborateurs
CMVM	Courbe de masse volumique maximale
d	Ouverture du tamis pour lequel on veut connaître la valeur de P
D	Dimension de grosseur maximale du matériau granulaire
Db	Densité du bitume
Dgb	Densité brute d'un granulat
Dge	Densité effective d'un granulat
Dmax	Diamètre maximal des particules
Dmin	Diamètre minimal des particules
Dmm	Densité maximale
EB	Enrobé bitumineux
EG	Enrobé grenu
EGA	Enrobé grenu avec amiante
EME	Enrobé à module élevé
ESG	Enrobé semi-grenu
FBE	Film de bitume effectif
FME	Film de mastic effectif
g	Gramme
GNM	Dimension de grosseur nominale maximale
GPC	Chromatographie sur gel perméable
kg	Kilogramme
kN	Kilonewton

kPa	Kilopascal
LA	Los Angeles
LC	Laboratoire des chaussées
LCPC	Laboratoire central des Ponts et Chaussées
mm	Millimètre
MD	Micro-Deval
MTQ	Ministère des Transports du Québec
mol	Mole
NQ	Normes du Québec
n/a	Non applicable
NF	Norme française
n/m	Non mesurable
O.C.D.E.	Organisation de coopération et de développement économiques
P	Pourcentage passant au tamis "d"
Pb	Pourcentage de bitume dans l'enrobé
Pba	Pourcentage de bitume absorbé par les granulats
Pbi	Pourcentage de bitume initial dans l'enrobé
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PG	Grade de performance d'un bitume ("Performance grade")
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SMA	Enrobé à matrice de pierre ("Stone Matrix Asphalt; Splitt Mastic Asphalt; Stone Mastic Asphalt")
SN	Sable naturel
SNA	Sable naturel arrondi
µm	Micromètre
VAM	Vides intergranulaires ("Voids in the mineral aggregate ")
Vb	Volume total de bitume
Vba	Volume de bitume absorbé
Vbe	Volume de bitume effectif

MISE EN CONTEXTE

Depuis le début des années 80 et ce, à l'échelle mondiale, l'orniérage des enrobés bitumineux est devenu de plus en plus sérieux. En effet, avec l'augmentation constante des débits routiers, des pourcentages de véhicules lourds, des pneumatiques plus performants ainsi que des charges par essieu de plus en plus importantes, les problèmes d'orniérage ne peuvent que s'aggraver dans les années à venir. Le revêtement bitumineux se trouve donc aujourd'hui soumis à des sollicitations très sévères vis-à-vis l'orniérage.

Afin d'obtenir des enrobés résistants à l'orniérage, des granulats concassés sont utilisés. Toutefois, leur maniabilité en est réduite. Il est très probable que l'utilisation seule de granulats concassés va se traduire par un enrobé bitumineux qui sera trop raide faisant en sorte que son aptitude au compactage sera hors norme à la presse à cisaillement giratoire (PCG). Comment est-il possible de modifier ces enrobés sans diminuer leur résistance à l'orniérage? L'une des approches préconisée est l'ajout d'un faible dosage en sable roulé.

L'ajout de sable roulé doit se faire avec prudence, car cela peut amener certains enrobés bitumineux à être trop tendres, peu stables, pour être compacté adéquatement (Goode et Lufsey, 1962). Le comportement de ces enrobés tendres vis-à-vis l'ouvrabilité sera même difficile à prévoir. Ils peuvent atteindre facilement la compaction désirée en laboratoire lors d'un compactage dans des moules d'acier, mais en chantier, ces mêmes enrobés peuvent être difficiles à compacter (compaction trop faible) : ils tendent à "cocher" (marquer) et à se "déplacer" sous l'équipement de compaction.

Dans la perspective d'évaluer les effets de l'ajout de sable roulé pour accroître l'aptitude au compactage, le présent mémoire vise à : 1) définir les paramètres qui gouvernent la résistance à l'orniérage et 2) cerner la façon de faire pour rectifier le manque

d'ouvrabilité (satisfaire les exigences à la PCG) de certains enrobés confectionnés avec des granulats concassés sans perdre de vue leur résistance à l'orniérage, soit l'étude du couple mise en œuvre - performance à l'orniérage.

Pour arriver à ces objectifs, une revue de la littérature a été élaborée pour mettre en relief les paramètres liés à la formulation qui conditionnent la performance à l'orniérage et l'ouvrabilité de l'enrobé. Dans un premier temps, il est question des types d'ornières afin de faire ressortir les facteurs qui expliquent leur formation. Par la suite, le bitume sera traité en terme de matière première et, finalement, il sera question des vides interstitiels, du bitume et des granulats en terme de constituants au sein de l'enrobé.

Deux facteurs déterminants qui ont été trouvés dans la littérature sont étudiés dans le programme expérimental. Ce programme comporte trois grandes phases en vue de mettre en perspective la corrélation entre la mise en œuvre et la résistance à l'orniérage des enrobés : 1) la formulation, qui comprend 2) la détermination de l'aptitude au compactage des enrobés confectionnés et 3) la détermination de la résistance à l'orniérage de ces enrobés.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans le contexte de l'optimisation de la formulation des enrobés bitumineux vis-à-vis le couple mise en œuvre - performance à l'orniérage, une étude exhaustive de la littérature a été effectuée. Ce chapitre traite de l'ensemble des éléments jugés significatif vis-à-vis le couple ouvrabilité-orniérage et se présente en deux principales sections : 1) la problématique d'orniérage (types d'ornières) et 2) les principales phases de l'enrobé : air (vides), bitume et granulat.

1.1 Les types d'ornières

Une ornière se définit comme étant un tassement localisé, une dépression, dans les traces de roues. Les ornières qui se produisent dans l'enrobé et la fondation sont respectivement de faible et de grand rayon en raison de la distribution des charges avec la profondeur. Les ornières à faible rayon sont généralement doubles et éventuellement triples et leur forme correspond à la trace laissée par un camion à roues jumelées. Les ornières à grand rayon constituent une dépression simple ayant une forme analogue à une courbe parabolique très évasée (Durand, 1993).

1.1.1 Ornières dans la fondation

Les ornières qui prennent origine dans la fondation de la chaussée sont souvent dues à :

- 1- une mauvaise estimation des épaisseurs de structures nécessaires pour supporter les charges engendrées par le trafic;
- 2- un manque de compactage dans les couches de sous-fondation et de fondation;
- 3- un drainage insuffisant;

- 4- un sous-dimensionnement vis-à-vis les actions du gel et du dégel;
- 5- ou un tassement du sol support.

1.1.2 Ornières dans l'enrobé bitumineux

Pour une chaussée souple, dont la couche de roulement est en enrobé bitumineux, il existe trois catégories d'ornières qui affectent directement l'enrobé soit : 1) les ornières de consolidation, 2) les ornières de déformation plastique et 3) les ornières d'usure. Les deux premières catégories d'ornières sont des phénomènes qui se suivent chronologiquement. Cependant, si l'enrobé présente un taux de compaction trop élevé lors de sa mise en place (teneur en vides de moins de 3% environ), il va passer directement à la deuxième catégorie d'ornières. Pour les ornières d'usure, elles se produisent habituellement après une longue période exposée au trafic si le liant bitumineux assure un bon enrobage des granulats, sinon la période en sera réduite.

Évidemment, la profondeur des ornières mesurée à la surface de l'enrobé peut être accentuée par l'orniérage de la fondation et du sol support.

1.1.2.1 Ornières de consolidation

Le mécanisme d'orniérage de consolidation se produit en deux étapes (Parker et Brown, 1991; Eisenmann et Hilmer, 1987). Pendant l'étape initiale, d'une durée variable, les charges répétées sur la chaussée causent une densification de l'enrobé jusqu'à 4% de vides (peut varier selon les enrobés). A cette étape, le mélange se stabilise jusqu'à ce que les granulats anguleux atteignent une configuration optimale pour résister à la déformation. Avec une progression des charges, l'orniérage dû à la densification se poursuit jusqu'à environ 2% de vides (figure 1).

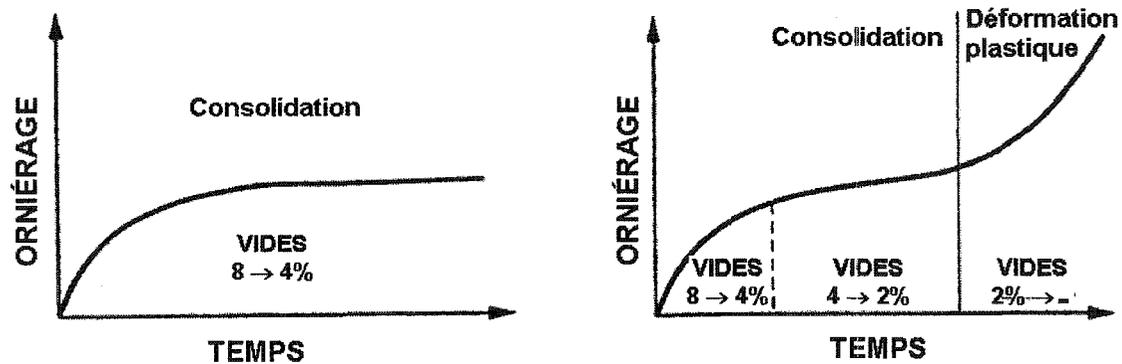


Figure 1 Modélisation du développement d'ornières dans l'enrobé bitumineux (Adapté de Parker et Brown, 1991)

Une caractéristique importante des ornières de consolidation, c'est qu'elles ne présentent pas de bourrelets sur les côtés de la dépression. Les ornières de consolidation peuvent être dues à :

- 1- une teneur en bitume ou des vides comblés par le bitume (VCB) trop faibles engendrant un sous compactage;
- 2- un sous compactage (trop de vides dans l'enrobé);
- 3- des charges supérieures à celles anticipées;
- 4- une utilisation excessive de sable naturel roulé (particules arrondies);
- 5- un concassage insuffisant ou inadéquat des particules (angularité);
- 6- ou un mauvais comportement du bitume à haute température d'utilisation.

Un manque de compacité (sous compactage) se traduit par un orniérage de consolidation (post-compactage) en raison des passages répétés des véhicules qui densifie l'enrobé jusqu'à ce que le squelette granulaire soit en mesure de résister aux charges qu'il subit. Par ailleurs, une faible teneur en bitume réduit la résistance à la fatigue et la résistance à la fissuration thermique. Des particules arrondies et peu rugueuses sont plus susceptibles à l'orniérage, car elles se déplacent plus facilement dans l'enrobé. Également, une augmentation de la viscosité du bitume donnera un enrobé plus rigide, plus résistant à l'orniérage, mais aussi plus susceptible à la fissuration thermique. Il est à souligner que

les chercheurs ne connaissent pas encore l'importance de chaque facteur. Après s'être densifié, l'enrobé sera soumis, cette fois-ci, au phénomène de fluage.

1.1.2.2 Ornières de déformation plastique : ornières de fluage

A ce stade, l'enrobé se trouve à être surcompacté : il contient moins de 2% environ de vides (figure 1). En somme, les ornières de fluage sont causées par un mélange instable. Physiquement, elles se présentent distinctement sur la chaussée : il y a apparition de bourrelets de chaque côté de l'ornière. En effet, une diminution de volume directement sous la ligne de passage des véhicules à roues jumelées et une augmentation de volume aux limites des dépressions sont observées : l'enrobé se déplace, s'écoule, c'est le fluage. Cela indique que le compactage causé par les véhicules est terminé et que l'augmentation de l'ornière s'explique essentiellement par un déplacement du matériau à volume constant. Cette étape durera pendant la plus grande partie de la vie utile de la chaussée (Eisenmann et Hilmer, 1987; Parker et Brown, 1991). Il est très intéressant de souligner que sous l'action d'un orniérage lié au fluage, on observe dans la couche de roulement, selon une coupe transversale de la chaussée, une mobilisation des particules qui prennent une orientation préférentielle, laquelle est d'autant plus marquée en présence de particules plates et allongées. En fait, on parle d'orientation préférentielle quand les particules se placent de façon tangentielle à la déformation liée à l'orniérage.

Les ornières de fluage peuvent être dues à :

- 1- une teneur en bitume ou des vides comblés par le bitume (VCB) trop élevés;
- 2- une teneur en vides trop faible (surcompactage);
- 3- une utilisation excessive de sable naturel roulé (particules arrondies);
- 4- un concassage insuffisant ou inadéquat des particules (angularité);
- 5- des charges supérieures à celles anticipées;
- 6- ou un mauvais comportement du bitume à haute température d'utilisation.

A titre d'exemple, et pour montrer l'importance de la teneur en bitume, l'orniéage par fluage croît de 40% lorsque la teneur en bitume augmente seulement de 0,4% dans le cas d'un enrobé semi-grenu classique (Bense, 1998).

Il faut également noter que le phénomène de fluage n'est pas relié uniquement à l'enrobé, il peut se produire dans les couches sous-jacentes. En effet, les fondations granulaires et le sol support peuvent présenter du fluage au même titre que l'enrobé de surface, par exemple, quand ils sont mal drainés.

1.1.2.3 Ornières d'usure

L'orniéage par usure du revêtement se rencontre sur les routes à haut niveau de circulation, sur les sections avec arrêts et particulièrement lorsque des granulats calcaires sont utilisés en couche de roulement (AIPCR, 1995). Les ornières d'usure résultent du polissage, de l'arrachement ou du désenrobage de granulats. Ces ornières ne constituent qu'une infime partie des ornières, car ce phénomène est généralement bien maîtrisé par les entreprises, puisque les facteurs causant celles-ci sont relativement bien connus.

1.1.2.3.1 Ornières d'usure dues au polissage des granulats

Les ornières d'usure par polissage sont causées, en grande partie, par l'action des pneumatiques munis de crampons durant les périodes hivernales. Cette usure du revêtement se rencontre plus particulièrement dans les pays nordiques et le paramètre à prendre en considération est la dureté des granulats. La résistance à l'usure des granulats est évaluée par l'essai micro-Deval. D'un point de vue mondial, la manifestation de ce mécanisme est en régression, car l'usage des pneus à crampons est actuellement limité ou même interdit (AIPCR, 1995).

1.1.2.3.2 Ornières d'usure dues à l'arrachement des granulats

L'arrachement des granulats est relié à trois facteurs indépendants : 1) la détérioration du granulat, 2) un pourcentage de bitume trop faible et 3) un sous-compactage de l'enrobé.

Détérioration du granulat – Lorsque les propriétés mécaniques du granulat sont faibles, celui-ci résiste mal à l'action combinée du trafic et du climat, en particulier à l'action des cycles de gel-dégel. Ces granulats se détériorent graduellement. Les essais d'évaluation des propriétés mécaniques à partir de l'essai au micro-Deval et de celui au Los Angeles (résistance à la fragmentation) sont ici essentiels (Langlois et coll., 2001).

Pourcentage de bitume trop faible – Un pourcentage de bitume trop faible se traduit inévitablement par un film de bitume effectif (FBE) trop mince qui favorisera le vieillissement du bitume. Sous l'action des conditions climatiques extrêmes et du passage répété des véhicules, le bitume qui enrobe les particules, notamment celles à la surface de roulement, va s'altérer et permettre l'infiltration de l'eau à l'interface particules-bitume. La pression exercée par les roues des véhicules engendre le désenrobage des particules qui vont par la suite, se détacher de la surface. Or, l'épaisseur de bitume qui enrobe les particules est tributaire de la teneur en bitume utilisée. L'approche préconisée par la formulation LC du MTQ permet d'assurer une épaisseur minimale du bitume effectif en fixant le volume de bitume effectif (V_{be}) pour un enrobé donné.

Sous-compaction de l'enrobé – Un enrobé sous-compacté présentera une teneur élevée en vides. Une teneur en vides dans l'enrobé se traduit d'une part par une perméabilité plus élevée et d'autre part par une surface de contact bitume-air plus importante au sein de l'enrobé. Le contact du bitume avec l'air, le fera vieillir, le rendant ainsi plus fragile et moins élastique. Par ailleurs, les vides réduisent également la cohésion de la matrice qui lie les particules ensemble : les granulats seront d'autant plus faciles à arracher.

Dans certains cas, l'utilisation d'un bitume polymère permettra de mieux contrôler l'arrachement des granulats, car il est généralement plus cohésif que les bitumes purs et ce de façon plus marquée par temps chaud. Charbonneau (2000) a observé sur des enrobés EB-14 et ESG-14 que l'utilisation de granulats de grosseur supérieure à 12mm favorise une plus grande emprise des pneus sur les particules en surface et peut entraîner leur arrachement. Les enrobés constitués de granulats de grosseur supérieure à 12mm ont une texture de surface plus rugueuse et sont formulés avec une plus faible teneur en bitume, donnant lieu ainsi à des conditions défavorables à la résistance à l'arrachement (Charbonneau, 2002).

1.1.2.3.3 Ornières d'usure dues au désenrobage des granulats

Le désenrobage est la rupture du lien bitume-granat résultant d'une incompatibilité chimique de ces deux composants (Langlois et coll., 2001). Des produits anti-désenrobage sont disponibles sur le marché et visent à renforcer ces liens. Au Québec, ce phénomène de désenrobage est marginal (Langlois et coll., 2001). D'autre part, une autre forme de désenrobage survient lorsque les gros granulats utilisés dans la confection de l'enrobé sont recouverts d'une couche de particules fines : les particules sont sales et le bitume adhère à la poussière plutôt qu'à la particule. Cet élément a justifié l'introduction d'une spécification pour la propreté dans les exigences du ministère des Transports du Québec (MTQ).

1.2 Constituants d'un enrobé

Dans l'esprit de bien comprendre les éléments de formulation d'un enrobé qui conditionnent à la fois sa mise en œuvre et sa performance à l'orniérage, il convient d'exposer les différentes phases qui constituent l'enrobé et le rôle qu'ils peuvent jouer au terme du couple mise en œuvre - performance à l'orniérage.

Un enrobé bitumineux est un mélange uniforme de granulats enrobés de bitume. Plus particulièrement, il est constitué de : pierre, sable, filler, bitume et d'air. Les granulats fournissent à l'enrobé la résistance au cisaillement, le bitume contribue à la cohésion et au comportement viscoélastique de l'enrobé, et l'air joue un rôle de tampon (Moughabghab, 1994). Les vides jouent un rôle important dans les enrobés bitumineux, il faut constamment les contrôler (Lelièvre, 1994). Les vides sont exprimés en terme de volume, il faut, dans cette condition, quantifier les principaux constituants selon leur masse et le volume qu'ils occupent. De façon générale, le bitume et les granulats constituent respectivement de 4 à 7% et de 93 à 96% de la masse totale (Lelièvre, 1994). En considérant l'espace occupé par chacun des constituants, les vides, le bitume et les granulats occupent respectivement de 6 à 9%, de 9 à 16% et de 75 à 85% du volume total, ces valeurs s'appliquent essentiellement pour un enrobé fraîchement mis en place. L'aspect volumétrique permet de prendre en compte les différences de densité entre les constituants et facilite la comparaison entre les enrobés. La figure 2 illustre la représentation volumétrique d'un enrobé compacté.

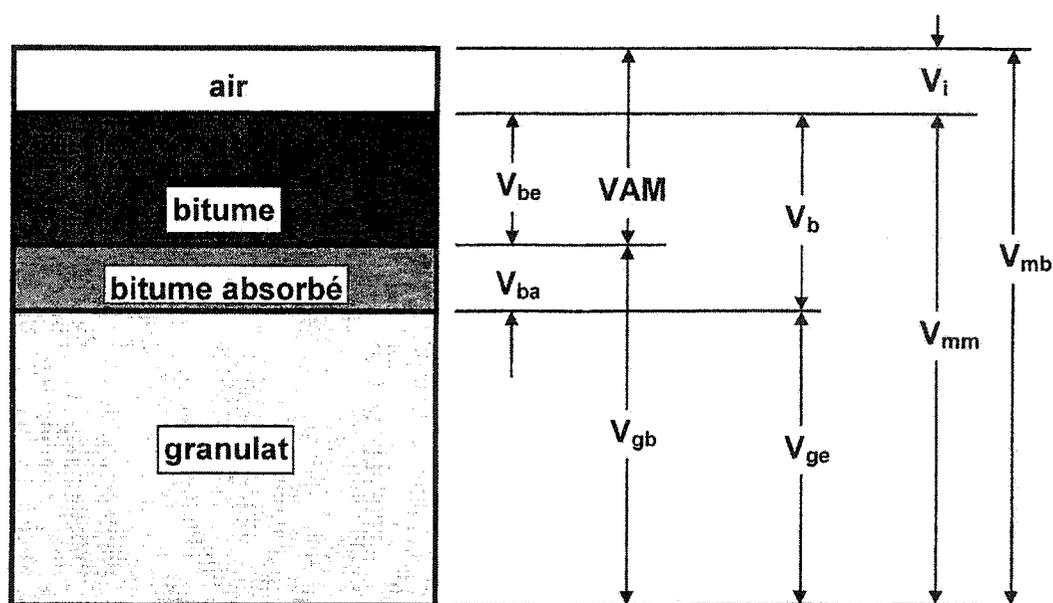


Figure 2 Représentation volumétrique d'un enrobé compacté
(Source : Langlois et coll., 2001)

où

V_{mb}	=	volume brut de l'enrobé;
V_i	=	volume des vides interstitiels;
V_{mm}	=	volume de l'enrobé sans vides interstitiels;
V_b	=	volume total de bitume;
V_{ge}	=	volume effectif du granulat;
V_{AM}	=	volume des vides entre les grains du granulat enrobé (vides intergranulaires);
V_{gb}	=	volume brut du granulat;
V_{be}	=	volume de bitume effectif (correspond au VCB en terme de volume);
V_{ba}	=	volume de bitume absorbé.

À l'annexe 1, quelques définitions relatives aux différentes phases de l'enrobé sont présentées.

1.2.1 Les vides interstitiels (V_i)

Les vides interstitiels jouent un rôle important dans la résistance à l'orniérage des enrobés (Moughabghab, 1994). La réduction de la teneur en air dans un enrobé augmente sa durabilité, ses résistances à l'orniérage et au gel-dégel, et son imperméabilité.

La teneur en vides mesurée en laboratoire à l'aide de la presse à cisaillement giratoire (PCG) diffère de celle obtenue en chantier en raison des distinctions notables entre les équipements de compactage. Plus précisément, la PCG utilise un compactage cyclique tandis qu'au chantier le compactage est effectué par un rouleau pneumatique (compaction statique) ou un rouleau vibrant (compactage dynamique). En ce sens, en laboratoire et au chantier, il sera question respectivement de vides à la formulation et de vides en place pour désigner les vides présents dans un enrobé. Cette distinction

s'applique aussi pour les plaques consolidées à l'aide du compacteur de plaques et utilisées pour l'essai à l'orniéreur (équipements de laboratoire).

Il est recommandé d'avoir un minimum de 3% de vides en place dans un enrobé, et préférablement autour de 4% selon l'avis de nombreux auteurs dont Monismith et Tayebali (1985). Sur les chantiers, le terme compacité est utilisé au lieu de vides interstitiels (la compacité est égale à 100% moins les vides interstitiels (%)). Selon l'entreprise Desourdy Jean Lefebvre (Proteau et Paquin, 2000) afin d'obtenir une performance optimisée à l'orniéreur (essai en laboratoire), la compacité des plaques devrait se situer entre 93 et 94%, une compacité variant de 92 à 94,5% est aussi jugée très acceptable. C'est essentiellement dans cette plage de compacité que les résultats in situ sont les meilleurs. Ces conclusions sont tirées de la figure 3, laquelle montre l'évolution de la performance à l'orniérage en fonction de la compacité de l'enrobé, évaluée à partir d'essais en laboratoire.

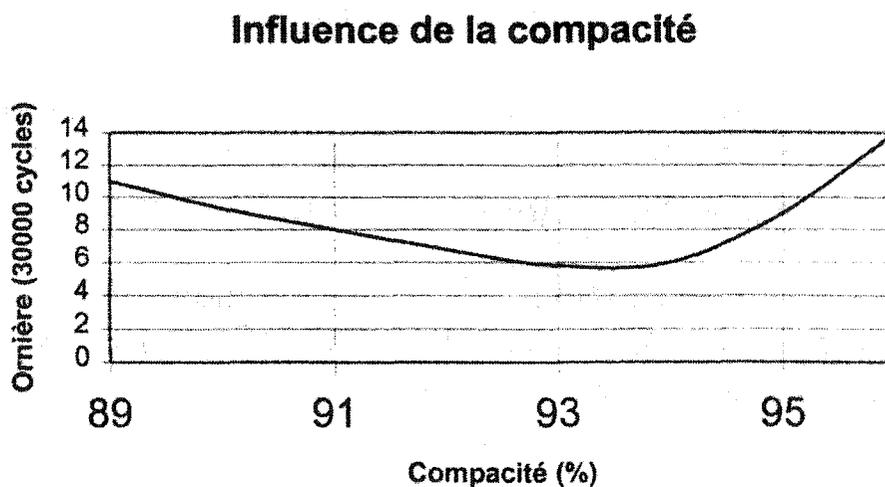


Figure 3 Influence de la compacité sur la résistance à l'orniérage, essai à l'orniéreur (Source : Proteau et Paquin, 2000)

Un manque de compacité se traduit par un tassement par post-compactage lié aux passages répétés des véhicules qui densifie l'enrobé jusqu'à ce que le squelette

granulaire soit en mesure de résister aux charges qu'il subit. Ce phénomène se définit comme étant l'orniérage par consolidation. En relation avec la figure 3 et l'orniérage, un enrobé ayant une teneur en Vi supérieure à 10% peut être considéré comme un enrobé sous compacté. Par ailleurs, la teneur en Vi doit être limitée à une valeur maximale, d'environ 8%, pour que l'enrobé ne soit pas trop poreux, ce qui diminuerait sa durabilité (Asphalt Institute, 1998; Lelièvre, 1994).

Une compacité trop élevée, moins de 4% de vides peut donner lieu à un fluage excessif de l'enrobé. Un enrobé devrait toujours avoir une teneur en vides supérieure à 4% pour palier au post-compactage lié au passage répété des véhicules de manières à éviter que la teneur en vides se retrouve en dessous de 2 à 3%, rendant ainsi l'enrobé susceptible au fluage et au phénomène de ressuage (AIPCR, 1995). Les pentes de la courbe de part et d'autre de la valeur optimale présentée à la figure 3, révèlent bien qu'un enrobé surcompacté est souvent plus critique à l'orniérage qu'un enrobé sous compacté. Les enrobés très denses en sont un très bon exemple, ils sont très susceptibles à l'orniérage de fluage en raison de leur faible teneur en vides et ce, même en dépit de leur faible quantité en bitume (Campen et coll., 1957).

1.2.1.1 Réflexion sur le rôle des vides au sein de l'enrobé

A priori, on pourrait croire que la présence de vides dans un enrobé n'a pas d'importance sur sa stabilité face aux charges, puisque c'est le squelette granulaire qui reprend la majorité des efforts. Par ailleurs, dans un enrobé bitumineux, il est usuel de croire que la présence de vides est essentielle pour palier aux phénomènes d'expansion liés aux propriétés spécifiques du bitume (dilatation thermique). Or, comme il a été mentionné précédemment, certaines recherches ont mis en perspective le rôle bénéfique des vides dans l'enrobé vis-à-vis sa résistance à l'orniérage.

Certaines précisions peuvent être apportées quant au rôle spécifique des vides dans l'enrobé face à sa résistance à l'orniérage. Pour cela, référons-nous à deux enrobés, A et B, possédant le même squelette granulaire (même volume de granulats) mais distincts de par leur teneur en vides. Étant donné que le volume granulaire est constant et que la teneur en vides change, le volume de bitume va donc être différent pour ces deux enrobés. La figure 4 illustre schématiquement en volume absolu la composition des enrobés A et B. La figure 4 a) illustre l'enrobé présentant le plus de vides et le moins de bitume comparativement à l'enrobé présenté à la figure 4 b).

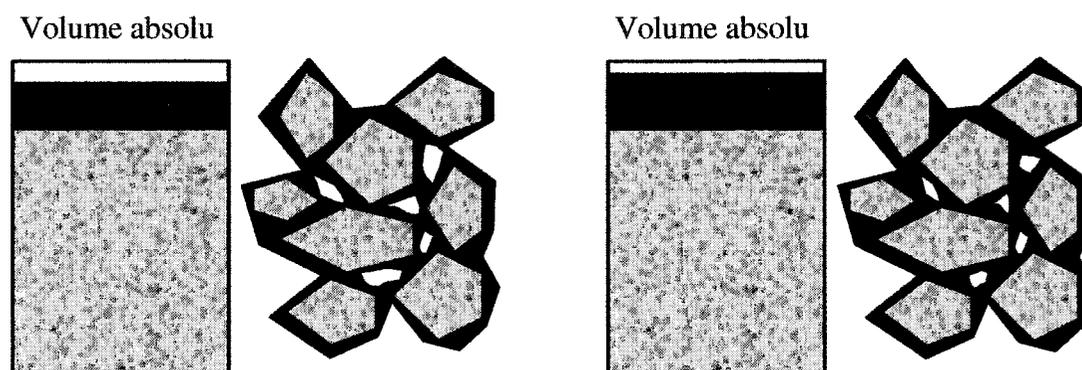


Figure 4 a) Enrobé contenant le plus de vides et le moins de bitume (enrobé A)

Figure 4 b) Enrobé contenant le plus de bitume et le moins de vides (enrobé B)

Le rôle des vides au sein de l'enrobé peut se résumer en deux points : 1) en tant qu'amortisseur, dans le cas de l'orniérage et 2) en tant que soupape, dans le cas des variations de température. Pour bien mettre en évidence le rôle de l'air, il convient d'expliquer un peu plus en détails le double rôle des vides d'air.

Amortisseur – Pour l'enrobé B, il y a moins de vides que dans l'enrobé A. L'enrobé B sera moins sensible au désenrobage, mais toutefois plus sensible que l'enrobé A au ressuage, et surtout à l'orniérage de fluage. En effet, à une température donnée (60°C pour l'essai à l'orniéreur), quand l'enrobé A est sollicité par un fort trafic, les vides (air)

situés entre les particules enrobées de bitume absorbe vraisemblablement une petite partie des efforts en se comprimant jouant ainsi le rôle d'amortisseur. L'énergie utilisée lors de cette compression doit plus ou moins retarder le fluage du bitume et donc, les mécanismes menant à l'orniérage. Cet effet "amortisseur" joué par les vides de l'enrobé s'avère pleinement avantageux du point de vue de la résistance à l'orniérage lorsqu'il y a une sollicitation appliquée rapidement (chargement-déchargement).

Soupape – Les vides (air) situés entre les granulats enrobés va permettre la dilatation du bitume lors des variations de température jouant également un rôle de soupape. Lors d'une augmentation de température, les vides vont absorber l'accroissement de volume du bitume et ainsi limiter le ressuage, l'action lubrifiante du bitume et les pertes de stabilité. Les pertes de stabilité se traduisent par une densification du squelette granulaire. Ainsi, lors d'une sollicitation, l'enrobé A va disposer de plus de vides entre les particules enrobées pour assurer le rôle de soupape.

1.2.1.2 Sommaire

En définitive, il faudra de 4 à 8% de vides interstitiels au moment de la mise en service de la chaussée de manière à obtenir une performance optimale vis-à-vis l'orniérage (rôle d'amortisseur) et tout en ayant, suite au phénomène de post-compactage lié au passage des véhicules, suffisamment de vides résiduels dans l'enrobé pour palier aux variations volumétriques du bitume par temps chaud (rôle de soupape).

1.2.2 Le bitume

Le bitume donne à l'enrobé sa cohésion, et permet d'assembler les granulats et de les protéger contre les infiltrations d'eau. Le bitume joue un rôle fondamental dans la durabilité de l'enrobé. Par ses caractéristiques intrinsèques, il assure flexibilité et résistances à la fissuration, à la fatigue et à l'arrachement. En outre, il est responsable en

totalité du comportement viscoélastique de l'enrobé. Il est essentiel de souligner que le coût initial de l'enrobé est largement influencé par le bitume.

Par ailleurs, avant de traiter des aspects liés au bitume dans le contexte de l'enrobé, il convient d'exposer en détails la composition et la structuration du bitume qui va conditionner son comportement rhéologique et celui de l'enrobé.

1.2.2.1 Bitume : matière première

Le bitume est un matériau organique. Il est constitué d'hydrocarbures, c'est-à-dire essentiellement de carbone et d'hydrogène ainsi que de faibles proportions de soufre, d'azote et d'oxygène. Or, quelle est la proportion de chacun des constituants du bitume?

1.2.2.1.1 Composition chimique des bitumes

Plus précisément, le bitume est composé respectivement de : 82 à 88% de carbone, 8 à 11% d'hydrogène, 0 à 6% de soufre, 0 à 1,5% d'oxygène et 0 à 1% d'azote. Comme pour tous les matériaux, c'est la composition chimique du bitume et sa structuration qui expliquent son comportement mécanique (Kennel, 1977). Cependant, la diversité des molécules présentes dans les bitumes rend impossible la détermination de leur composition exacte (Shell, 1991). Toutefois, des méthodes de séparation des bitumes en différentes fractions ont été mises au point : extraction avec du solvant, chromatographie, adsorption par des particules fines et filtration de la solution non adsorbée, et distillation des molécules conjuguées avec une des autres méthodes (Shell, 1990). Ces méthodes de fractionnement permettent de séparer les bitumes en quatre grands groupes génériques : 1) les saturés, 2) les aromatiques, 3) les résines et 4) les asphaltènes. Les saturés, les aromatiques et les résines sont souvent regroupés sous l'appellation de maltènes.

Les saturés – Les saturés sont constitués de molécules principalement paraffiniques, qui peuvent contenir également des cycles naphthéniques. Cette fraction est incolore ou légèrement jaunâtre et elle se comporte un peu comme une graisse. Les masses moléculaires varient entre 300 et 2000 g/mol (Langlois et coll., 2001). Cette fraction constitue de 5 à 20% de la masse du bitume (Shell, 1990). Les saturés donnent au bitume sa viscosité et sa fluidité (Young et coll., 1998).

Les aromatiques – Les aromatiques sont des huiles visqueuses de couleur rouge-brun sombre. La distribution des masses moléculaires est généralement semblable à celle des saturés, soit de 300 à 2000 g/mol (Langlois et coll., 2001). La teneur en soufre peut atteindre 2 à 3% (Shell, 1991). Ils composent de 40 à 65% de la masse du bitume (Shell, 1990).

Les résines – Les résines sont en quelque sortes des agents dispersants pour les asphaltènes. La proportion des résines en rapport avec les asphaltènes contrôle le degré de la solution ("sol") ou de la gélatine ("gel"). Ce sont des solides noirs qui fondent par chauffage. La courbe de distribution de leurs masses moléculaires est étalée, entre 500 et 50 000 g/mol (Shell, 1990). Leur consistance rappelle celle d'un vernis. Les teneurs en azote et oxygène peuvent atteindre de 0,8 à 1%, et la teneur en soufre peut varier entre 3 et 8% (Shell, 1991). Elles donnent au bitume son adhésion et sa ductilité (Young et coll., 1998).

Les asphaltènes – Les asphaltènes diffèrent des résines par leur insolubilité dans le bitume. Ils sont des composés essentiellement aromatiques et plus polaires, car plus riches en soufre, azote et oxygène. A cause de leur polarité élevée et de la tendance qu'ont les molécules à s'associer, la détermination de leur masse moléculaire est difficile (Shell, 1991). Des études récentes tendent à montrer qu'elle est comprise entre 1000 et 100 000 g/mol (Shell, 1990). Ils se présentent sous la forme d'un solide noir, cassant, pratiquement infusible (Shell, 1991). Leur point de ramollissement est assez élevé,

compris entre 150 et 200°C (Kennel, 1977). Ils composent de 5 à 25% du bitume selon la compagnie Shell (1990) ou de 10 à 30% selon Brion (1984). Ce sont les asphaltènes qui donnent aux bitumes leur résistance et leur rigidité (Young et coll., 1998).

Il n'existe pas de continuité entre ces groupes : leur composition évolue régulièrement de saturés aux asphaltènes vers des composés à caractères aromatiques et polaires de plus en plus prononcés. Le degré d'association des molécules ou des groupes dépend de : la température, la distribution des masses moléculaires, la concentration en "aromatiques polaires" et le pouvoir solvant de la phase maltènes. La composition et la concentration de chaque groupe sont tributaires du brut employé.

1.2.2.1.2 Structure des bitumes

De nombreuses études attribuent au bitume une structure colloïdale, c'est-à-dire qu'on peut supposer que les maltènes constituent la phase continue, dans laquelle les asphaltènes constituent la phase dispersée. Selon plusieurs auteurs, les asphaltènes sont responsables du comportement mécanique du bitume, par leur tendance à s'associer et à constituer ainsi des structures de grande taille, des micelles de quelques microns. Les micelles d'asphaltènes, éventuellement gonflées par des composés aromatiques lourds des maltènes (résines), peuvent être soit : 1) complètement peptisées (dispersées et stabilisées) : bitume de type "sol" ou 2) plus ou moins floculées : bitume de type "gel".

Dans un autre langage, cela revient à considérer le bitume comme un véritable matériau constitué d'une *matrice* visqueuse, les maltènes, renforcée par une charpente plus ou moins organisée, les asphaltènes, dans laquelle un regroupement de micelles constitue un agglomérat (Kennel, 1977).

Il faut noter que la structure des bitumes change avec la température. Avec un accroissement de température, les asphaltènes deviennent plus dissous dans les résines,

lesquelles deviennent à leur tour plus dissoutes dans les huiles : le bitume devient moins visqueux. Avec un abaissement de la température, les asphaltènes deviennent moins solubles et les liens entre les micelles augmentent dans la structure ordonnée : le bitume devient plus visqueux.

Un très grand nombre d'auteurs s'accordent pour classer les bitumes en trois structures distinctes : les bitumes de type "sol", de type "sol-gel" et de type "gel". C'est le niveau d'interaction entre les asphaltènes qui va conditionner le type de structure. Il est évident que l'organisation de l'ossature d'asphaltènes, associée aux caractéristiques visqueuses de la matrice, va déterminer le comportement rhéologique de bitume (Kennel, 1977).

L'annexe 2 présente une description détaillée des différentes structures du bitume.

Globalement, un bitume de type "sol" sera plus susceptible aux effets de la température qu'un bitume de type "gel" tout en présentant un comportement plus visqueux (Shell, 1991). La plupart des bitumes routiers sont de type "sol-gel" (Shell, 1990).

En définitive, c'est la composition chimique du bitume et sa structuration qui conditionnent sa rhéologie. Les asphaltènes sont responsables, en grande partie, du comportement du bitume, par leur tendance à s'associer et à constituer ainsi des structures de grandes tailles : les micelles. Le comportement rhéologique du bitume est aussi influencé par la température et le temps (vitesse) de chargement.

1.2.2.1.3 Le vieillissement du bitume

Le vieillissement du bitume se traduit par un durcissement. Le durcissement du bitume peut être causé par évaporation de la fraction volatile, l'oxydation, la restructuration moléculaire ("steric hardening") ou par l'adsorption d'une portion des huiles par les particules minérales (Scholz et Brown, 1996; Shell, 1995).

L'oxydation constitue la principale cause du durcissement du bitume. L'oxydation est largement dépendante de la température, du temps d'exposition à l'air ambiant et de l'épaisseur du film de bitume effectif. Au-dessus de 100°C, le degré d'oxydation double pour chaque augmentation de 10°C. L'oxydation des bitumes se traduit par une transformation des aromatiques en résines et des résines en asphaltènes, et par ailleurs, l'augmentation de la quantité d'asphaltènes est moins importante que celle des résines (Choquet, 1993).

Le vieillissement des bitumes conduit à une augmentation des molécules de grandes tailles (Bynum et Taxler, 1970; Glover et coll., 1987). Dans le même sens, Brûlé, Raymond et Such (1987) affirment, à l'aide de la chromatographie sur gel perméable (GPC), que le vieillissement des bitumes se traduit par une transformation des molécules en micelles et des micelles en agglomérats, vieillissement effectué à l'aide du "Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)".

D'un point de vue rhéologique, le vieillissement et le durcissement du bitume se traduit par une perte d'élasticité, laquelle aura pour effet de modifier le comportement de l'enrobé sur route. De ce fait, les revêtements âgés seront plus susceptibles à la fissuration thermique et moins à l'orniérage. L'enrobé sera donc plus susceptible de présenter des ornières dans les premières années de sa mise en service parce qu'il est noir (absorption des rayons du soleil) et que le bitume est plus mou (oxydation plus faible).

1.2.2.2 Teneur en bitume (Pb)

Il faut une quantité minimale de bitume pour assurer la durabilité de l'enrobé. Notamment pour prévenir le phénomène d'arrachement des granulats, une teneur minimale en bitume est requise de manière à obtenir un film de bitume d'épaisseur

suffisante sur l'ensemble des particules. Une augmentation de la quantité de bitume va accroître la résistance à l'eau, à l'arrachement, à la fissuration par fatigue et la résistance à la fissuration thermique de l'enrobé.

Pour une granulométrie donnée, une augmentation de la teneur en bitume va accroître l'ouvrabilité de l'enrobé (diminution du VAM) jusqu'à une valeur minimale. En effet, la hausse de la teneur en bitume se traduit par deux effets : 1) augmentation de la lubrification entre les particules et 2) remplissage d'une partie des vides laissés par les granulats; ces deux rôles vont permettre une meilleure compaction de l'enrobé. Par contre, un surdosage en bitume accroît le VAM. Le surdosage en bitume a pour effet, d'une part, de réduire l'efficacité de la compaction par absorption d'énergie et, d'autre part, d'occuper un volume qui restreint la compacité du squelette granulaire : le VAM augmente. Cette situation se produit même s'il y a présence de vides interstitiels dans l'enrobé (Asphalt Institute, 1983; Griffith et Kallas, 1957).

En Amérique, la teneur en bitume (Pb) des enrobés fabriqués en laboratoire et en usine est exprimée en pourcentage par rapport à la masse totale de l'enrobé, alors qu'en Europe, elle s'exprime par rapport à la masse de granulats.

Il est important de souligner que la teneur totale en bitume n'est pas un gage d'une bonne durabilité, c'est une condition nécessaire mais non suffisante, il faut regarder la teneur en bitume qui est absorbé par les granulats en plus de respecter les règles de l'art.

1.2.2.3 Bitume absorbé par les granulats (Pba)

Puisque les particules d'un granulat présentent généralement une fraction de vides perméables, c'est-à-dire dont les pores sont accessibles à partir de leur surface, une partie du bitume utilisée à la confection d'un enrobé est absorbée par la masse

granulaire. La teneur en bitume absorbée est exprimée en pourcentage par rapport à la masse de granulat.

McLeod (1956) a montré que le bitume absorbé ne jouait aucun rôle dans le comportement de l'enrobé bitumineux. Il a proposé la notion de teneur en bitume effectif pour avoir une idée sur la performance de l'enrobé. Le bitume effectif est défini comme étant la quantité totale de bitume moins la quantité de bitume absorbé par le granulat.

Par ailleurs, McRae (1960) propose de prendre en considération le bitume absorbé puisque, selon cet auteur, l'effet des changements de pression et de température interagissent sur le bitume absorbé, le forçant à se dilater ou se contracter peut ainsi jouer un rôle déterminant sur la durabilité de l'enrobé bitumineux.

Il semble que plus un granulat est absorbant, plus son adhérence avec le liant est grande et moins il y aura risque d'orniérage pour le moins que la qualité du bitume soit acceptable. Les scories d'acier en sont un bel exemple (Paradis, 2001).

1.2.2.4 Bitume effectif

Le bitume effectif constitue la quantité de bitume qui recouvre l'ensemble des particules et qui influence directement la performance de l'enrobé (Langlois et coll., 2001). Le bitume effectif assure efficacement les fonctions essentielles suivantes (McLeod, 1956) :

- 1- sert d'agent de liaison et de cimentation;
- 2- participe à la stabilité sous charge et s'oppose à la déformation;
- 3- fournit à l'enrobé la plasticité et l'ouvrabilité nécessaire à sa mise en place et à son compactage;

- 4- influence de façon déterminante la durabilité globale et la bonne tenue de l'enrobé bitumineux dans la chaussée;
- 5- constitue la seule partie du liant bitumineux introduit à devoir intervenir dans le calcul de la teneur en vides interstitiels de l'enrobé puisqu'il est le seul matériau qui remplit le volume libre entre les particules du granulat (VAM) de l'enrobé compacté.

Le dernier énoncé est très révélateur, le bitume effectif constitue un volume qui va influencer la teneur en vides, car il remplit les vides intergranulaires (VAM). Dans ce sens, la teneur en bitume effectif sera convertie en volume de bitume effectif (Vbe) dans le but de simplifier l'analyse. De plus, la fraction volumétrique permet de mieux comparer les enrobés des divers fabricants entre eux.

1.2.2.4.1 Volume de bitume effectif (Vbe)

Dans la méthode de formulation LC, le volume de bitume effectif (Vbe) est défini comme étant : le volume total de bitume (Vb) dans l'enrobé moins le volume de bitume absorbé par les granulats (Vba) **exprimé en pourcentage par rapport au volume de l'enrobé sans vides interstitiels** (Vmm). Cette façon d'exprimer le Vbe permet de faciliter la formulation et d'uniformiser les valeurs. Par la suite, le Vbe sera reconverti en pourcentage massique pour la formulation. La méthode de formulation LC du MTQ exige un Vbe de 12,4, 12,2 et 11,8% pour les enrobés EG-10, ESG-10 et ESG-14. Ce Vbe est spécifié pour l'enrobé sans vides interstitiels (Vmm).

Subséquent, la section 1.2.2.4.3 traite des facteurs qui influencent le Vbe requis et l'épaisseur du film de bitume effectif (FBE). En terme de volume, le Vbe correspond aux vides comblés par le bitume (VCB).

1.2.2.4.2 Vides comblés par le bitume (VCB)

Les vides comblés par le bitume (VCB) constituent le volume des vides intergranulaires (VAM) occupé par le volume de bitume effectif (V_{be}). Le VCB est exprimé en pourcentage du volume des vides intergranulaires (VAM). Les vides comblés par le bitume (VCB) et les vides interstitiels (V_i) représentent les meilleurs indicateurs pour évaluer le comportement de l'enrobé dans la chaussée (McLeod, 1956; Huber et Heiman, 1987). Toutefois, dans le processus lié à la formulation de l'enrobé et du choix des granulats, il est difficile de se référer essentiellement au VCB, lequel est une variable et dépend du VAM et des vides interstitiels (McLeod, 1987). Par ailleurs, la figure 5 montre l'étroite relation entre le VCB, le VAM et les vides interstitiels. En définitive, le VCB n'est qu'une autre façon de voir les VAM, soit comme un réservoir dans lequel on verse le bitume effectif dans une proportion calculable (Trépanier, 1990).

Les relations trouvées lors d'une étude sur le comportement de différents enrobés utilisés dans les chaussées canadiennes ont montré que l'orniérage est directement relié

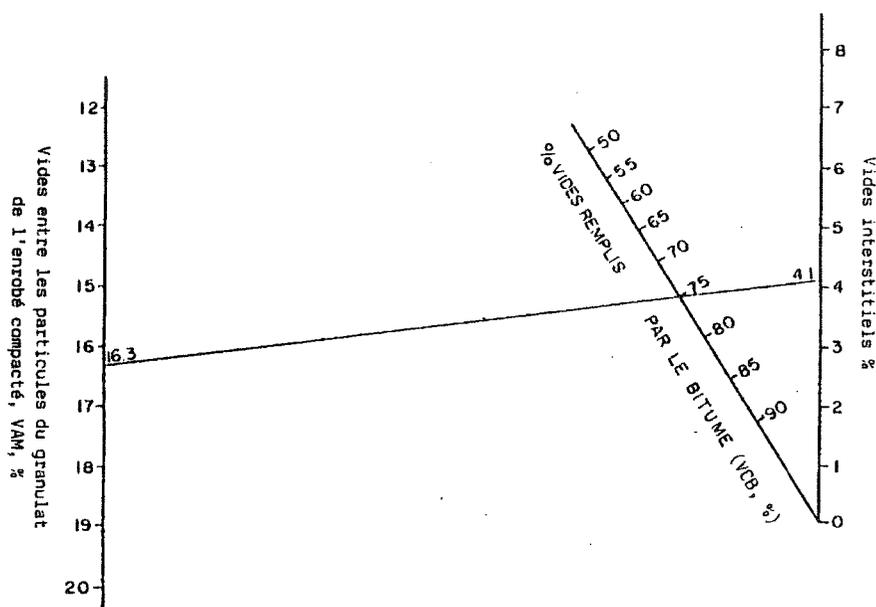


Figure 5 Relation entre le V_i , le VAM et le VCB (Source : Trépanier, 1990)

au pourcentage de VAM comblé par le bitume (VCB). Toutes les chaussées analysées dont le VCB des enrobés n'excédait pas 70% montraient un bon comportement à l'orniérage (Huber et Heiman, 1987).

Rappelons à cet égard qu'un VCB trop bas conduit à des compacités insuffisantes et à des déformations par postcompactage, alors qu'un VCB trop élevé provoque la dislocation du squelette minéral, la diminution du frottement interne et se traduit par un orniérage par fluage sous l'effet du trafic (Serfass, Bense et Tessonneau, 1995). Plus le VCB est élevé, plus le bitume joue un rôle important dans la reprise des sollicitations.

La méthode Superpave spécifie dans ses normes des valeurs de VCB (*VFA : Voids Filled with Asphalt*) pour la méthode Marshall, qui varient avec le trafic et le pourcentage de vides interstitiels, afin que les enrobés aient un bon comportement (tableau I).

Pour un faible, moyen et fort niveau de circulation, la méthode Superpave fixe des VCB variant de 70 à 80%, de 65 à 78% et de 65 à 75% pour des enrobés contenant de 3 à 5% de vides (Asphalt Institute, 1998). Une faible teneur en VCB sera à considérer pour une circulation élevée, car la solidité et la stabilité de l'enrobé sont requises. L'enrobé sollicité par un trafic faible pourra avoir un VCB plus élevé pour assurer sa durabilité (Asphalt Institute, 1998). Dans le tableau I, la teneur en VAM fait référence à la table 3.08, cette table est illustrée au tableau VII.

Bien qu'il n'y a pas d'exigence particulière pour le VCB dans la méthode de formulation LC, il est intéressant d'en établir la valeur puisqu'il constitue un bon indicateur de performance des enrobés (Langlois et coll., 2001). En tenant compte d'une teneur en vides de 4%, les VCB sont de l'ordre de : 73,9%, 74,5% et 74,8% pour les enrobés ESG-14, ESG-10 et EG-10 formulés par le MTQ. Ces enrobés peuvent être utilisés

pratiquement sur tous les types de routes, ce qui signifie que l'échelle du trafic peut varier considérablement.

Tableau I

Critères de conception pour les enrobés selon la méthode Marshall

Mix Criteria	Light Traffic Surface & Base		Medium Traffic Surface & Base		Heavy Traffic Surface & Base	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Compaction, number of blows each end of specimen	35		50		75	
Stability, N (lbs.)	3336 (750)	—	5338 (1200)	—	8006 (1800)	—
Flow, 0.25 mm (0.01 in.)	8	18	8	16	8	14
Air Voids, percent	3	5	3	5	3	5
Voids in Mineral Aggregate (VMA), percent			<i>See Table 3.08</i>			
Voids Filled With Asphalt (VFA), percent (VCB)	70	80	65	78	65	75

Notes:

- All criteria, not just stability value alone, must be considered in designing an asphalt paving mix. Hot mix asphalt bases that do not meet these criteria when tested at 60°C (140°F) are satisfactory if they meet the criteria when tested at 38°C (100°F) and are placed 100 mm (4 in.) or more below the surface. This recommendation applies only to regions having a range of climatic conditions similar to those prevailing throughout most of the United States. A different lower test temperature may be considered in regions having more extreme climatic conditions.
- Traffic classifications
 - Light Traffic conditions resulting in Design EAL $\leq 10^4$
 - Medium Traffic conditions resulting in a Design EAL between 10^4 and 10^5
 - Heavy Traffic conditions resulting in a Design EAL $> 10^5$
- Laboratory compaction efforts should closely approach the maximum density obtained in the pavement under traffic.
- The flow value refers to the point where the load begins to decrease.
- The portion of asphalt cement lost by absorption into the aggregate particles must be allowed for when calculating percent air voids.
- Percent voids in the mineral aggregate is to be calculated on the basis of the ASTM bulk specific gravity for the aggregate.

(Source : Asphalt Institute, 1998)

Quoique les VCB constituent des indicateurs de performance, il est favorable de s'en remettre au concept du Vbe pour formuler les enrobés car c'est plus simple à utiliser et à appliquer. Il faut se rappeler que le Vbe et le VCB constituent le même volume. Dans ce sens, il faudra spécifier un Vbe donné pour chaque type d'enrobé et ce, pour une teneur en vides représentative de celle obtenue in situ afin d'obtenir un VCB adéquat. Afin de

simplifier les calculs, le MTQ spécifie un V_{be} en considérant que l'enrobé n'a pas de vides interstitiels (V_{mm}), cette façon de faire permet d'éliminer l'obligation de spécifier une plage de valeurs pour le V_{be} en considérant la teneur en vides visée en chantier qui est de 3 à 5%.

1.2.2.4.3 Film de bitume effectif (FBE)

Les fonctions du film de bitume effectif, le FBE, ont été décrites à la section 1.2.2.4 traitant du bitume effectif. Les références trouvées dans la littérature indiquent que le FBE peut varier entre 10 et 100 μ m (Puzinauskas, 1983).

L'épaisseur du FBE dépend de plusieurs facteurs, comme la teneur en bitume effectif, la grosseur maximale du combiné granulaire, la granulométrie et la forme des granulats. Évidemment, pour une granulométrie donnée, plus le V_{be} est élevé, plus le FBE sera important.

La variation du FBE en rapport à la grosseur maximale, la granulométrie et la forme des granulats peuvent-être pris en considération par l'entremise de la surface spécifique des granulats.

La surface spécifique d'un granulat représente la surface totale des particules par rapport à son volume. Elle est exprimée en m^2/m^3 de granulat. Cette façon d'exprimer la surface spécifique permet de faire la comparaison entre les différents granulats. Elle est parfois exprimée en m^2/kg , laquelle est essentiellement comparable entre les matériaux possédant une même densité. Plus la surface spécifique d'un granulat est élevée, plus il faut de bitume effectif (V_{be}) pour les recouvrir et obtenir un FBE donné. La surface spécifique d'un mélange granulaire est influencée par : a) la grosseur maximale, b) la granulométrie et c) la forme des granulats.

A) Grosseur maximale des granulats – La surface spécifique est inversement proportionnelle à la dimension maximale du granulat.

B) Granulométrie des granulats – Pour un granulat de même grosseur maximale, la surface spécifique sera proportionnelle aux pourcentages passants ou à la finesse du granulat.

C) Forme des granulats – La surface spécifique d'une particule cubique est 1,9 fois plus grande que celle d'une particule sphérique (Field, 1978). Ce sont les particules plates et allongées qui ont la plus grande surface spécifique. Cependant, Field (1978) précise que la méthode des surfaces spécifiques, qui utilise des facteurs prédéterminés pour chacun des tamis n'est pas toujours réaliste car elle utilise les mêmes facteurs peu importe la forme du granulat. Cela constitue une source d'imprécision.

1.2.2.5 Sommaire

Un constat s'impose : l'accroissement de la teneur en bitume améliore l'ouvrabilité de l'enrobé et sa performance est directement influencée par le bitume effectif.

Par ailleurs, il faut se rappeler que le V_{be} et le VCB constituent le même volume. La valeur du VCB constitue en soit un surprenant indicateur de performance; il est recommandé d'avoir un VCB inférieur à 75% lorsque l'enrobé est soumis à un trafic élevé et lourd. Toutefois, pour la formulation des enrobés, il est favorable de s'en remettre au concept du V_{be} . Dans ce même ordre d'idée, il faudra spécifier un V_{be} afin d'obtenir un VCB adéquat pour une teneur en vides représentative de celle obtenue in situ (en place). Par ailleurs, une valeur de V_{be} sera spécifiée pour chaque type d'enrobé et cette valeur sera donnée pour un enrobé contenant aucun vides interstitiels (V_{mm})

afin de faciliter la formulation. Le tableau II fait une synthèse des facteurs qui sont relatifs au bitume et qui affectent l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage.

Tableau II

Facteurs qui sont relatifs au bitume et qui affectent l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage

Facteurs influençant le VAM, l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage		VAM	Ouvrabilité	Résistance à l'orniérage
Bitume	Vbe, VCB ou quantité de bitume	Très élevé	↑	↓ ⁽¹⁾
		Élevé	↓	↑
		Optimum	↓	↑
		Faible	↑	↓
(1) : Orniérage en raison du fluage de l'enrobé				
(2) : Orniérage en raison du post-compactage de l'enrobé				

1.2.3 Granulats

Les granulats constituent l'élément principal des enrobés, soit environ de 93 à 96% de la masse et de 75 à 85% du volume total. Un granulats représente un ensemble de particules de matière solide, provenant de roches meubles ou consolidées ou de matériaux recyclés. Ces particules sont de dimension, de forme et de nature diverses. Au Québec, les granulats utilisés actuellement dans les enrobés bitumineux sont tous issus de l'un des trois types de roches qui forment la croûte terrestre, soit des roches ignées, métamorphiques ou sédimentaires.

Chaque particule peut être composée ou bien d'un ou de plusieurs minéraux ou bien de matière vitrifiée ou encore d'un mélange de matières cristallisées et vitrifiées. Par

exemple, les particules de granite sont formées de plusieurs minéraux (feldspath, quartz, plagioclase) alors que les particules de calcaire sont principalement composées d'un seul minéral (calcite).

1.2.3.1 Sources de granulats

De façon générale, le classement des granulats selon leur source se fait en deux grandes catégories : les *granulats naturels*, extrait des carrières, des gravières ou des sablières et les *granulats artificiels* qui sont fabriqués pour des usages particuliers, comme des granulats légers pour béton. Les *granulats artificiels* sont occasionnellement utilisés dans les enrobés. Il y a aussi les *sous-produits d'origine industrielle* comme les laitiers, les scories, les cendres volantes et les résidus de mines (Aïtcin, Jolicoeur et Mercier, 1992).

1.2.3.2 Caractéristiques des granulats et essais de caractérisation

La performance des enrobés sera fonction du type et de la qualité des granulats utilisés. Au Québec, la qualité des granulats est évaluée sur la base de leurs *caractéristiques intrinsèques*, de leurs *caractéristiques de fabrication* et de *caractéristiques* dites *complémentaires*. Les caractéristiques intrinsèques sont reliées à la nature même de la roche mère. Ces caractéristiques sont donc inchangeables. Les caractéristiques de fabrication vont plutôt dépendre des conditions d'exploitation et du processus d'élaboration des matériaux. Ces caractéristiques sont donc modifiables en jouant sur les procédés d'exploitation. Les caractéristiques complémentaires sont celles qui ont une incidence sur la performance de l'enrobé, mais qui ne sont pas pris en compte lors de la classification des granulats (propreté, résistance au polissage et présence de particules délétères). En outre, le coefficient d'écoulement (méthode d'essai LC 21-075) permet d'apprécier l'effet combiné de l'angularité de la forme et de la rugosité de surface des particules. Plus le coefficient d'écoulement est élevé, plus le matériau est anguleux et rugueux, augmentant ainsi l'angle de frottement interne et la résistance à l'orniérage de

l'enrobé. Les sables manufacturés, et les matériaux issus de bancs de sable et de gravier ont des coefficients d'écoulement respectivement de 80 à 120 et de 50 à 105. L'exigence minimale fixée par le MTQ pour le coefficient d'écoulement est de 80 et ce, de manière à assurer une stabilité adéquate de l'enrobé vis-à-vis l'orniérage pour autant que l'ensemble des autres éléments de constitution soient conformes aux règles de l'art.

Les gros granulats sont classifiés selon leurs caractéristiques intrinsèques et leurs caractéristiques de fabrication, et les granulats fins selon leurs caractéristiques intrinsèques. Des détails additionnels quant aux caractéristiques des granulats sont présentés à l'annexe 3.

1.2.3.3 Granularité

La granularité d'un matériau granulaire correspond à la distribution des particules du granulat selon leur dimension. Il existe plusieurs distributions granulaires, mais globalement on distingue deux types de granulométrie : uniforme et étalée (Aïtcin, Jolicœur et Mercier, 1992). Seule la granulométrie étalée peut être ramifiée en deux subdivisions : continue et discontinue. Bien entendu, la granulométrie uniforme est considérée comme continue.

Une granulométrie continue représente un granulat comportant des particules de toutes les dimensions (figure 6, courbe b)), alors qu'une granulométrie discontinue est constituée d'un granulat manquant de particules d'une certaine dimension : ceci se traduit par un palier sur la courbe granulométrique (figure 6 : courbe a)).

Il est important de rappeler que plus l'étendue granulaire est grande, plus le granulat est susceptible à la ségrégation.

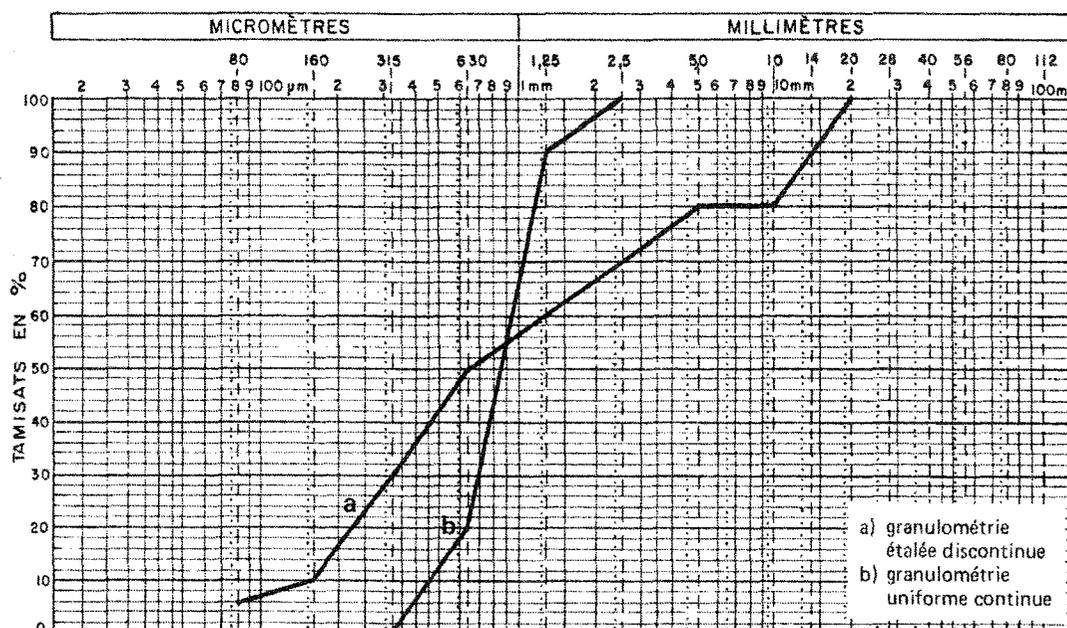


Figure 6 Différents types de granulométrie
(Source : Aïtcin, Jolicoeur et Mercier, 1992)

Compte tenu de l'importance que joue la distribution granulaire quant à l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage de l'enrobé, les caractéristiques spécifiques des deux principales familles de distribution granulaire vis-à-vis leurs **vides intergranulaires** (VAM), leur **ouvrabilité** et leur **capacité sous charge** seront traitées.

Avant d'aller plus loin, il convient d'apporter des éléments de réflexion quant à la notion d'ouvrabilité. L'ouvrabilité se définit comme étant la propriété d'un matériau à se mettre en place. Cependant, la notion d'ouvrabilité n'est pas tout à fait la même pour ceux qui oeuvrent dans le domaine de la géotechnique comparativement à ceux oeuvrant dans le domaine des enrobés.

En effet, dans le domaine de la géotechnique, la notion d'ouvrabilité fait référence à la masse volumique sèche maximale (kg/m^3) déterminée à l'aide de l'essai Proctor ou de l'essai Proctor modifié et non à la teneur en vides. Le taux de compaction du matériau

(%) est égal à la masse volumique sèche (kg/m^3) obtenue sur le chantier sur la masse volumique sèche maximale (kg/m^3). Un indice de l'ouvrabilité : plus la masse volumique sèche maximale est élevée, plus le matériau est considéré comme étant ouvrable. Par exemple, une argile et une pierre concassée de calibre MG-20 auront respectivement une masse volumique sèche maximale de l'ordre de 1650 et 2250 kg/m^3 . L'argile possède une masse volumique sèche maximale plus faible que la pierre concassée, car elle est composée de particules d'à peu près le même diamètre (0 à 80 μm), comparativement à la pierre concassée (0 à 28mm). Cela signifie que l'argile présente une granulométrie uniforme. En chantier, le taux de compaction des matériaux est grandement affecté par leur teneur en eau, leur granulométrie et l'énergie de compactage déployée par l'équipement. Il est à souligner que la grandeur de la valeur de la masse volumique sèche maximale est affectée par la densité des particules composant le matériau.

Dans le domaine des enrobés, la notion d'ouvrabilité fait directement référence à la teneur en vides en relation avec l'énergie de compactage déployée. La teneur en vides est égale à 100% moins la compacité (%). La compacité (%) est égale à la masse volumique de l'enrobé mesurée en chantier à l'aide d'un nucléodensimètre sur sa masse volumique maximale. La masse volumique maximale s'obtient en multipliant la densité maximale (Dmm) par la masse volumique de l'eau à 25°C (997,044 kg/m^3). Plus particulièrement, l'ouvrabilité d'un enrobé peut être quantifiée par la mesure de la variation de la teneur en vides (ΔV_i) en relation avec l'énergie de compaction déployée. Par exemple, lors de l'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG), la mesure du ΔV_i peut être calculée entre 10 et 200 girations. Par conséquent, plus l'enrobé a un ΔV_i grand en cours de compactage, plus cet enrobé détient une bonne ouvrabilité.

Par ailleurs, la capacité sous charge de la masse granulaire se rapporte à la résistance à l'orniérage. En effet, sous une sollicitation, c'est le squelette granulaire de l'enrobé qui reprend la quasi-totalité de la charge. Cette charge est reprise par l'entremise des points

de contact entre les particules et plus particulièrement par la friction entre les particules à ces points de contact. Si le niveau de sollicitation est supérieur à la friction intergranulaire, il y aura mobilisation des particules jusqu'à une restructuration permettant de résister à la charge en place. Dans le cas d'un sol gorgé d'eau ou d'un enrobé ayant une quantité considérable de bitume, il est très probable que la restructuration constante des particules ne permette pas d'obtenir une friction suffisante, cela se traduit par un éternel fluage.

Dans la définition de capacité sous charge, un nouvel aspect est à prendre en considération : la notion des points de contact entre les particules. La quantité de points de contact présents dans un granulat est tout simplement proportionnel à sa valeur du VAM. Pour une pierre nette de calibre 10-14mm possédant un VAM élevé, il est clair que les points de contact, ici peu nombreux, se feront entre les particules grossières et sous charge, le fluage de la structure granulaire est très probable. En combinant deux pierres nettes de calibre 5-10 et 10-14, le VAM du combiné granulaire diminue et les points de contact sont plus nombreux car ils se font entre les particules de différents diamètres. En définitive, la reprise d'une charge par une structure granulaire se fait par l'entremise des points de contact entre les particules.

1.2.3.3.1 Granulat présentant une granulométrie uniforme

Lorsqu'un matériau est composé de particules ayant à peu près toutes la même dimension, il est caractérisé par une granulométrie uniforme ou serrée. La courbe granulométrique d'un granulat présentant une granulométrie uniforme est plutôt verticale ou tout au moins peu inclinée (figure 6 : courbe b)). Ce granulat présente peu d'intérêt pour les bétons de ciment et les enrobés bitumineux parce qu'il a une faible stabilité sous charge, une faible ouvrabilité et nécessite beaucoup trop de liant pour combler les vides, ce qui représente une augmentation considérable du coût du matériau.

Un granulat possédant une telle granulométrie ne sera toutefois pas sujet au phénomène de ségrégation (séparation naturelle ou accidentelle des particules fines et grossières).

Vides intergranulaires (VAM) – Un granulat de distribution uniforme mis en place est très perméable parce qu’il présente un volume de vides intergranulaires (VAM) élevé. Par exemple, l’empilement de billes de même dimension, représentant un granulat uniforme, dans un milieu illimité et ce, selon différents arrangements (motifs), sera caractérisé par un VAM (porosité) qui varie de 26 à 48% (tableau III). En définitive, d’une part, le VAM est toujours élevé (>26%) et, d’autre part, il est fortement tributaire de l’arrangement entre les grains (de 26 à 48%). Ce VAM du granulat est quasi indépendant du diamètre des billes monodimensionnelles; cela implique que le VAM d’un granulat fin uniforme est, à toute fin pratique, la même que celle d’un gros granulat uniforme.

Ainsi, le VAM d’un système constitué de billes monodimensionnelles sera toujours supérieure à 26%, quel qu’en soit l’arrangement des particules.

Tableau III

VAM théorique de motifs constitués d’empilements réguliers de sphères unidimensionnelles

Couche de base	Couche carrée	Couche carrée	Couche carrée	Couche hexagonale	Couche hexagonale	Couche hexagonale
Motif	Cubique	Orthorhombique	Rhomboédrique	Orthorhombique	Sphénoédrique	Rhomboédrique
Porosité algébrique	$1 - \pi/6$	$1 - \pi/3\sqrt{3}$	$1 - \pi/3\sqrt{2}$	$1 - \pi/3\sqrt{3}$	$1 - 2\pi/9$	$1 - \pi/3\sqrt{2}$
Porosité calculée	47,64%	39,54%	25,95%	39,54%	30,19%	25,95%

(Source : Perraton, 2000)

Ouvrabilité – Ce granulat à granulométrie uniforme constitue en soit de la pierre nette. Il s'écoule très facilement lors de la pose, il nécessite très peu d'énergie de compaction pour se placer et *atteindre son degré de compaction maximal* en raison de sa granulométrie. Par ailleurs, il faut également très peu d'énergie pour le déplacer.

En considérant la notion d'ouvrabilité pour un enrobé, un granulat à granulométrie uniforme est classé comme étant très peu ouvrable, car il présente énormément de vides après sa mise en place et une variation de vides très faible en cours de compaction, et ce, même s'il a nécessité très peu d'énergie de compaction pour se placer et atteindre son degré maximal de compaction.

Capacité sous charge – Un granulat présentant une granularité uniforme possède : 1) très peu de points de contact entre les particules, ce qui minimise l'angle de frottement interne et par conséquent, sa stabilité sous charge et 2) une piètre ouvrabilité, c'est-à-dire que l'évolution des vides en cours de compactage est faible.

1.2.3.3.2 Granulat à granulométrie étalée continue

Un granulat caractérisé par une granulométrie étalée (continue) sera composé de particules de dimensions variables. Sa courbe granulométrique est inclinée et recoupe une plus grande gamme de diamètres de particules, et elle ne présente pas de palier. Ce granulat présentera un grand intérêt pour les fondations, les bétons de ciment et les enrobés bitumineux parce qu'il présente une bonne stabilité sous charge, une bonne ouvrabilité et nécessitera moins de liant pour combler les vides (plus économique).

Vides intergranulaires (VAM) – Un granulat à granulométrie étalée (continue) permet d'obtenir un matériau plus dense avec un volume de vides intergranulaires (VAM) plus faible en raison d'un arrangement plus compact des particules. Plus un granulat possède

une diversité élevée de tailles de particules (D_{max}/D_{min}), plus ce granulat atteindra une valeur faible du VAM (compacité élevée), sans toutefois atteindre la barre du 0%.

Dans le cas des bétons de ciment, il est capital de savoir quelle proportion de chaque dimension de particules il faut avoir pour minimiser le VAM afin d'obtenir la meilleure résistance en compression et la meilleure durabilité possible. Toutefois, il faut faire un compromis afin d'assurer une ouvrabilité optimale (limiter la présence de défauts, tels que les nids d'abeilles).

Ouvrabilité – En relation avec la notion d'ouvrabilité pour les enrobés bitumineux, la diminution du VAM en raison de l'arrangement des particules permettra d'obtenir un taux de compaction plus élevé donnant lieu à une meilleure ouvrabilité. En dépit du fait qu'un enrobé constitué d'un tel granulat permet d'atteindre un haut taux de compaction, l'énergie de compactage reste proportionnelle à la rugosité offerte par les particules : forme et texture de surface. Évidemment, un enrobé constitué d'un granulat avec des particules rugueuses ou anguleuses exige plus d'énergie de compactage qu'un enrobé constitué d'un granulat avec des particules lisses ou arrondies et ce, même si leur granularité demeure semblable.

Capacité sous charge – Un enrobé constitué à partir d'un granulat à granulométrie étalée (continue) sera plus compact pour une énergie de compactage donnée et plus stable vis-à-vis l'orniérage. Ce gain est associé au nombre de points de contact présents entre chacune des particules et sera d'autant plus significatif lorsque la texture et la forme des particules sont excellentes. Plus il y a de points de contact entre les particules, meilleure est la dissipation des charges, diminuant ainsi le fluage du matériau.

1.2.3.3.3 Granulat à granulométrie étalée discontinue

L'utilisation des diverses combinaisons granulaires peut être effectuée afin d'obtenir des enrobés présentant des caractéristiques bien spécifiques.

Notamment, dans le cas des enrobés à matrice de pierre "Stone Matrix Asphalt (SMA)", la masse granulaire est constituée d'une granulométrie discontinue permettant de maximiser le contenu en bitume et la fraction de gros granulat (Tremblay, 2001). Cette configuration granulaire produit un squelette possédant une fraction importante de particules grossières, interaction pierre sur pierre, laquelle est relativement stable dans le cas de particules anguleuses liées par un mastic riche en bitume (Tremblay, 2001). Dans l'enrobé SMA, la teneur en bitume élevée nécessite un bon dosage en filler et l'usage d'agent stabilisant permettant de rigidifier le liant et de réduire le risque de ressuage.

Vides intergranulaires (VAM) – Un enrobé constitué à partir d'un granulat à granulométrie (étalée) discontinue présente un VAM plus faible qu'un enrobé constitué d'un granulat à granulométrie uniforme, mais plus élevé qu'un enrobé confectionné à partir d'un granulat à granulométrie étalée (continue). Ce type de granulométrie permet d'ajouter une grande quantité de mastic.

Ouvrabilité – Évidemment, l'ouvrabilité d'un enrobé constitué d'un granulat à granulométrie (étalée) discontinue est plus grande que celle d'un enrobé constitué d'un granulat à granulométrie uniforme. Selon les principes d'ouvrabilité exposés auparavant, l'ouvrabilité d'un enrobé avec un granulat à granulométrie (étalée) discontinue devrait être plus faible que celle d'un enrobé avec un granulat à granulométrie étalée (continue) en raison de sa teneur en vides plus élevée. Cependant, la haute teneur en bitume de l'enrobé constitué d'un granulat à granulométrie étalée discontinue permet partiellement la baisse de son ouvrabilité comparativement à l'enrobé composé d'un granulat à granulométrie étalée continue.

Actuellement, en France, les enrobés à granulométrie (étalée) discontinue sont de plus en plus utilisés pour remplacer les enrobés à granulométrie continue et ce, particulièrement pour les enrobés utilisés en couche mince (Herschkorn, 1985). Ces enrobés présentent une meilleure ouvrabilité et permettent d'améliorer la macro-texture de surface augmentant ainsi la résistance au dérapage à haute vitesse (AIPCR, 1995).

Capacité sous charge – Les enrobés SMA utilisés en couche de roulement présentent une grande résistance à l'orniérage tout en étant soumis à des trafics élevés ou lourds (Tremblay, 2001). Cette grande résistance sous charge peut s'expliquer du fait que le transfert des charges se fait par l'entremise des grosses particules, dont les caractéristiques intrinsèques et de fabrication se doivent d'être excellentes. La raison principale de la teneur élevée en bitume dans la matrice (bitume, filler et fines) s'explique par le fait que le bitume ne joue pas de rôle significatif dans la reprise des charges vu la haute résistance au frottement interne de la fraction granulaire. Par conséquent, pour obtenir un faible pourcentage de vides dans l'enrobé, une teneur élevée en bitume s'avère nécessaire. Une condition essentielle pour l'optimisation du comportement à l'orniérage par fluage des enrobés SMA est d'éviter que le mastic ne remplisse totalement les vides du squelette pierreux. En dépit du fait que la teneur en bitume des enrobés SMA soit élevée, la haute teneur en pierre diminue la susceptibilité à la température de la résistance à l'orniérage par fluage (AIPCR, 1995).

Toutefois, toutes choses étant égales, les enrobés à granulométrie (étalée) discontinue possèdent une résistance à l'orniérage plus faible que les enrobés semi-grenus ayant une granulométrie étalée (AIPCR, 1995).

1.2.3.4 Relation de Fuller et Thompson

Certains modèles permettent de calculer une combinaison optimale en fixant la proportion de chaque groupe de particule afin d'obtenir un mélange granulaire possédant

un minimum de VAM (Fuller/Thompson et tamis à la puissance 0.45). Toute autre combinaison granulaire de cette combinaison optimale va donner lieu à une augmentation du VAM et accroître ainsi la teneur en vides interstitiels (V_i) et la quantité minimale de bitume.

De 1901 à 1906, Fuller et Thompson ont travaillé, sur une base volumétrique, à la détermination de granulométries optimales permettant d'obtenir une masse volumique maximale ou un minimum de VAM pour un béton de ciment. Les principaux éléments de conclusion de leurs recherches se résument comme suit :

- 1- Plus la dimension maximale des particules est élevée, plus le squelette granulaire sera compact. En terme plus explicite, l'agencement de particules concises dans un volume défini d'une particule plus grossière ne pourra jamais être aussi dense que la particule elle-même.
- 2- Sous des conditions similaires de compaction, plus les particules des granulats sont arrondies, plus le béton est dense.
- 3- La meilleure granulométrie trouvée pour le mélange de ciment Portland et de granulats suit une courbe qui ressemble à une parabole. Cette parabole est une combinaison d'une ellipse pour la portion sable et d'une droite pour la portion de gros granulats.
- 4- La courbe idéale est légèrement différente pour diverses tailles de granulats. La forme de la courbe est semblable pour les diverses dimensions de granulats qui sont composés de la même pierre; ainsi la meilleure courbe pour diverses grosseurs maximales peut être décrite par une unique équation dans laquelle le diamètre maximal est la seule variable.

Pendant plusieurs années, les principes énoncés par Fuller et Thompson ont été largement utilisés par les entreprises et ce, aussi bien pour les bétons de ciment que pour les enrobés bitumineux.

1.2.3.5 Tamis à la puissance 0,45

En 1943, Nijboer étudia comme Fuller l'aspect granulométrique dans le but d'arriver à la courbe de masse volumique maximale (CMVM). Nijboer décida alors de tracer sur graphique selon des échelles logarithmiques, les pourcentages passant du granulat et les tamis en microns. Les granulométries qui présentaient le minimum de VAM, celles trouvées par Fuller et Thompson, pouvaient être représentées par une ligne droite sur le graphique. Malgré le fait que c'était de la pierre concassée ou du gravier naturel qui était utilisé, la granulométrie ayant le minimum de VAM représentait une droite avec une pente de 0,45.

Goode et Lufsey (1962) ont également travaillé à développer une procédure générale pour obtenir les CMVM. En supposant que la courbe de masse volumique maximale représentait une droite de pente 0,45, ils ont montré que celle-ci pouvait être représentée par l'équation suivante :

$$P = (d / D)^{0,45} * 100 \quad (\text{éq. 1.1})$$

- où
- P : pourcentage passant au tamis "d";
 - d : ouverture du tamis pour lequel on veut connaître la valeur de P;
 - D : Dimension de grosseur maximale du matériau granulaire.

1.2.3.6 Représentation graphique de la courbe de masse volumique maximale (CMVM)

Afin d'obtenir une représentation graphique simple, les pourcentages passant du combiné granulaire sont tracés en ordonnée selon une échelle arithmétique et, en abscisse, la taille des tamis exprimée en micromètre élevée à l'exposant 0,45. Cette façon d'exprimer les distributions granulométriques a pour avantage de faire en sorte que la CMVM prend la forme d'une droite (figure 7). Cette représentation graphique de la granulométrie est utilisée dans la méthode Superpave et par quelques organismes (Langlois et coll., 2001).

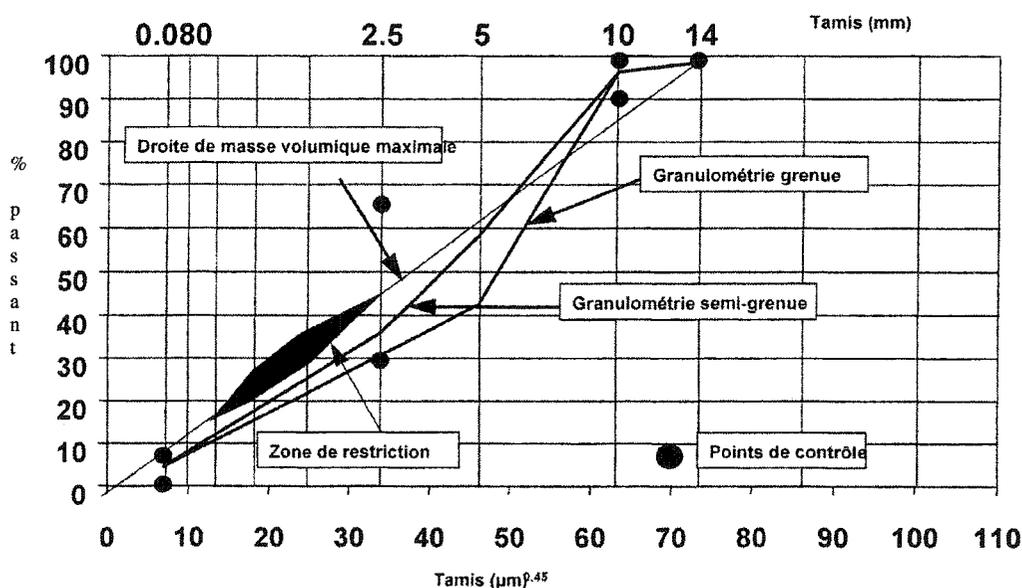


Figure 7 Représentation de la courbe de masse volumique maximale et exigences proposées pour le calibre de 10mm

Les exigences présentées à la figure 7 s'appliquent pour un enrobé de calibre 10mm, ce qui comprend les enrobés ESG-10, EG-10 et EGA-10 de la norme 4202 du MTQ. Le tamis de 10mm constitue la dimension de grosseur nominale maximale du granulat. La CMVM représentée par la droite relie l'origine (point 0,0) à la valeur de 100% passant

au tamis de dimension de grosseur maximale, la valeur "D", représenté ici par le tamis de 14mm.

Il est important de spécifier que la *dimension de grosseur nominale maximale* (GNM) représente la dimension du plus petit tamis de la série normalisée (tableau 2101-1 de la norme 2101) qui est supérieure au premier tamis ayant un pourcentage retenu plus grand que 10%.

D'autre part, la *dimension de grosseur maximale*, la valeur "D", est la dimension du tamis de la série normalisée correspondant au tamis de rang supérieur à celui de dimension de grosseur nominale maximale.

Les pourcentages passant respectifs de chaque dimension de particules représentant la CMVM peuvent être calculés à partir de l'équation 1.1 ou extrapolé à partir de la droite représentant la masse volumique maximale correspondante.

Cette représentation graphique permet de mieux visualiser l'écart entre une granulométrie donnée et celle de la CMVM, et de donner *un ordre de grandeur de la teneur en VAM*. Ce dernier point sera traité en détails dans l'analyse de nos résultats.

1.2.3.7 Rôle du VAM dans le couple ouvrabilité-ornièreage

Jusqu'à présent, la section 1.2.3 portant sur les granulats a présenté l'influence des diverses granulométries sur le VAM, l'ouvrabilité et la capacité sous charge (couple ouvrabilité-ornièreage). Par ailleurs, il est très important de mentionner que c'est le changement du VAM qui influence directement le couple ouvrabilité-ornièreage. L'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage des enrobés sont inversement proportionnels à la teneur en VAM et ce, dans la mesure où la teneur en vides et le VCB soient adéquats.

Les sections subséquentes présentent divers facteurs influençant le VAM, par conséquent, le couple ouvrabilité-ornièreage.

1.2.3.7.1 Influence de la granulométrie sur le VAM, évaluée à l'aide de la CMVM

La granulométrie des granulats a une très grande influence sur les propriétés des enrobés bitumineux. Avant l'incorporation du bitume, la CMVM peut être utilisée pour estimer plusieurs propriétés de l'enrobé et fait partie du procédé actuel d'élaboration des enrobés. La CMVM donne quelques lignes directrices sur la teneur en VAM de l'enrobé. En général, *un granulat ayant une granulométrie sur la CMVM*, particulièrement pour la fraction fine (< 5mm), *possède peu de VAM* comparativement au même granulat possédant une granulométrie en dessous ou au-dessus de la CMVM. L'enrobé qui présente une granulométrie près de la CMVM laisse moins d'espace pour introduire le liant, il est ainsi plus susceptible au désenrobage et à l'arrachement.

Courbe granulométrique se trouvant en dessous de la CMVM – Une courbe granulométrique qui se trouve en dessous de la CMVM sera caractérisée par une distribution granulométrique plus grossière. Pour une telle distribution granulométrique, les grosses particules sont présentes en grand nombre et elles sont peu influencées par la présence des plus petites, lesquelles vont remplir une partie des vides laissés par les plus grosses : effet de remplissage sans desserrement. Une telle courbe granulométrique a un VAM plus élevé que celle correspondant à la CMVM car les fines particules ne remplissent pas tous les vides laissés par les plus grosses. De ce fait, sous l'action d'une sollicitation appliquée, le transfert de charge se fait en grande partie par l'entremise des contacts entre les grosses particules, il faut dans ce cas mettre l'accent sur la qualité de ces grosses particules.

Les enrobés ayant une telle granulométrie sont habituellement plus difficiles à compacter et plus résistants à l'orniérage que les enrobés ayant une courbe

granulométrique au-dessus de la CMVM (AASHTO, 1991). Cela s'explique par leur plus faible V_{be} requis afin d'assurer leur durabilité. Le V_{be} requis est proportionnel à la surface spécifique du combiné granulaire. Étant résistant à l'orniérage, ces enrobés pourront être avantageusement utilisés où il y a beaucoup de trafic lourd : autoroutes, nationales ou boulevards urbains.

Courbe granulométrique se trouvant au-dessus de la CMVM – La courbe granulométrique se trouvant au-dessus de la CMVM sera caractérisée par une distribution granulométrique plus fine. Pour cette distribution granulométrique, les particules fines vont remplir les vides entre les particules grossières et même les écarter, produisant un desserrement, car elles sont ici nettement en plus grand nombre. En d'autres termes, les particules grossières baignent dans un ensemble de particules fines et la substitution des grosses (de la granulométrie optimale) par des fines se manifeste par une augmentation de vides puisque l'agencement de particules ne pourra jamais être aussi dense que la particule elle-même. Cette courbe granulométrique a donc un VAM plus élevé que celui de la CMVM car les fines particules créent des vides. De ce fait, sous l'action d'une sollicitation appliquée, le transfert de charge se fait maintenant en plus grande partie par l'entremise des contacts entre les plus petites particules. Pour ces enrobés, il faut mettre la priorité sur la qualité des particules composant la fraction fine.

Les enrobés ayant ce type de granulométrie sont plus maniables et faciles à compacter que les enrobés ayant une courbe granulométrique sous la CMVM (AASHTO, 1991). Ce comportement s'explique par le V_{be} requis plus élevé (relié à la durabilité) en raison de leur surface spécifique plus grande. Ces enrobés pourront être utilisés efficacement où il y a moins de trafic : rues résidentielles ou boulevards ayant peu de poids lourds où autrement, une attention particulière devra être portée sur le choix d'un bitume plus performant. Le choix de ce type d'enrobé dans les rues résidentielles ou les boulevards est approprié car il présente une texture de surface bien fermée.

1.2.3.7.1.1 Granulométrie croisant la CMVM

Il semble que tous les enrobés ayant une distribution granulaire qui croise la CMVM et dont la pente est très prononcée à cet endroit sont habituellement plus tendres et moins résistants à l'orniérage que ceux qui ont une granulométrie continue de part et d'autre de la courbe (AASHTO, 1991). Cet énoncé semble de prime abord difficile à comprendre lorsque l'on pense aux enrobés SMA. Une pente très prononcée signifie qu'il y a une importante quantité de particules passant un tamis spécifique. En fait tout dépend de quelle fraction de la masse granulaire présente une pente prononcée. Une chose est clair, dans le cas où la distribution granulaire présente une pente très prononcée, il est probable que les points de contact auront lieu, en grande partie, entre ces particules de même diamètre, car elles sont présentes en grand nombre (Langlois, 2002).

Granulométrie croisant la CMVM dans la portion fine : enrobés tendres – Goode et Lufsey (1962) ont montré qu'un enrobé qui présente une pente très prononcée dans leur courbe granulométrique (fraction granulaire importante sur un tamis) et qui traverse la CMVM dans la portion fine, près du tamis de 630 μ m, est souvent trop tendre, peu stable, pour être compacté (figure 8). De tels enrobés peuvent atteindre facilement en laboratoire la compacité désirée. Cependant, ces enrobés peuvent s'avérer difficiles à compacter en chantier : compaction trop faible; ce type d'enrobé est normalement tendre et tend à cocher et à se déplacer sous l'équipement de compaction. Par ailleurs, au Québec, avant les années 80, ces enrobés étaient constitués à partir d'une portion importante de fines, telle qu'un sable naturel (forme arrondie), ce qui peut expliquer leur faible résistance à l'orniérage.

Plusieurs autres causes sont citées dans le rapport no.168 (IS-168) de l'Asphalt Institute (1977) "Tender mixes : The causes and prevention" pour expliquer la piètre performance des enrobés tendres. Deux aspects relatifs à la granulométrie de l'enrobé retiennent notre

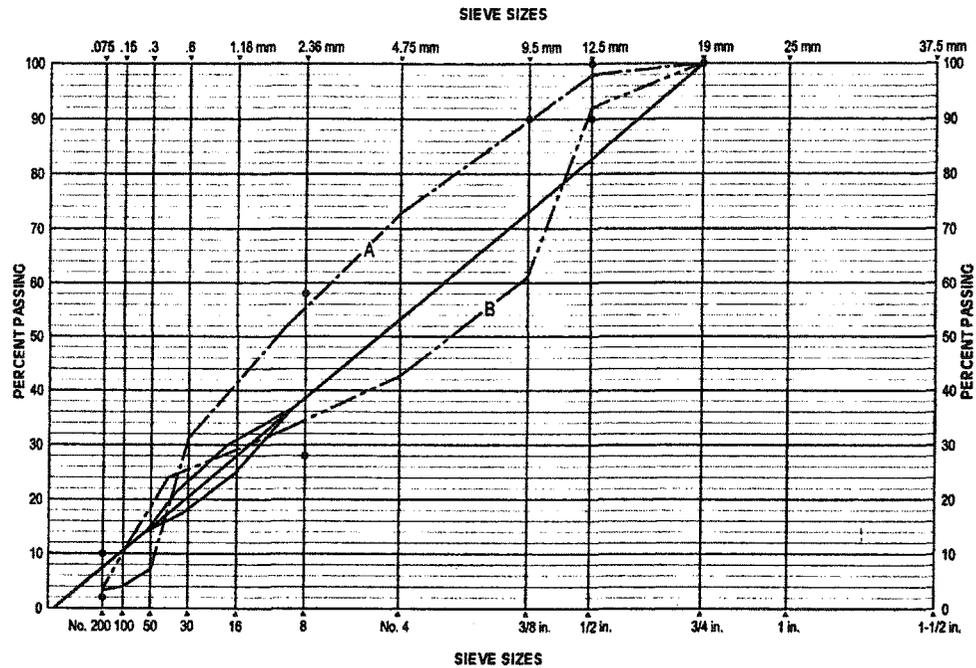


Figure 8 Exemples de granulométrie qui produit des enrobés tendres

attention : 1) la proportion faible de particules passant le tamis de 80 μ m et 2) l'excès de particules de sable passant le tamis de 4,75mm.

1) Les particules passant le tamis de 80 μ m et le bitume contribuent largement à la cohésion de l'enrobé. Une bonne cohésion contribue au comportement élastique et à la résistance au cisaillement de l'enrobé. En plus, la quantité et la distribution granulométrique de ces particules ont un impact additionnel sur la cohésion.

2) Un excès de particules de sable (forme arrondie) passant le tamis de 4,75mm et causant la formation d'un saut dans la portion fine de la distribution granulaire expliquerait la rhéologie des mélanges tendres. Les études démontrent que s'il y a une déviation de plus de 3% au-dessus de la ligne qu'on trace de l'origine de la CMVM jusqu'au pourcentage passant au tamis de 4,75mm, il est très probable que l'enrobé soit

tendre (Asphalt Institute, 1995). Cette vérification n'est pas faite pour les enrobés ayant des particules hautement concassées ou ayant une surface superficielle rugueuse. Il est à souligner que la granulométrie seule ne cause pas en soi des mélanges tendres.

En définitive, certaines études ont montré que les enrobés "tendres" avaient un taux élevé de VAM et présentaient une baisse importante de la stabilité à l'essai Marshall comparativement aux enrobés qui avait une granulométrie ne croisant pas la CMVM. Le taux élevé en VAM de ces enrobés peut expliquer en grande partie leur mauvaise ouvrabilité en chantier et leur faiblesse vis-à-vis l'orniérage.

En tenant compte des études de Goode et Lufsey (1962), et de bien d'autres, une zone de restriction dans la portion fine du combiné granulaire a été définie sur la CMVM (figure 7). Cette zone a été définie pour deux raisons : 1) pour limiter l'ajout considérable de sable naturel qui cause un saut dans la courbe granulométrique du combiné; et 2) pour éliminer les granulométries qui arriveraient sur la CMVM et qui produiraient des enrobés ayant peu de VAM (Hand et Epps, 2001). Ces deux aspects tentent de limiter l'obtention d'enrobés possiblement tendres et ayant une faible résistance à l'orniérage.

Cependant, des études (Hand et Epps, 2001; Chowdhury et coll., 2001; Kandhal et Mallick, 2001) visant à évaluer l'impact de la zone de restriction vis-à-vis la performance à l'orniérage ont montré qu'il n'y a pas de lien direct entre le non-respect de la zone et le comportement à l'orniérage des enrobés. Il faut bien noter que la zone de restriction a été élaborée en premier lieu pour limiter l'ajout important de sable naturel et éliminer les enrobés ayant un faible VAM : cette exigence ne doit surtout pas être considérée comme exclusive.

1.2.3.7.2 Influence du pourcentage de particules passant le tamis de 80 μ m sur le VAM

La quantité de particules passant le tamis de 80 μ m, le filler, peut avoir un effet variable sur le VAM. Les études en laboratoire montrent que le pourcentage de VAM diminue au fur et à mesure de l'addition du filler dans un enrobé jusqu'à atteindre une valeur optimale au delà de laquelle l'ajout de filler fait augmenter le VAM (McLeod, 1957).

Initialement, l'incorporation de filler fait en sorte que les vides sont progressivement remplis, cet abaissement du VAM se traduit par une augmentation de l'ouvrabilité. S'il y a un excès de filler, les particules en excès pousseront sur les autres particules de part et d'autre (effet de desserrement) et feront décroître le contact entre les particules et altèrera l'aptitude au compactage de l'enrobé en raison de l'augmentation du VAM (Trépanier, 1990 et l'AASHTO, 1991). Cet excès de filler conduit à un accroissement de la rigidité du bitume et de l'enrobé. Pour la plupart des enrobés, la quantité de particules passant le tamis de 80 μ m est habituellement entre 3 et 6%. Par ailleurs, les enrobés qui contiennent un pourcentage élevé de filler n'auront pas un VAM suffisamment élevé.

Le choix d'ajouter du filler, au-delà de la quantité critique qui donne le minimum de VAM, comme une méthode pour hausser les VAM d'un enrobé, n'est pas adéquat, car ces enrobés auront besoin d'une plus grande quantité de bitume en raison de la hausse de la surface spécifique (Trépanier, 1990).

Selon Paradis et Bérubé (1997), il semble préférable d'utiliser un filler (filler d'appoint) de même composition minéralogique que la fraction sable afin d'obtenir une meilleure résistance à l'orniérage.

Distribution granulométrique des particules passant le tamis de 80 μ m – Ce n'est pas seulement la quantité de particules passant le tamis de 80 μ m (filler) qui a un effet

significatif sur l'ouvrabilité, mais également sa distribution granulométrique. Si la majorité du filler est relativement grossière ($> 40\mu\text{m}$), la plupart de ce matériel va remplir les vides laissés par les plus grosses particules et faire décroître les vides de l'enrobé et modifier la teneur optimale en bitume (AASHTO, 1991). Si, cependant, le filler est ultra fin (une importante portion des particules est plus fine que $20\mu\text{m}$, avec une partie entre 2 et $5\mu\text{m}$), ce matériel peut jouer un rôle important sur l'accroissement du volume de bitume et peut devenir une partie du FBE qui entoure les particules (AASHTO, 1991). Plus le filler est fin, plus l'effet sur l'ouvrabilité de l'enrobé est grand. Maupin (1981) considère que les particules inférieures à $10\mu\text{m}$ entrent dans la composition du FBE. En définitive, tout dépend de l'épaisseur du FBE : toutes les particules plus fines que l'épaisseur du film entreront dans celui-ci sans toucher les plus grosses particules; toutes les particules plus grosses que l'épaisseur du FBE prendront part dans la structure minérale et vont contribuer aux contacts entre les particules (Puzinauskas, 1983).

Rapport massique filler/bitume – Le mélange filler/bitume, le mastic, représente la portion de l'enrobé qui peut jouer un rôle majeur sur la rhéologie de l'enrobé aux températures élevées. Pour assurer une bonne durabilité de l'enrobé face à l'orniérage, le mastic doit présenter une cohésion suffisante à haute température (Trépanier, 1990).

L'augmentation de la fraction de filler dans le couple mastic a pour effet de diminuer l'épaisseur du FBE, augmentant ainsi la rigidité de l'enrobé, et d'accroître sa stabilité sous charge (Chomton et Valyer, 1972; O.C.D.E., 1975; McLeod, 1987). La teneur en filler dans le mastic, exprimée par le rapport de la masse de filler à celle du bitume, est souvent près de 1 et peut être portée à 2. Dans ce dernier cas, la résistance à l'eau de l'enrobé peut s'avérer critique. Une valeur intermédiaire intéressante est de l'ordre de 1,2 (O.C.D.E., 1975). Notamment, le "Federal Highway Administration" recommande que les enrobés soumis à des trafics élevés doivent présenter un rapport massique filler/bitume compris entre 0,6 et 1,2 (Asphalt Institute, 1995). Il est bon de souligner

qu'une haute teneur en filler affectera l'ouvrabilité de l'enrobé, lequel devient plus gommeux et ainsi plus difficile à compacter (Asphalt Institute, 1998).

1.2.3.7.3 Effet de la forme des particules sur le VAM

Même si la granulométrie des différents granulats utilisés pour la confection d'un enrobé est la même, un enrobé constitué à partir de particules arrondies aura toujours un VAM plus faible qu'un enrobé constitué de particules angulaires. Bien que l'utilisation de granulats ronds donne plus d'ouvrabilité à l'enrobé, facilitant ainsi sa mise en œuvre et sa compaction, leur utilisation peut s'avérer critique vis-à-vis la résistance à l'orniérage. Par opposition, plus les granulats sont anguleux, plus la mise en œuvre doit être précise, plus l'énergie nécessaire au compactage est grande et moins l'enrobé sera susceptible à l'orniérage (Langlois et coll., 2001). Les profondeurs d'ornières ont tendance à diminuer si la forme des particules n'est pas sphérique ou cubique (Paradis et Bérubé, 1997).

Finalement, il est important de souligner que les propriétés des particules fines ont généralement un plus grand effet sur la teneur en VAM et sur la stabilité à l'orniérage de l'enrobé que les propriétés des particules grossières (AASHTO, 1991; McLeod et McLean, 1974).

1.2.3.7.4 Effet de la texture de surface des particules sur le VAM

La texture superficielle d'une particule peut être définie comme étant rugueuse ou lisse. La texture de surface d'une particule est fortement tributaire de la taille des grains qui la composent; la texture superficielle issue de la fracture d'une particule constituée d'une structure minérale à grains fins sera lisse alors qu'elle sera rugueuse dans le cas de la cassure d'une particule constituée d'une structure minérale à grains grossiers (Perraton, 2000).

Tout comme pour le cas de la forme, la texture des particules va influencer directement l'agencement du squelette granulaire et jouer sur le VAM. Toutes choses étant égales, un enrobé constitué de particules ayant une texture de surface rugueuse aura un VAM plus élevé, sera plus difficile à compacter tout en étant plus résistant à l'orniérage qu'un enrobé constitué avec des particules lisses. Griffith et Kallas (1957) ont trouvé que l'augmentation de la rugosité de la texture superficielle des granulats fins accroissait la stabilité Marshall des enrobés à la teneur optimale en bitume. L'accroissement de la rugosité de la fraction fine des granulats augmentait le VAM et la teneur optimale en bitume.

Finalement, l'utilisation de granulats fins angulaires et rugueux permet de "coincer" le squelette granulaire et d'en empêcher les mouvements relatifs des particules sous l'action du trafic (Langlois et coll., 2001). La texture de surface joue donc un rôle important sur la qualité des points de contact entre les particules.

1.2.3.7.5 Effet de la dimension maximale des particules sur le VAM

Le VAM de l'assemblage de sphères dépend du rapport entre le diamètre maximal et le diamètre minimal des particules : D_{max} / D_{min} (Aïtcin, Jolicoeur et Mercier, 1992). Plus la dimension maximale d'un agencement granulaire est élevée, plus ce dernier sera compact. Toutefois, la dimension maximale du gros granulat est limitée par les conditions d'utilisation, dont notamment l'épaisseur de la couche d'enrobé. L'utilisation de particules trop grossières dans l'enrobé par rapport à l'épaisseur de la couche à mettre en place aura un effet contraire à celui escompté, en donnant lieu à une sous-compaction de l'enrobé. En effet, si la grosseur nominale maximale (GNM) des granulats dépasse la moitié de l'épaisseur de la couche d'enrobé à compacter, la texture de surface peut être affectée et le degré de compaction obtenu pour l'enrobé sera réduit : c'est l'effet de paroi (AASHTO, 1991). Formellement, si l'épaisseur de la couche d'enrobé est suffisante, une augmentation de la dimension maximale des particules se traduit par une diminution

du VAM. Malgré cela, plus l'épaisseur de la couche d'enrobé est élevée, plus il faudra avoir un équipement de compaction lourd afin d'atteindre le taux de compaction recherché.

La grosseur nominale maximale (GNM) du combiné granulaire joue tellement un grand rôle sur le VAM que des normes ont été élaborées en rapport à celui-ci. Notamment, la grandeur de la GNM permet de connaître le VAM minimum qu'il faut avoir pour concevoir un enrobé durable. Il faut bien se rappeler que la valeur du VAM doit être suffisamment élevée afin d'introduire le V_{be} désiré tout en conservant une proportion de vides adéquate dans l'enrobé.

1.2.3.7.6 Évolution des normes relativement au VAM en relation avec la grosseur nominale maximale (GNM)

L'évolution des normes relativement au VAM s'est généralement faite sur la base que l'enrobé contenait en moyenne 4% de vides interstitiels, soit la valeur moyenne de la fourchette de 3 à 5% (Asphalt Institute, 1995; Field, 1978 et McLeod, 1956 et 1971).

En 1956, McLeod suggérait un VAM minimal de 15% peu importe le granulat utilisé. Par la suite, il a été montré que le VAM minimum dépendait du rapport D_{max} / D_{min} et variait en fonction de la GNM du granulat.

Les normes du VAM apparaissent sous deux formes principales :

- 1- dans des tableaux où le VAM à spécifier est donné selon la GNM du granulat (tableaux IV et V);
- 2- sur un graphique log-log du VAM à spécifier en fonction de la GNM du granulat (figure 9).

Tableau IV

Normes du MTQ (cahier des charges et devis généraux, 1986)

Nominal Maximum Particle Size ^{1,2} (GNM)		Minimum VMA, percent		
		Design Air Voids, percent ³		
mm	openings/inches	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

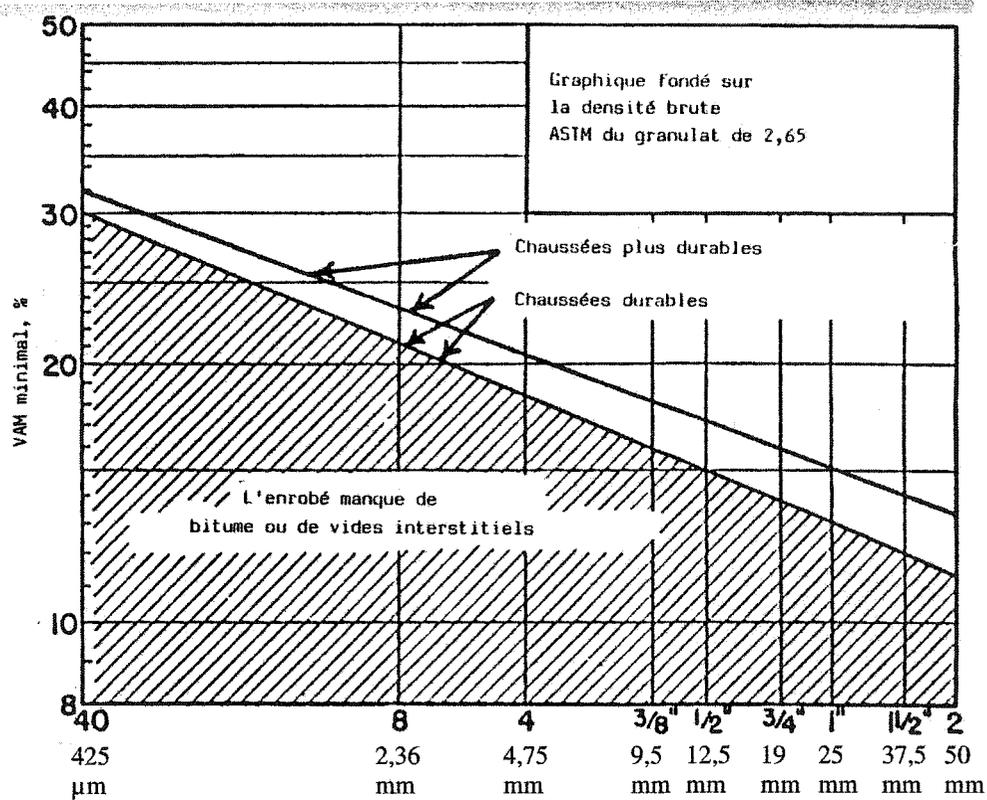
1. Standard Specification for Wire Cloth Sieves for Testing Purposes, ASTM E 11 (AASHTO M 92).
2. The nominal maximum particle size is one size larger than the first sieve to retain more than 10 percent.
3. Interpolate minimum voids in the mineral aggregate (VMA) for design air void values between those listed.

(Source : Table 3.08 de l'Asphalt Institute, 1998)

Tableau V

Relation entre le VAM minimum et la GNM
des enrobés en considérant de 3 à 5% de vides dans l'enrobé

Grosseur nominale maximale mm	VAM minimum %
40	12
25	13
20	14
16	14,5
12,5	15
10	16
5	18



Grossesse nominale maximale du granulat selon le système impérial et le système internationale, tamis avec ouvertures carrées

Figure 9 Relation entre le VAM minimum et la GNM pour des chaussées souples durables en considérant de 3 à 5% de vides (Source : McLeod, 1971)

Quoique la méthode de formulation LC du MTQ ne spécifie que des valeurs de V_{be} et de V_i à obtenir, il est possible de calculer le VAM associé à ces valeurs (tableau VI).

Tableau VI

Valeurs du VAM calculées à partir du Vbe et du Vi spécifiés par la méthode de formulation LC du MTQ

Type d'enrobé	Grosseur nominale maximale "GNM" (mm)	Grosseur maximale "D" (mm)	Vbe exigé (%)	VAM (%) calculé pour une teneur en vides donnée	
				4%	7%
EG-10	10	14	12,4	15,9	18,5
ESG-10	10	14	12,2	15,7	18,3
ESG-14	14	20	11,8	15,3	18

En comparant les exigences du tableau IV et celles du tableau VI, nous constatons que les exigences du MTQ n'ont pas vraiment changé quant au VAM minimum à obtenir. Par ailleurs, le MTQ, comparativement à l'Asphalt Institute, exige un VAM minimum plus grand afin d'y ajouter plus de bitume dans les enrobés et ainsi augmenter leur durabilité. Le MTQ préconise un Vbe donné pour assurer la durabilité des enrobés.

1.2.3.7.7 Synthèse

Le tableau VII présente les facteurs liés au granulat affectant le VAM de l'enrobé et par conséquent, interféreront sur son ouvrabilité et sa résistance à l'orniérage. Ce tableau permet de mieux visualiser les effets de chacun des facteurs traités.

Tableau VII

Facteurs relatifs aux granulats et influençant le VAM et par conséquent, interféreront sur son ouvrabilité et sa résistance à l'orniérage

Facteurs influençant le V_{be} requis, le VAM, l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage		V_{be} requis	VAM	Ouvrabilité	Résistance à l'orniérage	
Granulat	Granulométrie *	Uniforme	↓	↑	↓	
		Étalée	↑	↓	↑	
	Forme	Arrondie	—	↓	↑	↓
		Anguleuse	—	↑	↓	↑
	Texture	Lisse	—	↓	↑	↓
		Rugueuse	—	↑	↓	↑
	Dmax	Élevé	↓	↓	↑ ⁽¹⁾	↑ ⁽²⁾
		Faible	↑	↑	↓	↓
	Surface spécifique	Élevée	↑	↓	↑	↓
		Faible	↓	↑	↓	↑
	Teneur en filler	Élevée	↑	↑	↓	↓
		Optimale	—	—	↑	↑
		Faible	↓	↑	↓	↓
<p>* : Facteur très important quant à l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage des enrobés. ** : Facteur relié à la durabilité des enrobés. (1) : Dans le cas où l'épaisseur de la couche est assez élevée. (2) : Dans le cas d'un enrobé en couche de roulement, l'orniérage d'usure par arrachement des granulats augmente si la grosseur nominale maximale des particules est supérieure à 12mm.</p>						

1.3 Sommaire

Tout au long de la revue de la littérature, les facteurs influençant l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage ont été présentés. À ce stade, il convient d'élaborer une synthèse permettant de classer en ordre d'importance les paramètres caractéristiques jugés des

plus significatifs qui conditionnent le couple ouvrabilité-ornièreage. Ce classement permettra de mieux concevoir un enrobé à la fois ouvrable et résistant à l'ornièrage.

Pour la plupart des enrobés, mais plus précisément pour les enrobés où les particules du combiné granulaire constituent la phase continue et le bitume la phase dispersée, c'est le combiné granulaire qui reprend la quasi-totalité des efforts (il n'y a pas de surdosage en bitume : il ne remplit pas la totalité des vides). Comme ce sont les particules minérales qui constituent la phase continue, la résistance à l'ornièrage et l'aptitude au compactage des enrobés seront influencées, en grande partie, par leurs propriétés. L'aptitude au compactage et la résistance à l'ornièrage de ces enrobés va dépendre essentiellement de cinq paramètres :

- 1- La prédominance des points de contact** – La question suivante peut être avancée : à quel niveau au sein de l'enrobé le transfert de charge se fait-il (points de contact)? Est-ce par l'entremise des particules fines ou par celui des particules grossières? La réponse à cette question n'est pas simple, mais il est clair qu'elle se rapporte à la granulométrie de l'enrobé. Si on cible bien la taille des éléments assurant le transfert de charge, qui est convenu d'appeler "les points de contact", on pourra se concentrer sur les propriétés de ces particules pour optimiser la formulation de l'enrobé. Dans le cas d'un enrobé constitué d'un granulat à granulométrie discontinue (ex. : SMA) la majorité des points de contact se fait par l'entremise des grosses particules.
- 2- La qualité des points de contact** – Cette propriété va dépendre de la forme et de la texture de surface des particules.
- 3- La valeur du VAM** – La valeur du VAM dépend de tous les facteurs présentés dans le tableau VII. Une diminution du VAM se traduit par une augmentation de la résistance à l'ornièrage de l'enrobé et ce, pour une même teneur en vides.

4- La rhéologie du bitume;

5- La quantité de bitume et plus particulièrement les valeurs du Vbe, VCB et du FBE.

Dans le cas où le bitume constitue la phase continue et les particules du combiné granulaire la phase dispersée, la résistance à l'orniérage et l'aptitude au compactage des enrobés dépendent principalement des propriétés du bitume et plus particulièrement, en ordre décroissant d'importance, de : la rhéologie du bitume, la quantité de bitume (Vbe), du FBE qui est affecté par la surface spécifique des particules et du pourcentage volumétrique de particules minérales (inversement proportionnelle au VAM).

CHAPITRE 2

APPROCHE GLOBALE DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Introduction

L'objectif principal de notre programme expérimental est de contribuer à établir une corrélation entre l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage des enrobés bitumineux. Cet objectif est vaste et nécessite, a priori, une étude sur plusieurs familles d'enrobés. En effet, les enrobés bitumineux sont utilisés à diverses fonctions telles que : couche unique (EB-14 et ESG-14), couche de base (EME, EB-20 et EB-14), couche intermédiaire (chape et bicompo-flex), couche de surface (EB-10S, ESG-10, EGA-10, EG-10 et enrobé drainant), de correction (EB-10C et EB-5), de resurfaçage, de construction ou de reconstruction (EB-20, EB-14, EB-10S, EB-10C, ESG-10 et ESG-14).

Il est certain que la relation entre l'ouvrabilité et l'orniérage va être plus ou moins variable pour chaque famille d'enrobés considérée. En effet, il n'y a qu'à penser à l'importance des variations de température qui seront prédominantes dans le cas des enrobés utilisés en couche de surface comparativement à ceux utilisés en couche de base.

Par ailleurs, il est clair que le processus de réflexion qui conduit à établir la relation entre l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage demeure pratiquement le même pour l'ensemble des familles d'enrobés et ce, indépendamment de l'application considérée. Ce processus de réflexion (méthodologie) a été synthétisé à la fin de la revue de la littérature.

2.2 Méthodologie de formulation d'un enrobé sur la base du couple ouvrabilité-ornière

Dans la perspective d'élaborer une méthodologie à suivre pour formuler un enrobé en tenant compte à la fois de son aptitude au compactage et de sa performance à l'orniérage, il est proposé de prendre en considération les cinq critères de design suivants :

- 1- La prédominance des points de contact;
- 2- La qualité des points de contact;
- 3- La valeur du VAM;
- 4- La rhéologie du bitume;
- 5- La quantité de bitume et plus particulièrement les valeurs du Vbe, VCB et du FBE.

L'ordre d'importance pour ces cinq critères de design s'applique pour la plupart des enrobés, mais plus spécifiquement aux enrobés dans lesquels les particules du combiné granulaire constituent la phase continue et le bitume la phase dispersée.

Afin de limiter l'ampleur du travail, il devient judicieux de mettre en relief cette méthodologie à partir d'une famille d'enrobés ciblée.

2.3 Famille d'enrobés ciblée

La séquence des étapes à suivre pour la formulation d'un enrobé en tenant compte du couple ouvrabilité-ornière, sera explorée en laboratoire à partir d'une famille d'enrobés ciblée : les enrobés de resurfaçage. Cette famille d'enrobés a été ciblée puisqu'elle représente une part importante des interventions actuelles au Québec dans le domaine des chaussées. Près de 90% des travaux sont effectués actuellement sur la couche de surface par un resurfaçage. Cela s'explique du fait que la couche de surface

est celle qui se détériore le plus rapidement en raison des cycles de gel-dégel et des sollicitations engendrées par le trafic. Il faut souligner que sous les sollicitations du trafic, la contrainte maximale en compression se présente à la surface du revêtement, donc au niveau de la couche de surface. Pour la réhabilitation de la surface du revêtement, l'utilisation d'un enrobé de faible épaisseur (couche mince) est de mise dans le but de minimiser les coûts. Ceci implique que l'enrobé à cibler devra être facile à mettre en place pour être utilisé en couche mince tout en ayant une bonne performance à l'orniérage.

2.4 Enrobé ciblé au sein de la famille des enrobés utilisés en resurfaçage

Il a été convenu de sélectionner un enrobé dont les particules du combiné granulaire constituent la phase continue et le bitume la phase dispersée. Après mûres réflexions, notre choix s'est arrêté sur l'enrobé EG-10 pour les raisons suivantes : 1) il constitue un enrobé couramment utilisé pour les couches minces de roulement où la circulation est rapide et lourde (autoroutes et nationales); 2) il possède une résistance moyenne à élevée à l'orniérage; 3) il est maniable en raison de sa faible épaisseur lors de la mise en place, application de 40 à 60mm; 4) sa formulation est bien documentée afin d'obtenir des caractéristiques et une ouvrabilité adéquate. Par ailleurs, sa texture grenue permet une meilleure évacuation de l'eau entre le revêtement et les pneumatiques des véhicules, assurant ainsi une plus haute adhérence.

L'enrobé EG-10, conçu selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées (formulation LC) du MTQ, possède les principales caractéristiques suivantes : il est constitué d'au minimum de deux classes granulaires distinctes, il a un Vbe de 12,2% et doit avoir une déformation maximale de 10 et 20% à 1000 et 3000 cycles à l'essai à l'orniéreur. La formulation de l'enrobé EG-10 est sujette à des exigences bien établies, lesquelles sont clairement explicitées dans la norme 4202 du MTQ. Le tableau VIII présente les critères liés à la formulation de l'enrobé EG-10.

Tableau VIII

Caractéristiques des enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées du MTQ

Types d'enrobés	ESG-14	ESG-10	EG-10	EGA-10	Méthodes d'essais
Usages	Couche unique ou couche de surface	Couche de surface	Couche de surface	Couche de surface	
Nombre minimal de classes granulaires distinctes à utiliser ⁽¹⁾	3	2	2	2	
Tamis	(% passant)				
28 mm					
20 mm	100				
14 mm	95-100	100	100	100	
10 mm	70-90	92-100	90-100	90-100	
5 mm	50-65	50-65	40-50	40-50	
* 2,5 mm	39,2	46,1	46,1	46,1	
* 1,25 mm	25,7-31,7	30,7-36,7	30,7-36,7	30,7-36,7	
* 630 µm	19,1-23,1	22,8-26,8	22,8-26,8	22,8-26,8	
* 315 µm	15,4	18,1	18,1	18,1	
160 µm	—	—	—	—	
80 µm	3,0-8,0	4,0-10,0	4,0-10,0	4,0-10,0	
Pourcentage de fibres (% ⁽²⁾)				1,3	
Vbe (% ⁽³⁾)	11,8	12,2	12,4	14,6	
Vides à 10 girations (%)	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	LC 26-003
Vides à 80 girations (%)	—	4,0-7,0	4,0-7,0	4,0-7,0	LC 26-003
Vides à 100 girations (%)	4,0-7,0	—	—	—	LC 26-003
Vides à 200 girations (% ⁽⁴⁾)	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	LC 26-003
Compacité (% min.)	92,0	92,0	92,0	92,0	LC 26-320
Résistance à l'orniérage sur plaques de 100 mm à 60 °C à 30 000 cycles (% max. de déformation) ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	10	—	—	—	
Résistance à l'orniérage sur plaques de 50 mm à 60 °C à 1000 cycles	—	10	10	10	
à 3000 cycles (% max. de déformation) ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	—	20	20	20	
Tenue à l'eau (% min.)	70	70	—	70	LC 26-001

Notes :

1. Au moins 85 % des granulats de l'enrobé à chaud doivent être constitués de classes granulaires qui ne se chevauchent pas. Cependant, une classe granulaire 0/D où D ≤ 5 mm peut être constituée de deux ou de plusieurs classes dont la valeur D peut être différente. La classe prise en considération doit avoir la désignation 0/D, où D est la plus grande valeur de D des classes qui la composent. L'utilisation de deux ou plusieurs classes granulaires de même désignation 0/D est considérée comme étant une seule classe, pour autant que chacune des réserves s'applique individuellement aux conditions des classes granulaires 0/D indiquées dans la norme 2101 «Granulats».
2. Calculé selon le pourcentage de granulats.
3. Pour fin de formulation seulement.

4. Les enrobés à chaud ne doivent pas présenter de ressuage à 200 girations pour l'essai à la presse à cisaillement de même qu'à 10 000 cycles pour l'essai à l'orniérage dans le cas des enrobés de types EG-10, ESG-10 et EGA-10 ou 30 000 cycles dans le cas des enrobés de type ESG-14, et ce, lorsque l'essai de résistance à l'orniérage est exigé.
5. Lorsque l'essai de résistance à l'orniérage est exigé, il est réalisé selon les exigences de la norme AFNOR P 98-253-1 «Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés; Partie 1: Essai d'orniérage», et la préparation des échantillons est réalisée selon les exigences de la norme AFNOR P 98-250-2 «Préparation des mélanges hydro-carbonés; Partie 2: Compactage des plaques».

* Limites recommandées de la zone de restriction.

(Source : Norme 4202, MTQ, 2001)

A noter que la vérification de la tenue à l'eau n'est pas exigée pour les enrobés grenus EG-10, les drainants et les enrobés utilisant des bitumes ayant une recouvrance élastique à 10°C, 20cm, 5cm/min > 60%. Le bitume utilisé pour les enrobés EG-10, un PG 64-34, possède toujours une recouvrance élastique > 60% et une excellente adhérence avec les particules minérales. Le bitume PG 64-34 est généralement constitué de polymères.

La figure 10 illustre la courbe de masse volumique maximale pour l'enrobé EG-10 ciblé dans le cadre du programme expérimental et les exigences quant à sa granulométrie.

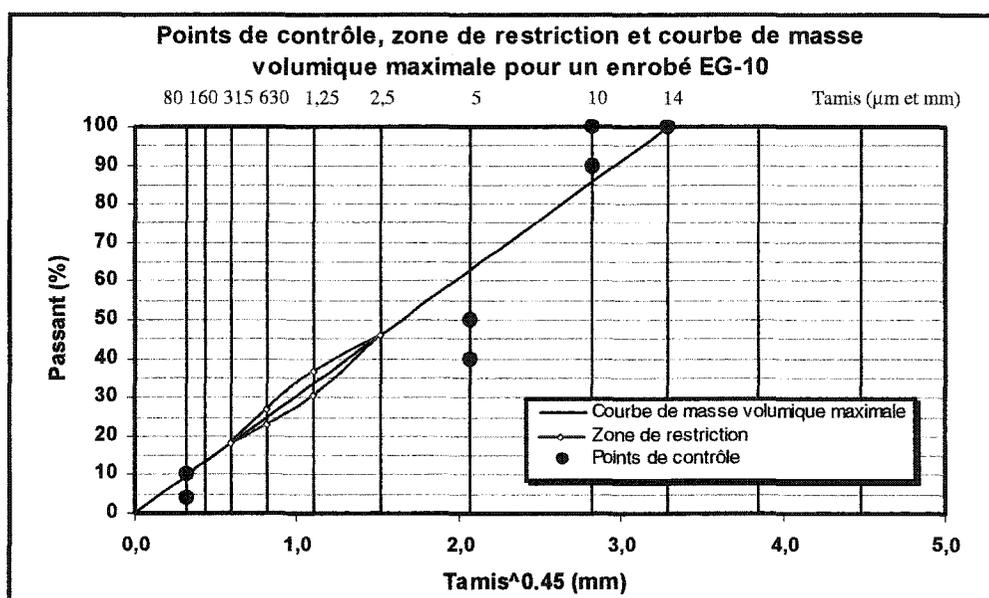


Figure 10 Courbe de masse volumique maximale et fuseaux granulométriques pour l'enrobé EG-10

2.5 Mise en perspective des facteurs significatifs vis-à-vis l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage de l'enrobé EG-10

Tel qu'il a été exposé à la section 1.3, il existe plusieurs facteurs affectant à la fois l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage de l'enrobé. Dans le cas qui nous concerne, certains facteurs peuvent être isolés en raison du type d'enrobé ciblé pour notre

recherche, c'est-à-dire qu'il demeure invariable dans le contexte de l'approche de formulation du MTQ (EG-10).

Les facteurs considérés comme étant invariables, relativement aux cinq critères de design jugés déterminant dans l'optimisation du couple ouvrabilité-orniéage, sont :

- Le type de bitume (fixe la rhéologie) et le volume de bitume effectif (V_{be});
- La grosseur maximale du granulat;
- Une masse granulaire constituée de particules à 100% angulaires.

Ce dernier élément représente une exigence de la norme 4202 afin d'assurer la stabilité sous charge de l'enrobé (haute résistance à l'orniéage). Or, c'est particulièrement à ce niveau qu'il devient critique de formuler un enrobé dans la perspective du couple ouvrabilité-orniéage. Par conséquent, deux facteurs en particulier ont été ciblés pour évaluer le processus d'optimisation du couple ouvrabilité-orniéage dans le cadre de notre programme expérimental, soit :

- 1) La teneur en filler (passant $80\mu\text{m}$);
- 2) La structure granulaire : substitution progressive d'une partie de la masse granulaire concassée par un sable roulé, un sable naturel.

La teneur en filler influence la valeur du VAM et se rapporte au 3^{ème} critère de design énoncé précédemment dans la méthodologie proposée pour la formulation d'un enrobé sur la base du couple ouvrabilité-orniéage. L'ajout d'un sable roulé influence la qualité des points de contact du combiné granulaire et se rapporte alors au 2^{ème} critère de design énoncé dans la méthodologie proposée auparavant. Ces deux facteurs constituent des variables et sont intégrés dans le programme expérimental.

2.6 Programme expérimental

Les principales étapes du programme expérimental sont illustrées à la figure 11. Ces étapes ont été élaborées dans la perspective de mettre en relief une méthodologie pour la formulation d'un enrobé sur la base d'une optimisation du couple ouvrabilité-ornièreage. Le programme expérimental se présente en trois phases : I) la formulation des enrobés, II) la détermination de l'aptitude au compactage des enrobés et III) la détermination de la résistance à l'orniérage des enrobés.

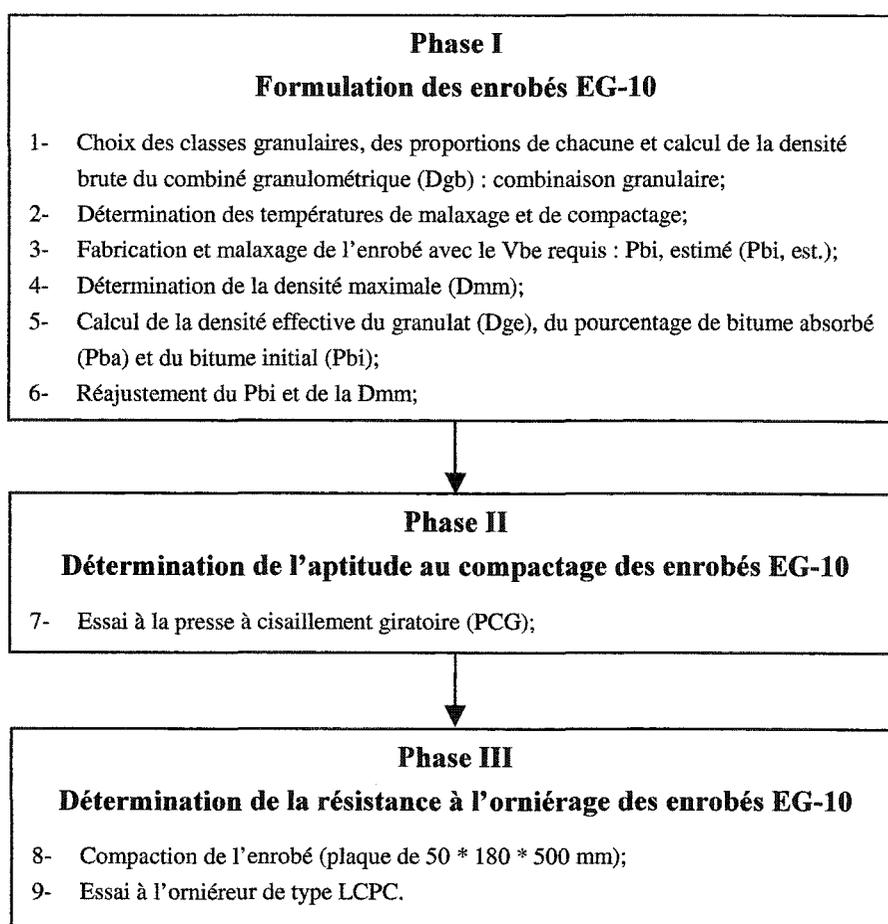


Figure 11 Organigramme des principales phases du programme expérimental

Les essais présents dans les phases I, II et III ont pour buts de : 1) déterminer des caractéristiques requises pour le calcul des dosages; 2) étudier l'impact de la variation des deux facteurs ciblés dans le plan d'étude (filler et ajout de sable) et 3) évaluer la performance des enrobés (critères de performance). La PCG et l'orniéreur sont des critères de performance.

2.6.1 Phase I : Formulation des enrobés

La formulation des enrobés s'est faite selon la méthode de formulation LC. Le cheminement de la phase I est bien décrit dans la méthode d'essai LC 26-004 s'intitulant : "Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du Laboratoire des chaussées", édition 1997.

Les deux facteurs retenus ont été intégrés à l'étape 1 et classés en deux volets :

- Volet 1 : Variation du % filler (changement de la granulométrie);
- Volet 2 : Substitution simple de sable (changement de la granulométrie et de la forme des particules composant l'enrobé).

Huit enrobés ont été formulés afin de déterminer l'influence de chaque facteur sur le couple ouvrabilité-orniérage. Cinq et trois enrobés ont été confectionnés respectivement dans les volets 1 et 2. Les granulométries de ces huit enrobés seront présentées au chapitre 5.

Dans la phase I, les étapes 3 et 6 peuvent être regroupées respectivement sous deux termes : 1) dosages initiaux et 2) dosages finaux des enrobés. Ces deux termes seront présentés en détails dans les chapitres 4 et 5.

2.6.2 Phase II : Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés

L'aptitude au compactage a été déterminée pour les huit enrobés formulés. Pour évaluer leur ouvrabilité, la presse à cisaillement giratoire (PCG) a été utilisée. La méthode d'essai LC 26-003 "Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire" a été utilisée comme référence.

Pour le volet 1, une seule exigence de départ a été fixée, soit que la granulométrie de l'enrobé de référence devait être au centre du fuseau granulométrique exigé (tableau XIV). Par la suite, tout dépendant de l'ouvrabilité de cet enrobé de référence, la teneur en filler était ajustée afin de répondre aux exigences à la PCG. Pour le volet 2, la substitution en sable de l'enrobé de départ s'effectuait toujours de manière croissante pour en arriver à satisfaire les exigences à la PCG.

2.6.3 Phase III : Détermination de la résistance à l'orniérage des enrobés

Les étapes constituant la phase III sont décrites dans les méthodes d'essais LC 26-400 (Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé) et LC 26-410 (Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage). Le compacteur de plaques et l'orniéreur utilisés sont de type LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées), ces deux appareils ont servi évidemment à compacter les enrobés et à déterminer leur résistance à l'orniérage. La détermination de la résistance a été effectuée sur les enrobés possédant une maniabilité adéquate et parfois, sur les enrobés de part et d'autre de ces optimums.

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA CONFECTION DES ENROBÉS

3.1 Matériaux utilisés

Pour la confection des enrobés EG-10, un gros granulat, deux granulats fins, un sable naturel, un filler et un bitume ont été utilisés afin d'obtenir le fuseau granulométrique exigé et d'avoir au minimum deux classes granulaires distinctes (tableau VIII). Les sections suivantes présentent les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la confection des enrobés.

3.1.1 Granulats concassés

Le gros granulat et les deux granulats fins provenaient de la carrière Raycar à St-Flavien, près de la ville de Québec. Il s'agit de matériaux concassés de nature basalte. Le gros granulat et les deux granulats fins sont respectivement de calibre 5-10mm, 2,5-5mm et 0-2,5mm. Leurs caractéristiques physiques sont présentées au tableau IX. En examinant le tableau IX, une grande différence entre les densités brutes des trois granulats concassés a été décelée, ceci n'étant pas réaliste, car les granulats provenaient de la même source. Afin de valider cette observation, les densités brutes des granulats données par le fournisseur ont été analysées et il implique bien que notre détermination des densités était inexacte.

Tableau IX

Caractéristiques des granulats utilisés

Caractéristiques	Normes	Résultats			
		Matériaux concassés			Sable naturel
		0-2,5	2,5-5	5-10	0-5
Identification	n / a	0-2,5	2,5-5	5-10	SN
Source	n / a	Carrière Raycar à St-Flavien			Ste-Émilie-de-l'Énergie
Catégorie	LC 2101	1	1	1a	2
Densité brute	NQ 2560-065, 067 et 350	2,655	2,570	2,824	2,653
Absorption en eau (%)	NQ 2560-065, 067 et 350	3,83	1,97	1,52	1,48
Friabilité (%)	NQ 2560-080	18,6	14,9	n / a	15,0
Fragmentation (%)	LC 21-100	n / a	n / a	100	n / a
Coefficient d'écoulement (Ce)	NQ 2560-075	128	n / a	n / a	78
Résistance à la fragm. Los Angeles (%)	LC 21-400	n / a	n / a	11,6	n / a
Résistance à l'usure micro-Deval (%)	NQ 2560-070 LC 21-101	10,0	3,5	7,0	7,6
Granulométrie	Tamis (mm)	% passant			
	14	100	100	100	100
	10	100	100	98	100
	5	100	100	6,2	100
	2,5	94	8,8	1,2	89
	1,25	60	1,4	1,0	78
	0,630	38	0,9	0,9	58
	0,315	25	0,7	0,9	26
	0,160	16	0,6	0,8	5,2
0,080	10	0,4	0,7	0,8	
n/a : non applicable					

3.1.1.1 Gros granulat de calibre 5-10mm

Selon les recommandations du MTQ (2000), le gros granulat utilisé pour l'enrobé EG-10 devra être respectivement de catégorie 1a et 2b pour les autoroutes et les routes

nationales. Il a été décidé que le granulat devra respecter les exigences de la catégorie la plus sévère, soit la catégorie 1a.

Le gros granulat utilisé est constitué à 100% de particules angulaires, ce qui donnera à l'enrobé une bonne résistance à l'orniérage. Évidemment, l'ouvrabilité des enrobés en sera affectée. Également, les résistances à l'usure (micro-Deval) et aux chocs (Los Angeles) font que ce granulat se classe dans la catégorie 1 et présente donc d'excellentes caractéristiques intrinsèques. Pour cette classe de granulat (catégorie 1), la norme 4202 ne précise pas de critère spécifique en ce qui a trait aux exigences sur le pourcentage de particules plates et allongées (commentaire #2 au-bas du tableau AV, annexe 3). En effet, la qualité de ces particules fait en sorte que même s'il y a des particules plates et allongées dans ce granulat, la détérioration du granulat, lors de la compaction de l'enrobé et lors des sollicitations par les pneumatiques, sera modérée. De ce fait, ce gros granulat se classe dans la catégorie 1a. Sa granulométrie est illustrée à la figure 12 et respecte la classe granulaire 5-10mm définie à la norme 2101 "Granulats". La figure 12 illustre bien que la granulométrie du gros granulat est uniforme.

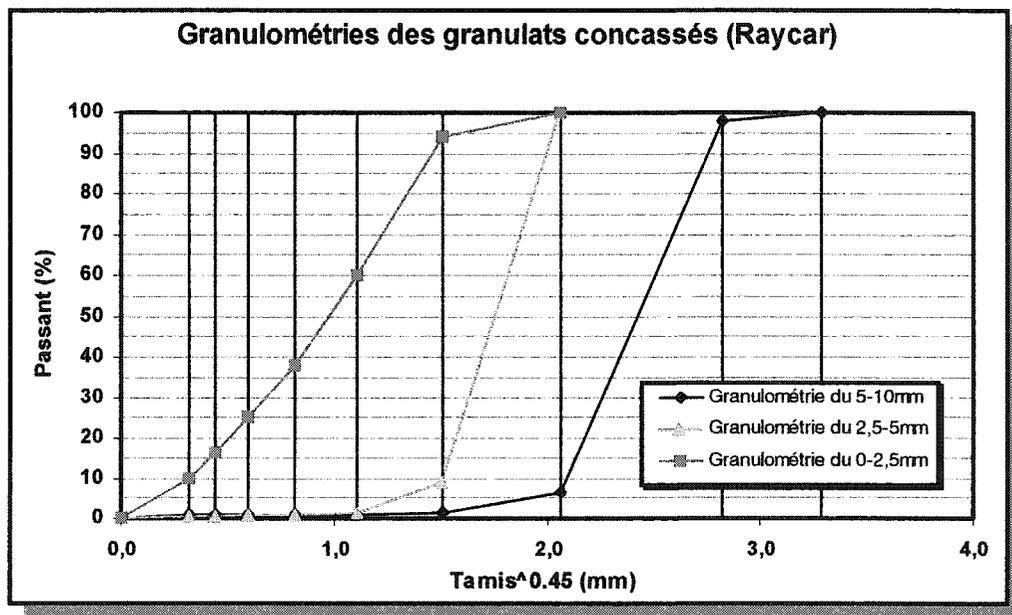


Figure 12 Granulométries des granulats concassés

En outre, le gros granulat présente un pourcentage de particules passant le tamis de 80 μ m égal à 0,7%, ce qui est inférieur à la limite permise de 1,5% liée à la propreté.

3.1.1.2 Granulat fin de calibre 2,5-5mm

Selon les recommandations du MTQ (2000), le granulat fin entrant dans la composition du EG-10 doit répondre à la catégorie 1. D'autre part, le granulat fin devra respecté les caractéristiques complémentaires présentées au tableau AV de l'annexe 3. Les catégories de granulats fins sont présentées au tableau AII de l'annexe 3.

Suite à un séchage du granulat fin, la présence d'oxyde de fer (rouille) est observable en surface de certaines particules. Les résultats des mesures des résistances à l'usure (micro-Deval) et de friabilité permettent de classer ce granulat dans la catégorie 1. Sa granulométrie respecte la classe granulaire 2,5-5mm définie à la norme 2101 "Granulats" et est illustrée à la figure 12. La figure 12 illustre que la granulométrie du granulat fin est uniforme.

3.1.1.3 Granulat fin de calibre 0-2,5mm

Les particules du granulat 0-2,5mm sont très angulaires; le coefficient d'écoulement est de 128. Son coefficient d'écoulement supérieur à 80 et ses caractéristiques intrinsèques permettent de classer ce granulat dans la catégorie 1. Les pourcentages de mottes d'argile et de particules friables ainsi que la teneur en particules inférieures à 5 μ m n'ont pas été mesurées puisque les rapports d'exploitations de la carrière Raycar ont toujours été favorables pour ces aspects. Sa granulométrie est illustrée à la figure 12 et respecte la classe granulaire 0-2,5mm définie à la norme 2101 "Granulats". La figure 12 illustre que la granulométrie du granulat fin est étalée.

3.1.2 Sable naturel

Afin d'accroître l'ouvrabilité de l'enrobé confectionné à partir de granulats concassés de Raycar, fortement anguleux, une partie de la fraction fine a été substituée par un sable naturel. En effet, les sables naturels sont en grande partie constitués de particules arrondies; le coefficient d'écoulement d'un sable naturel peut varier de 50 à 105. Dans le cadre de cette étude, un seul granulats naturels a été utilisé : le sable naturel (SN).

Le sable naturel (SN) est un sable de silice provenant de Ste-Émilie-de-l'Énergie. Ce sable est couramment utilisé dans la confection de bétons de ciment. Seule la fraction passant le tamis de 5mm du sable naturel a été retenue pour cette étude afin d'obtenir un granulats de classe 0-5mm. Les caractéristiques physiques et la courbe granulométrique correspondante du sable SN sont données respectivement au tableau IX et à la figure 13. En référence à la figure 13, la granulométrie de ce sable est continue et étalée. Comme la plupart des sables naturels, il y a beaucoup de particules entre les tamis de 160 et 630 μ m. Cette affirmation peut être tirée en raison de l'observation d'une pente abrupte entre ces tamis. Le coefficient d'écoulement du sable SN est de l'ordre de 78, donc ce sable se classe dans la catégorie 2 selon la norme 4202 du MTQ.

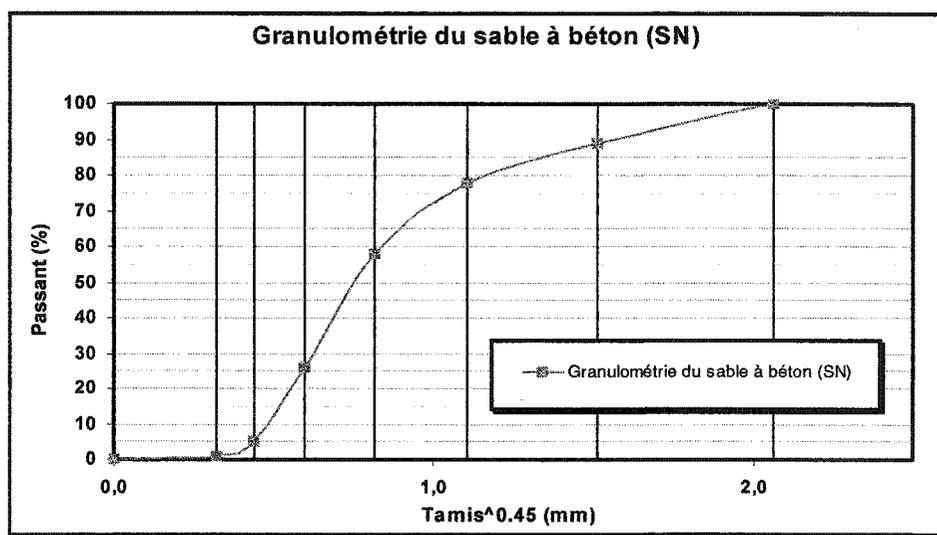


Figure 13 Granulométrie du sable naturel, SN

3.1.3 Filler minéral

Le filler utilisé dans la confection des enrobés est de nature calcaire. Il provient de l'Usine #79 à Montréal de l'entreprise DJL. Les caractéristiques physiques du filler sont présentées au tableau X.

Tableau X

Caractéristiques du filler minéral utilisé

Caractéristiques		Résultats	Exigences de la norme ASTM D 242-95
Minéralogie		Calcaire	---
Apparence		Farine	---
Densité		2,700	---
Granulométrie	Tamis (µm)	% passant	% passant
	630	100	100
	315	100	95-100
	160	91	
	80	76	70-100
	59	61	
	42	60	
	28	59	
	20	55	
	15	49	
	11	42	
	8	34	
	6	25	
4	20		
3	15		

Bien que la norme ASTM D 242-95 ne spécifie aucune exigence pour les particules de moins de 80µm, cette fraction vient jouer un rôle déterminant compte tenu de sa grande surface spécifique. La substitution d'un filler dans les mélanges d'enrobés bitumineux doit impérativement se référer à la distribution de la phase des particules passant le tamis de 10µm pour espérer contrôler la durabilité des enrobés.

La granulométrie du filler a été obtenue par sédimentation afin de bien cerner toute la distribution granulaire du matériel utilisé. La méthode employée pour la détermination de la granulométrie du filler s'inspire des normes ASTM D 422 et NQ 2501-025. Les résultats du tableau X indiquent que le filler respecte les exigences de la norme ASTM D 242-95. La granulométrie du filler est présentée à la figure 14 et ce, en comparaison à la courbe de masse volumique maximale (CMVM) correspondante.

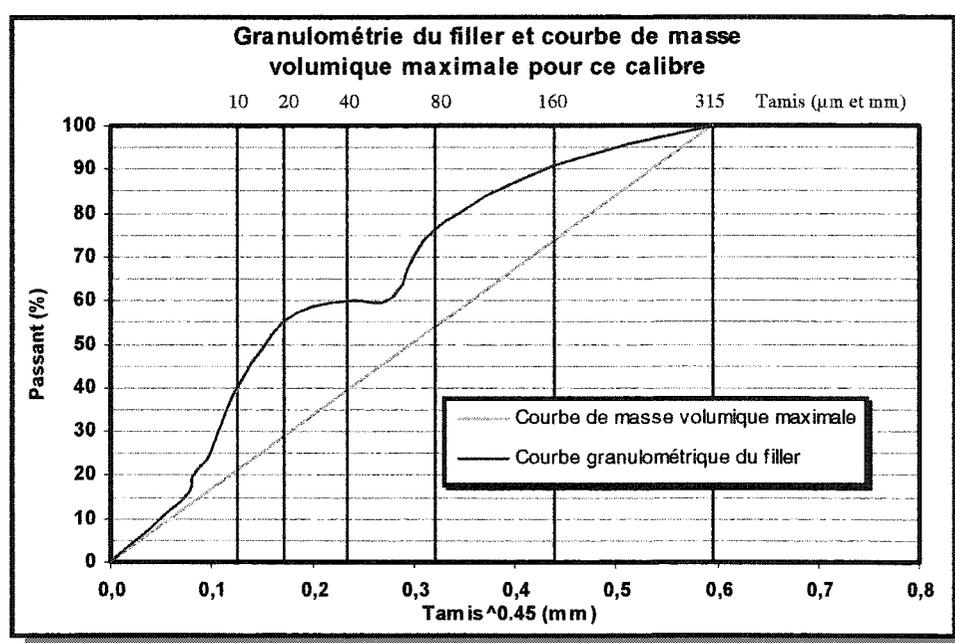


Figure 14 Granulométrie du filler et la CMVM pour ce calibre

En comparaison avec la CMVM, le filler possède une granulométrie très fine et 40% de ses particules sont inférieures à $10\mu\text{m}$. Par ailleurs, la norme ASTM D 242-95 exige des fillers assez fins.

3.1.4 Bitume

Le bitume utilisé dans la confection des enrobés a été fabriqué par la compagnie Shell à la raffinerie de Montréal-Est. Il s'agit d'un bitume standard, c'est-à-dire sans ajout de

polymère, de classification PG 58-28. Il est à souligner que le bitume utilisé est moins performant que le bitume recommandé (PG 64-34) et, dans ce contexte, il permet de faire ressortir plus facilement les caractéristiques des granulats qui contrôlent la résistance à l'orniérage. Les caractéristiques physiques, fournies par le fabricant, du bitume utilisé sont illustrées au tableau XI.

Tableau XI

Caractéristiques physiques du bitume utilisé

Caractéristiques		Résultats
Fabricant		Produits Shell Canada
Lieu de fabrication		Montréal-Est
Classe du bitume		PG 58-28
Numéro du réservoir		104
Point éclair (°C)		338,5
Solubilité à 25 °C (%)		99,91
Masse volumique à 25 °C (g/cm ³)		1,0079
Perte en masse au RTFOT (%)		0,023
Viscosité Brookfield (mPa.s) à :		131 °C
		161 °C
Température élevée de caractérisation (Te) en °C		59,5
Température basse de caractérisation (Tb) en °C		-29,7

La teneur en bitume effectif (Vbe) des enrobés EG-10 est fixée à 12,4% (norme 4202 du MTQ (tableau VIII)).

CHAPITRE 4

ASPECTS TECHNIQUES LIÉS À LA MISE EN ŒUVRE DES ENROBÉS EN LABORATOIRE

Ce chapitre traite en détails des étapes présentées dans les phases I, II et III du programme expérimental (figure 11). Ces phases sont respectivement la formulation, la détermination de l'aptitude au compactage et la détermination de la résistance à l'orniérage des enrobés.

4.1 Formulation des enrobés EG-10

Les étapes proposées par la méthode d'essai LC 26-004 ont été soigneusement suivies afin de formuler des enrobés adéquats. Globalement, les différentes étapes se résument en six principales séquences, soit :

- 1) Choix des classes granulaires, des proportions de chacune et calcul de la densité brute du combiné granulométrique (D_{gb}) : combinaison granulaire;
- 2) Détermination des températures de malaxage et de compactage;
- 3) Fabrication et malaxage de l'enrobé avec le V_{be} requis : P_{bi} , estimé ($P_{bi, est.}$);
- 4) Détermination de la densité maximale, D_{mm} ;
- 5) Calcul de la densité effective du granulat (D_{ge}), du pourcentage de bitume absorbé (P_{ba}) et du pourcentage de bitume initial (P_{bi});
- 6) Réajustement du pourcentage de bitume initial (P_{bi}) et de la valeur de la densité maximale (D_{mm}).

Chacune des principales étapes permet de déterminer la formulation de l'enrobé de manière à respecter les exigences de la norme 4202. Il est important de souligner que ces étapes de formulation doivent être refaites pour chacun des enrobés testés dans le programme expérimental puisque la variation d'un des facteurs modifie la teneur en bitume absorbé et la valeur de la densité maximale, nécessitant un ajustement de la teneur en bitume pour conserver constant le volume de bitume effectif (Vbe).

4.1.1 Combinaison granulaire

Pour chaque enrobé confectionné, les granulats ont été combinés de façon à répondre aux exigences relatives à la granulométrie d'un enrobé EG-10 (tableau VIII). Dans le cadre du volet 1, les trois granulats concassés de Raycar ont été combinés avec le filler, et pour le volet 2, le sable naturel (SN) a été introduit en substitution. Une seule exigence a été imposée, la granulométrie de l'enrobé de référence devait être au centre du fuseau granulométrique exigé. Le calcul de la densité brute du combiné granulaire (Dgb) est effectué afin de faciliter la conversion du Vbe en pourcentage massique.

4.1.2 Températures d'enrobage et de compactage

Chaque bitume présente une relation spécifique entre la température et sa viscosité. Il convient de cibler la température permettant d'assurer un enrobage adéquat, laquelle est définie par une viscosité du bitume de 170 ± 20 mPa.s (méthode d'essai LC 25-007), et la température de compactage est définie par une viscosité du bitume de 280 ± 30 mPa.s (LC 25-007). Les températures d'enrobage et de compactage ont été déterminées à partir de la mesure de la viscosité du bitume à l'aide de l'appareil Brookfield (LC 25-007). Pour des températures respectives de 131°C et 161°C , le bitume présente une viscosité de l'ordre de 375 et 107 mPa.s respectivement. Le bitume et les échantillons ont donc été respectivement chauffés à $148 \pm 2^\circ\text{C}$ et à $137 \pm 2^\circ\text{C}$ pour le malaxage et le

compactage. D'autre part, les granulats ont été chauffés à $163 \pm 2^\circ\text{C}$ selon les spécifications précisées dans la méthode d'essai LC 26-003.

4.1.3 Établissement de la teneur en bitume

Pour la formulation LC, l'établissement de la teneur en bitume est simple, les enrobés EG-10 doivent avoir un V_{be} de 12,4% (tableau VIII). Le V_{be} exigé est exprimé en pourcentage par rapport à 0% de vides : enrobé ayant aucun vide (V_{mm}). Toutefois, afin de faciliter la formulation des enrobés, il faut convertir ce volume (V_{be}) en masse (P_{bi}), cela s'effectue en connaissant la densité du bitume (D_b), le pourcentage de bitume absorbé (P_{ba}) et la densité brute du combiné granulaire (D_{gb}).

4.1.4 Malaxage de l'enrobé

Les enrobés ont été malaxés selon la méthode d'essai LC 26-003. Pour commencer, les granulats ont été séchés à une température de 163°C : température de malaxage des granulats. La journée précédant la fabrication d'un enrobé, les granulats séchés ont été pesés et mis dans un bol, et le combiné granulaire a été bien identifié. Les granulats ont été pesés à nouveau à l'enrobage afin de s'assurer de l'exactitude des masses. La soirée auparavant, l'étuve a été programmée afin que le bitume atteigne sa température de malaxage tôt le lendemain matin, ciblée à $148 \pm 2^\circ\text{C}$. Tous les outils servant à la confection de l'enrobé ont été chauffés au minimum 30 minutes à 163°C avant le gâchage. Le malaxage a été fait de la façon suivante : le bol de malaxage a été sorti de l'étuve et déposé sur la balance mise à zéro. Ensuite, les granulats ont été déposés dans le bol de malaxage. Une vérification de la masse ciblée a été effectuée. Un cratère a été formé au centre des granulats et la balance a été mise à nouveau à zéro. Le bitume a été pesé et déposé au centre du cratère jusqu'à la masse souhaitée. L'enrobé a été malaxé jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène (environ deux minutes) et mis à l'étuve et

ce, à une température de $137\pm 2^{\circ}\text{C}$, soit la température de compactage et de curage. La période de cure à l'étuve de l'enrobé varie et sera spécifiée dans les sections suivantes. La température de l'enrobé a été vérifiée périodiquement pendant la cure par un thermocouple placé à son centre. L'une des étuves utilisées est illustrée à la figure 15.

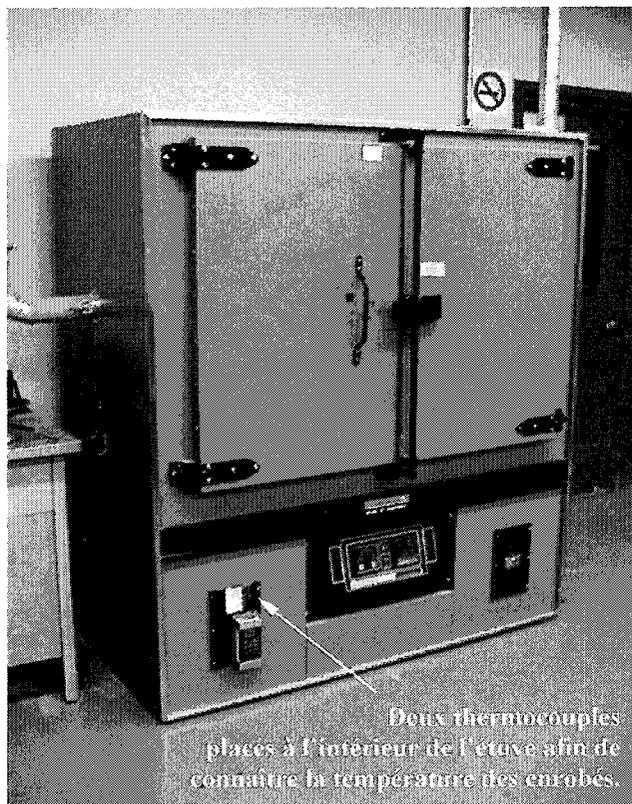


Figure 15 Étuve ventilée

Cette étuve ventilée et programmable est très précise, elle a une exactitude d'environ 1°C . Les enrobés mis dans l'étuve n'étaient pas recouverts, ce qui a sûrement accéléré le vieillissement et le durcissement du bitume. Les enrobés possédant un temps de malaxage faible comparativement à d'autres, possédaient, lors des essais à la PCG, une meilleure ouvrabilité. Pour la confection de deux échantillons et d'un échantillon servant respectivement à la détermination de la Dmm et de l'aptitude au compactage (essai à la PCG), un malaxeur d'une capacité d'environ 8 kg d'enrobé a été utilisé. Le malaxeur est illustré à la figure 16 a).



Figure 16 a)
Malaxeur d'une capacité de 8kg



Figure 16 b)
Malaxeur d'une capacité de 60kg

Pour la confection des plaques d'enrobé servant à évaluer la performance à l'orniére, un malaxeur d'une capacité de 60 kg a été utilisé (figure 16 b)).

4.1.5 Mesure de la densité maximale, Dmm

Pour la détermination de la Dmm, un seul mélange a été préparé et séparé en deux parties afin de former deux échantillons. La détermination de la Dmm doit être faite au minimum avec deux échantillons. L'essai a été effectué conformément à la méthode d'essai LC 26-045 (édition de 1999) "Détermination de la densité maximale". La valeur de la densité maximale est utilisée dans le calcul des vides à la formulation, du compactage, de l'absorption de bitume et de la masse requise pour la PCG et le compacteur de plaques. La densité maximale est établie en déterminant, pour une masse d'enrobé donnée, son volume absolu (exclusion des vides interstitiels) et ce, à partir de l'application du principe d'Archimède (méthode volumétrique). La température de l'eau

a été de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Lorsque l'étendue critique de 0,013 (valeur maximale – valeur minimale) est dépassée entre les deux échantillons, il faut refaire les essais.

Après malaxage, et une fois que la température de l'enrobé entreposé en étuve a atteint la température de compactage ciblée, l'enrobé est conservé à l'étuve pour une période de 2h. Ce temps de cure de 2h est requis lorsque le combiné granulaire possède une absorption en eau égale ou inférieure à 2,5%. Ce temps de cure équivaut approximativement au temps qui s'écoule entre le malaxage et la mise en place de l'enrobé. Ce temps de cure permet au bitume d'être absorbé par les granulats.

4.1.6 Réajustement du Pbi et de la Dmm

La détermination de la densité maximale de l'enrobé en laboratoire permet de connaître l'absorption réelle de bitume par les granulats. Sur la base de la mesure de la densité maximale de l'enrobé en laboratoire, un ajustement de la quantité totale de bitume (Pbi) est requis dû au fait que l'absorption réelle de bitume diffère de celle estimée; une variation au niveau de la teneur en bitume absorbée se traduit directement par une variation du bitume effectif. L'ajustement de la teneur en bitume (Pbi) a comme conséquence que la valeur de la Dmm mesurée en laboratoire doit être elle aussi ajustée.

Les formules et les calculs employés sont décrits dans la méthode d'essai LC 26-004. La synthèse des équations nécessaires est donnée à l'annexe 4. La correction de la teneur en bitume permet de connaître les dosages finaux des enrobés qui sont relatifs à la formulation.

4.2 Détermination de l'aptitude au compactage : essai à la PCG

La détermination de l'aptitude au compactage a été effectuée pour les huit enrobés formulés. La détermination de l'aptitude au compactage à la PCG est effectuée sur un

échantillon de masse pré-déterminée, laquelle correspond à la quantité exacte d'enrobé requise pour obtenir une éprouvette cylindrique de 115 mm de hauteur dans un moule de 150 mm de diamètre correspondant à zéro pourcent de vides à la formulation. La méthode d'essai LC 26-004 présente le calcul de la masse requise. L'équation prend en compte la densité maximale corrigée et le diamètre du moule. La masse requise est différente pour chaque type d'enrobé confectionné.

À l'exception du fait que deux briquettes ont été confectionnées plutôt que trois, la détermination de l'aptitude au compactage a été effectuée conformément à la méthode d'essai LC 26-003 "Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire". Après le malaxage, et une fois que la température de l'enrobé entreposé en étuve a atteint la température de compactage ciblée, l'enrobé est conservé à l'étuve pour une période comprise entre 30 minutes et 120 minutes. Une période de 120 minutes a été ciblée afin d'obtenir une absorption en bitume par les granulats semblable à celle mesurée lors de la détermination de la Dmm. Lors de la compaction d'une éprouvette à la PCG, l'évaluation de sa hauteur a été enregistrée à chaque rotation. La mesure de la hauteur de l'éprouvette permet de connaître l'évolution du pourcentage de vides à la formulation de l'enrobé en cours de compaction. À la suite du compactage à la PCG, chacune des briquettes a été minutieusement observée de manière à porter une évaluation sur la qualité de l'enrobé notamment en ce qui a trait au ressuage et à la ségrégation.

4.3 Détermination de la résistance à l'orniérage des enrobés

Afin de déterminer la résistance à l'orniérage d'un enrobé, il faut passer par deux étapes : 1) la confection et le compactage de plaques d'enrobé, et 2) l'essai à l'orniéreur proprement dit. La détermination de la résistance à l'orniérage s'est faite sur les enrobés ayant atteint une ouvrabilité adéquate à la PCG et, parfois, pour les enrobés de part et d'autre de ces optimums.

4.3.1 Confection et compactage des plaques

Pour chaque enrobé testé à l'orniéreur, deux plaques d'enrobé ont été confectionnées. La dimension de ces plaques est de 50 x 180 x 500 mm. La masse d'enrobé, en grammes, nécessaire pour confectionner une plaque est égale au volume de la plaque en cm^3 multiplié par la Dmm et 95%. Le quatre-vingt-quinze pourcent (95%) équivaut à la compaction désirée de l'enrobé. Les deux plaques ont été confectionnées à partir d'une seule gâchée. Après le malaxage, l'enrobé a été conservé de 1 à 2 heures dans l'étuve et ce, à la température de compactage, dans le but d'obtenir un temps de cure équivalent à celui exigé pour la Dmm et préconisé pour la PCG. Lors de ce séjour dans l'étuve, l'enrobé n'a pas été homogénéisé et dans aucun cas, les enrobés ont été couverts.

Le compacteur de plaques en laboratoire est pneumatique et de type LCPC. La figure 17a) illustre le compacteur de plaques. Lors de la compaction, le pneu est gonflé à une pression de 6 bars et la pression exercée par ce pneu est de l'ordre de 0,4 bars, au tout début de la compaction, et de 2,5 bars pour les autres passes. La compaction visée est de 95% pour tous les enrobés. Pour le compactage, une séquence de passe est décrite dans la méthode d'essai préliminaire LC 26-400 et s'inspire de la norme française NF P 98-250-2 "Préparation des mélanges hydrocarbonés; partie 2 : Compactage des plaques".

Un bain rempli d'eau et une balance ont été utilisés afin de déterminer le taux de compaction réel des plaques d'enrobés, soit par la méthode volumétrique (figure 17b).

Entre le compactage et l'essai à l'orniéreur, la durée de conservation des plaques doit être au minimum de 48h. La durée de conservation des plaques a été notée pour tous les enrobés testés.

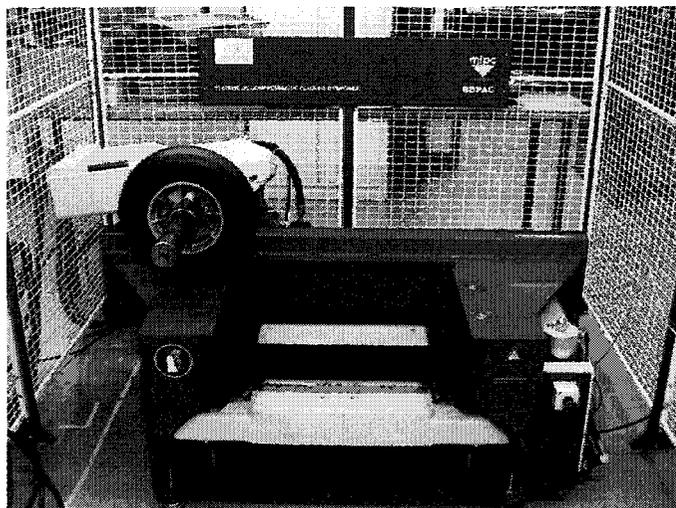


Figure 17 a)
Compacteur de plaques



Figure 17 b)
Balance et bain rempli d'eau
(méthode volumétrique)

4.3.2 Essai à l'orniéreur

La détermination de la résistance à l'orniérage avec l'orniéreur de laboratoire de type LCPC a été effectuée conformément à la méthode d'essai préliminaire LC 26-410 qui s'inspire de la norme française NF P 98-253-1 "Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés; partie 1 : Essai d'orniérage". La figure 18 illustre l'orniéreur de laboratoire. Les pneumatiques sont gonflés à 6 bars et exercent une pression de 5 KN sur chacune des plaques d'enrobés. Malheureusement, avant de soumettre les plaques d'enrobé à l'essai à l'orniéreur, aucun contrôle a été effectué sur l'épaisseur des plaques dans la zone sollicitée afin de vérifier leur planéité et la tolérance maximale de 2,5mm. L'essai à l'orniéreur se déroule suivant la séquence de mesures suivantes : 1 000 cycles à la température de la pièce, 300, 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 cycles à une température de 60°C. Un cycle équivaut à un aller-retour du pneumatique. La température est contrôlée par un thermocouple qui est placé dans l'enrobé, près d'une des parois de la plaque. Même si les exigences établies (tableau VIII) pour la résistance à l'orniérage ne

dépassaient pas 3 000 cycles, les enrobés ont été testés jusqu'à 30 000 cycles afin d'examiner l'évolution des ornières. Notamment, pour certains enrobés, le niveau d'orniérage était tel qu'il était impossible d'effectuer ces mesures. Dans ces cas, les essais à l'orniéreur ont été arrêtés à 3 000 cycles.

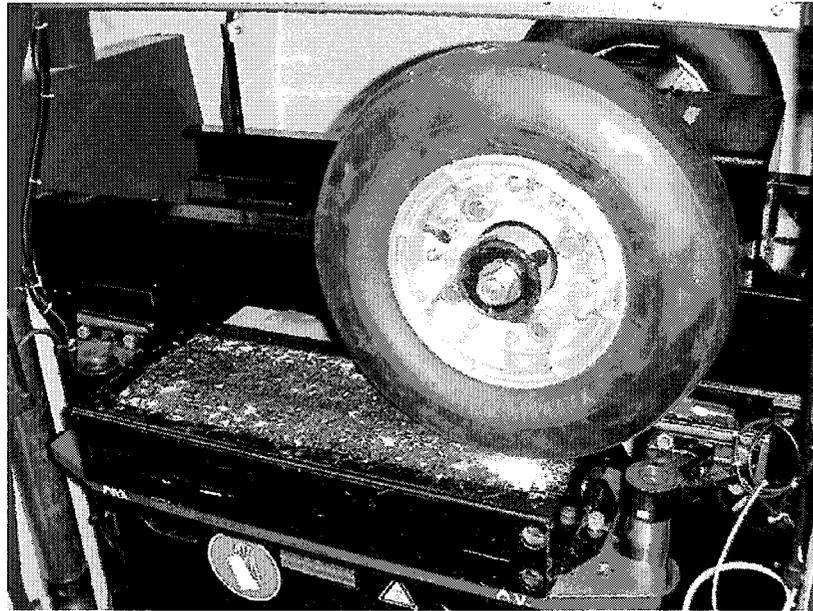


Figure 18 Orniéreur de type LCPC

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Le présent chapitre présente la synthèse de l'ensemble des résultats obtenus. La présentation des résultats comporte : 1) la formulation des enrobés, 2) l'aptitude au compactage de ces enrobés et 3) leur résistance à l'orniérage. Ces trois sections seront analysées sous deux aspects : A) la variation du pourcentage de filler et B) la substitution progressive de la fraction fine par du sable naturel.

5.1 Formulation des enrobés

Huit enrobés ont donc été confectionnés afin de déterminer l'influence de chaque facteur sur le couple ouvrabilité-orniérage. La figure 19 illustre la formulation des huit enrobés de base. L'appellation de chaque enrobé est simple, le premier, le deuxième et le troisième terme représentent respectivement : le type d'enrobé, le pourcentage de filler et la quantité de sable introduit dans chaque enrobé. Le dernier terme s'applique essentiellement pour les enrobés dans lesquels une fraction de la masse granulaire a été

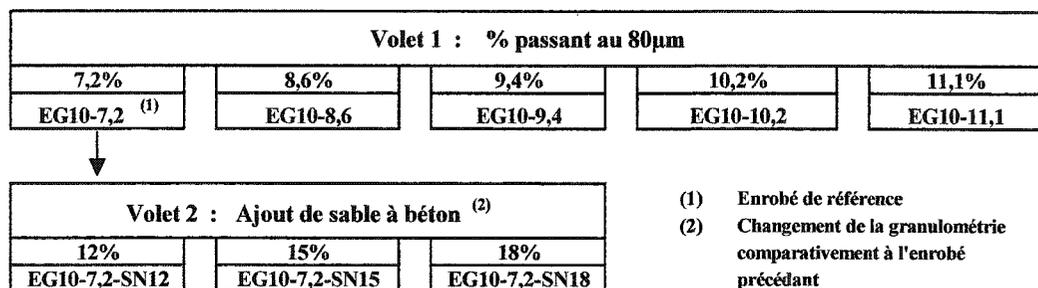


Figure 19 Formulation des huit enrobés de base testés dans le cadre du programme expérimental (bitume PG 58-28 ; EG-10; Vbe de 12,4%)

substituée par un sable naturel (SN). Également, les pourcentages représentant la quantité de sable ajouté font toujours référence à la portion granulaire, excluant la teneur en bitume.

5.1.1 Dosages initiaux des enrobés

En suivant le cheminement des étapes 1 à 3 de la phase I, les dosages initiaux pour la confection des huit enrobés ont été définis dans la perspective d'étudier l'influence de la teneur en filler (volet 1 : 5 enrobés) et l'effet d'une substitution du granulat par du sable naturel (volet 2 : 3 enrobés). Les dosages initiaux des enrobés sont déterminés afin de respecter le fuseau granulométrique exigé et le Vbe requis.

5.1.1.1 Dosages initiaux des enrobés ayant diverses teneurs en filler : volet 1

Le premier enrobé confectionné, l'enrobé de référence : EG10-7,2, est constitué d'un combiné granulaire dont la granulométrie se situe à peu près au centre du fuseau granulométrique exigé (tableau VII). Les différents dosages en filler visent à couvrir une partie de l'étendue permise par la norme LC 4202 fixée de 4 à 10%.

Compte tenu des performances mesurées à la PCG des enrobés EG10-7,2, EG10-8,6, EG10-9,4 et EG10-10,2, un dernier enrobé contenant plus de filler a été testé (EG10-11,1). Les granulométries des combinés granulaires des enrobés confectionnés dans le volet 1 sont présentées au tableau XII. Les dosages requis pour chacune des classes granulaires sont présentés au tableau XIII.

Tableau XII

Granulométries des cinq enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1 : variation du pourcentage passant au 80 μ m (Vbe de 12,4%)

Tamis	Granulométrie				
	EG10-7,2 ⁽¹⁾	EG10-8,6	EG10-9,4	EG10-10,2	EG10-11,1
28 mm	100	100	100	100	100
20 mm	100	100	100	100	100
14 mm	100	100	100	100	100
10 mm	99	99	99	99	99
5 mm	46	46	46	47	46
2,5 mm	27	22	29	30	29
1,25 mm	19	16	21	22	22
630 μ m	14	14	17	18	19
315 μ m	12	13	15	16	16
160 μ m	9,3	11	12	13	14
80 μ m	7,2	8,6	9,4	10,2	11,1

⁽¹⁾ Enrobé de référence

Tableau XIII

Dosages initiaux des matières premières pour les cinq enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1 : variation du pourcentage passant au tamis de 80 μ m (Vbe = 12,4%)

		ENROBÉS CONFECTIONNÉS : VOLET 1				
		EG10-7,2 référence	EG10-8,6	EG10-9,4	EG10-10,2	EG10-11,1
Dosage massique des différentes classes granulaires (%)	Filler	5,7	8,5	8,5	9,4	10,9
	0-2,5mm	17,9	9,4	17,0	17,0	14,6
	2,5-5mm	15,1	21,7	13,2	13,2	13,2
	5-10mm	55,6	54,7	55,6	54,7	55,6
Pbi (%)		5,77	5,66	5,73	5,73	5,69
Pba estimé (%)		0,97	0,86	0,93	0,92	0,88
Vbe visé (%)		12,4	12,4	12,4	12,4	12,4

Les enrobés EG10-8,6, EG10-9,4, EG10-10,2 et EG10-11,1 ont été formulés après avoir analysé les résultats des essais à la PCG de l'enrobé de référence. Il est à souligner que le pourcentage passant au tamis 80 μ m du EG10-11,1 est supérieur à 10%, tel qu'exigé dans la norme 4202 (tableau VIII).

5.1.1.2 Dosages initiaux des enrobés confectionnés avec diverses teneurs en sable : volet 2

Puisque l'ajout de sable roulé a pour but d'accroître l'aptitude au compactage de l'enrobé, l'étude de l'influence de l'ajout de divers dosages de sable roulé a été conduite à partir de l'enrobé de référence, l'enrobé EG10-7,2. Des ajouts de 12, 15 et 18% (% massique) de sable naturel ont été ciblés pour la confection de trois enrobés confectionnés au volet 2. La substitution d'une partie des granulats concassés par un sable roulé a été élaborée en prenant soin de ne pas modifier substantiellement la granulométrie d'ensemble de la masse granulaire. Les granulométries des combinés granulaires des enrobés confectionnés dans le volet 2 sont présentées au tableau XIV alors que les dosages requis pour chacune des classes granulaires sont présentés au tableau XV. Au tableau XV, les valeurs de pourcentages de sable ont diminué par rapport aux valeurs indiquées dans l'appellation de l'enrobé car, ici, elles sont exprimées en référence à la masse de l'enrobé.

Tableau XIV

Granulométries des trois enrobés confectionnés dans le cadre du
volet 2 : ajout de sable roulé (Vbe de 12,4% et 7,2% passant au 80 μ m)

Granulométrie				
Enrobé	EG10-7,2	EG10-7,2-SN12	EG10-7,2-SN15	EG10-7,2-SN18
Taux	Enrobé de référence	Ajout de sable naturel		
		12%	15%	18%
28 mm	100	100	100	100
20 mm	100	100	100	100
14 mm	100	100	100	100
10 mm	99	99	99	99
5 mm	46	45	44	44
2,5 mm	27	25	26	29
1,25 mm	19	21	22	25
630 μ m	14	17	19	21
315 μ m	12	13	13	14
160 μ m	9,3	9,2	9,2	9,3
80 μ m	7,2	7,2	7,1	7,1

Tableau XV

Dosages initiaux des matières premières pour les trois enrobés confectionnés dans le cadre du volet 2 : ajout d'un sable roulé

		ENROBÉS CONFECTIONNÉS : VOLET 2		
		EG10-7,2-SN12	EG10-7,2-SN15	EG10-7,2-SN18
Dosage massique des différentes classes granulaires (%)	Filler	7,6	7,6	7,6
	0-2,5mm	2,8	1,9	1,9
	2,5-5mm	16,1	13,2	10,4
	5-10mm	56,7	57,6	57,6
	Sable naturel	11,3 ⁽¹⁾	14,2 ⁽¹⁾	17,0 ⁽¹⁾
Pbi (%)		5,58	5,57	5,57
Pba estimé (%)		0,77	0,75	0,74
Vbe visé (%)		12,4	12,4	12,4
⁽¹⁾ % exprimé en rapport à la masse de l'enrobé				

Les valeurs présentées au tableau XIV montrent que la granulométrie des enrobés EG10-7,2-SN12, EG10-7,2-SN15 et EG10-7,2-SN18 est semblable à celle de l'enrobé de référence, l'enrobé EG10-7,2. La figure 20 permet de bien visualiser le changement de granulométrie des trois enrobés (EG10-7,2-SN12, EG10-7,2-SN15 et EG10-7,2-SN18) causé par l'ajout de sable comparativement à l'enrobé de référence (EG10-7,2). Par ailleurs, la figure 20 permet de croire, même avant de faire les essais à la PCG, qu'il est très probable que l'ouvrabilité à la PCG sera progressivement décroissante de l'enrobé EG10-7,2-SN18, EG10-7,2-SN15, EG10-7,2 à l'enrobé EG10-7,2-SN12 et ce, en raison de leur granulométrie respective qui s'écarte de plus en plus de la CMVM. Cette affirmation est basée uniquement sur la granulométrie des enrobés et exclut la forme des particules.

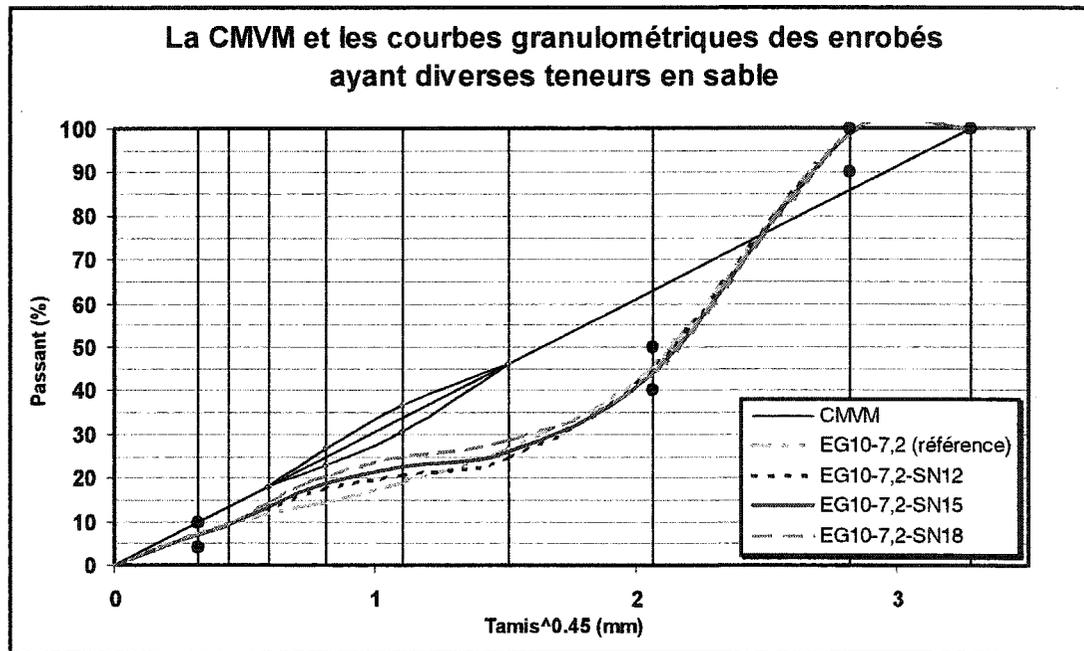


Figure 20 La CMVM et la granulométrie des enrobés ayant diverses teneurs en sable

5.1.2 Dosages réels des enrobés confectionnés dans le cadre des volets 1 et 2

À partir des dosages initiaux établis pour l'ensemble des huit enrobés ciblés, leur confection en laboratoire permet de préciser les dosages réels, tributaires notamment de l'absorption du bitume. Seule la teneur en bitume diffère entre les dosages initiaux et réels. L'ensemble de ces résultats comportent : 1) la détermination de la Dmm et le calcul du Pba réel, 2) la comparaison entre le Pba estimé et réel, et 3) le réajustement du Pb et de la valeur de la Dmm.

5.1.2.1 Densité maximale, Dmm, et teneur réelle en bitume absorbé, Pba%

Deux échantillons ont été confectionnés pour déterminer la densité maximale de chacun des enrobés. Les tableaux XVI (enrobés du volet 1) et XVII (enrobés du volet 2)

présentent les densités maximales mesurées en laboratoire pour chacun des échantillons testés, les étendues entre les deux échantillons d'un même enrobé et les teneurs réelles en bitume absorbé.

Tableau XVI

Résultats des densités maximales mesurées en laboratoire et des teneurs réelles en bitume absorbé pour les enrobés constitués de diverses teneurs en filler (volet 1)

Caractéristique		EG10-7,2 référence	EG10-8,6	EG10-9,4	EG10-10,2	EG10-11,1
Dmm	Échantillon 1	2,596	2,580	2,588	2,567	2,561
	Échantillon 2	2,598	2,584	2,583	2,570	2,564
	Moyenne	2,597	2,582	2,586	2,568	2,562
	Δ Dmm	0,002	0,004	0,005	0,003	0,003
Pba réel (%)		1,30	0,91	1,11	0,85	0,69
Pbi (%)		5,77	5,66	5,73	5,73	5,69
Vbe (%)		12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Pba estimé (%)		0,97	0,86	0,93	0,92	0,88

Les teneurs réelles en bitume absorbé pour les enrobés constitués avec diverses teneurs en filler (volet 1) varient entre 0,69 et 1,30% (tableau XVI). La diversité des proportions de chacun des constituants pourrait expliquer la très grande variation de la teneur en bitume absorbé. Toutefois, il est fort probable que ce soit l'imprécision de la détermination de la densité brute des granulats qui expliquerait la très grande variation de la teneur en bitume absorbé.

Les pierres concassées 0-2,5mm, le 2,5-5mm, le 5-10mm et le sable ont respectivement une absorption en eau de 3,83, 1,97, 1,52, 1,48 et 1% (tableau IX). L'absorption en bitume estimée est établie à partir de l'absorption en eau. Or, on considère que le filler n'absorbe pas d'eau ou de bitume, car ces particules sont tellement fines qu'elles ne

peuvent contenir de pores : on admet que les particules du filler seront tout simplement recouvertes par le bitume.

Les résultats montrent bien que l'absorption en bitume diminue avec l'ajout de filler, cet énoncé a également été mentionné dans le mémoire de Tremblay (2001). Par ailleurs, plus l'absorption en bitume est élevée, plus la densité maximale de l'enrobé est haute.

Les résultats du tableau XVI montrent qu'il y a une assez grande différence entre l'absorption estimée et réelle du bitume. L'écart entre les deux varie entre 0,05% et 0,33%, ce qui est assez considérable quant cet écart est reporté sur l'absorption moyenne estimée à 0,9%.

Les résultats obtenus de la confection des enrobés contenant divers dosages en sable roulé (volet 2) ont également permis de calculer les dosages réels tels que présentés au tableau XVII.

Tableau XVII

Résultats des densités maximales mesurées en laboratoire et des teneurs réelles en bitume absorbé pour les trois enrobés (ajout de sable roulé : volet 2)

Caractéristique		EG10-7,2	EG10-7,2-SN12	EG10-7,2-SN15	EG10-7,2-SN18
Dmm	Échantillon 1	2,596	2,580	2,559	2,575
	Échantillon 2	2,598	2,581	2,562	2,571
	Moyenne	2,597	2,581	2,561	2,573
	Δ Dmm	0,002	0,001	0,003	0,005
Pba réel (%)		1,30	0,88	0,56	0,80
Pbi (%)		5,77	5,58	5,57	5,57
Vbe (%)		12,4	12,4	12,4	12,4
Pba estimé (%)		0,97	0,77	0,75	0,74

Pour les trois enrobés du volet 2, la relation entre la valeur de la Dmm et l'absorption du bitume se trouve à être la même que celle citée pour les cinq enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1. Par ailleurs, les résultats du tableau XVII montrent que l'écart entre l'absorption théorique et réelle du bitume varie entre 0,06% et 0,19%, ce qui est très acceptable.

5.1.3 Correction de la teneur en bitume et de la valeur de la Dmm

Les teneurs en bitume des enrobés et les valeurs des densités maximales ont été corrigées pour prendre en compte l'absorption réelle en bitume par les granulats. Ces corrections sont effectuées afin que les enrobés soient formulés avec le Vbe exigé. Les tableaux XVIII (enrobés du volet 1) et XIX (enrobés du volet 2) présentent les valeurs avant et après corrections.

Tableau XVIII

Valeurs de la teneur en bitume et de la densité maximale avant et après correction pour les enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1 : différentes teneurs en filler

		EG10-7,2	EG10-8,6	EG10-9,4	EG10-10,2	EG10-11,1
		référence				
Avant correction	Pba estimé (%)	0,97	0,86	0,93	0,92	0,88
	Pbi (%)	5,77	5,66	5,73	5,73	5,69
	Dmm mesurée en laboratoire	2,597	2,582	2,586	2,568	2,562
Après correction	Pba réel (%)	1,30	0,91	1,11	0,85	0,69
	Pb corrigé (%)	6,06	5,70	5,90	5,66	5,52
	Dmm corrigée	2,584	2,580	2,579	2,571	2,570

Tableau XIX

Valeurs de la teneur en bitume et de la densité maximale avant et après correction pour les enrobés confectionnés dans le cadre du volet 2 : diverses teneurs en sable roulé

		EG10-7,2	EG10-7,2-SN12	EG10-7,2-SN15	EG10-7,2-SN18
Avant correction	Pba estimé (%)	0,97	0,77	0,75	0,74
	Pbi (%)	5,77	5,58	5,57	5,57
	Dmm mesurée en laboratoire	2,597	2,581	2,561	2,573
Après correction	Pba réel (%)	1,30	0,88	0,56	0,80
	Pb corrigé	6,06	5,68	5,40	5,62
	Dmm corrigée	2,584	2,577	2,568	2,571

Un ajustement à la hausse de la teneur en bitume fera diminuer la valeur de la densité maximale en raison de la densité plus faible du bitume en comparaison avec les granulats.

5.2 Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à l'aide de la PCG

Pour qu'un enrobé soit considéré comme adéquat au niveau de son ouvrabilité, il faut que la teneur en vides à la formulation, soit respectivement > à 11%, de 4 à 7%, et > à 2% pour 10, 80 et 200 girations pour l'essai à la PCG (exigences énoncées au tableau VIII, section 2.4).

Tous les enrobés formulés dans le cadre du volet #1 et #2 ont été soumis à la PCG. Les tableaux XX et XXI illustre les granulométries, l'aptitude au compactage, les valeurs des VAM et VCB, et les valeurs relatives au bitume des enrobés confectionnés respectivement dans le cadre des volets 1 et 2.

Tableau XX

Granulométrie et aptitude au compactage des enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1 : variation de la teneur en filler

Granulométrie						
Tamis	EG10-7,2 ⁽¹⁾	EG10-8,6	EG10-9,4	EG10-10,2	EG10-11,1	
28 mm	100	100	100	100	100	
20 mm	100	100	100	100	100	
14 mm	100	100	100	100	100	
10 mm	99	99	99	99	99	
5 mm	46	46	46	47	46	
2,5 mm	27	22	29	30	29	
1,25 mm	19	16	21	22	22	
630 µm	14	14	17	18	19	
315 µm	12	13	15	16	16	
160 µm	9,3	11	12	13	14	
80 µm	7,2	8,6	9,4	10,2	11,1	
Aptitude au compactage						
Vides à 10 girations (%)	21,0	20,9	17,8	16,0	16,8	EXIGENCES > 11
Vides à 80 girations (%)	12,9	13,1	8,8	6,7	7,8	4 à 7
Vides à 200 girations (%)	10,6	11,1	6,2	4,0	5,1	> 2
VAM et VCB						
à 10 girations (%)	30,8 / 31,9	30,7 / 32,0	27,9 / 36,5	26,4 / 39,4	27,1 / 38,1	
à 80 girations (%)	23,7 / 45,7	23,9 / 45,2	20,1 / 56,2	18,2 / 63,5	19,2 / 59,5	
à 200 girations (%)	21,7 / 51,1	22,1 / 50,0	17,8 / 65,2	15,9 / 75,1	16,9 / 69,8	
Valeurs relatives au bitume						
FBE - MTQ (µm)	8,8	7,9	7,1	6,6	6,2	
Vbe (%)	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	
Pb (%)	6,1	5,7	5,9	5,7	5,5	
Pbe (%)	1,3	0,9	1,1	0,9	0,7	
Dnm	2,584	2,580	2,579	2,571	2,570	

⁽¹⁾ Enrobé de référence

Concernant l'ouvrabilité et les exigences du MTQ, seul l'enrobé EG10-10,2 est conforme. Par ailleurs, le VAM est calculé en additionnant les vides interstitiels (Vi) et le volume de bitume effectif (Vbe) exprimé par rapport au volume de l'enrobé compacté. Ainsi, le Vbe exprimé par rapport au volume de l'enrobé à 0% de vides interstitiels (valeur du Vbe exigée lors de la formulation (tableau XIV)) doit donc être ramenée par rapport au volume de l'enrobé incluant les vides interstitiels (Vi).

$$VAM(\%) = \frac{Vbe \times (100 - Vi)}{100} + Vi \quad (\text{éq. 5.1})$$

Les vides comblés par le bitume (VCB) composent le volume des vides intergranulaires (VAM) occupé par le volume de bitume effectif (Vbe), exprimé en pourcentage du volume des vides intergranulaires (VAM).

$$VCB(\%) = \frac{V_{be}}{VAM} \times 100 \quad (\text{éq. 5.2})$$

Tableau XXI

Granulométrie et aptitude au compactage des enrobés confectionnés dans le cadre du volet 2 : ajout de sable roulé

Granulométrie					
Enrobé	EG10-7,2	EG10-7,2-SN12	EG10-7,2-SN15	EG10-7,2-SN18	
Tamis	Enrobé de référence	Ajout de sable naturel			
		12%	15%	18%	
28 mm	100	100	100	100	
20 mm	100	100	100	100	
14 mm	100	100	100	100	
10 mm	99	99	99	99	
5 mm	46	45	44	44	
2,5 mm	27	25	26	29	
1,25 mm	19	21	22	25	
630 µm	14	17	19	21	
315 µm	12	13	13	14	
160 µm	9,3	9,2	9,2	9,3	
80 µm	7,2	7,2	7,1	7,1	
Aptitude au compactage				EXIGENCES	
Vides à 10 girations (%)	21,0	18,8	16,9	14,0	> 11
Vides à 80 girations (%)	12,9	11,3	8,9	5,5	4 à 7
Vides à 200 girations (%)	10,6	9,1	6,6	2,9	> 2
VAM et VCB					
à 10 girations (%)	30,8 / 31,9	28,8 / 34,7	27,2 / 37,9	24,6 / 43,1	
à 80 girations (%)	23,7 / 45,7	22,2 / 49,1	20,1 / 55,7	17,2 / 68,0	
à 200 girations (%)	21,7 / 51,1	20,3 / 55,2	18,1 / 63,5	15 / 80,7	
Valeurs relatives au bitume					
FBE - MTQ (µm)	8,8	8,5	8,4	8,2	
Vbe (%)	12,4	12,4	12,4	12,4	
Pb (%)	6,1	5,7	5,4	5,6	
Pba (%)	1,3	0,9	0,6	0,8	
Dmm	2,584	2,577	2,568	2,571	

Seul l'enrobé EG10-7,2-SN18 respecte les exigences du MTQ concernant l'ouvrabilité.

5.3 Résistance à l'orniérage des enrobés

La résistance à l'orniérage a été déterminée sur six enrobés, trois pour chacun des volets. Le tableau XXII illustre les valeurs des ornières relatives à chacun des enrobés et le taux de compactage avant l'essai à l'orniéreur.

Tableau XXII

Orniérage des six enrobés

Orniérage (%)							
Nombre de cycles à chaud	EG10-7,2	EG10-9,4	EG10-10,2	EG10-7,2-12	EG10-7,2-15	EG10-7,2-18	EXIGENCES
100	3,0	3,3	3,8	5,5	4,9	6,9	---
300	4,4	4,3	4,8	7,7	6,6	7,4	---
1 000	5,7	6,1	6,2	12,7	10,2	9,3	< 10
3 000	7,8	7,3	7,3	n/m **	14,5	11,3	< 20
10 000	n/m **	30,1	9,5	n/m **	n/m **	19,4	---
30 000	n/m **	n/m **	12,3	n/m **	n/m **	n/m **	---
Compacité (%) *	92,3	94,6	n/m **	92,8	94,7	96,4	95 ciblé
VAM - 80 girations	23,7	20,1	18,2	22,2	20,1	17,2	---

* Compacité des plaques d'enrobé avant l'essai à l'orniéreur

** Ces résultats ne sont pas mesurables en raison des trop grandes déformations

Le taux de compactage des plaques d'enrobé soumises à l'orniéreur est à peu près égal au taux de compactage mesuré à 80 girations à l'aide de la PCG (100% – vides à la formulation (%)). Les enrobés qui ornièrent le moins au début finissent par avoir de très grandes déformations au fil des sollicitations. Les enrobés constituant les optimums à la PCG sont les plus performants face à l'orniérage.

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente l'analyse des résultats obtenus des essais de laboratoire du programme expérimental et présentés au chapitre 5. L'analyse vise à faire ressortir l'influence du dosage en filler et de l'ajout de sable roulé sur l'ouvrabilité et la résistance à l'orniéage, et d'en cibler, dans la mesure du possible, le niveau de corrélation du couple ouvrabilité-orniéage.

6.1 Couple ouvrabilité-orniéage

Afin de mettre en relief le niveau de corrélation entre le couple ouvrabilité-orniéage, il convient d'analyser brièvement, dans un premier temps, les résultats obtenus à la PCG et à l'orniéage selon les facteurs ciblés. Cette analyse sera traitée en deux volets : 1) l'influence du dosage en filler et 2) l'influence de la substitution simple de sable.

6.1.1 Influence du dosage en filler (volet 1)

L'objectif du volet 1 était, a priori, de formuler un enrobé possédant une granulométrie au centre du fuseau granulométrique exigé (tableau VIII) et d'ajuster la teneur en filler afin d'obtenir une ouvrabilité acceptable. Les résultats obtenus pour les essais à la PCG seront traités dans un premier temps et, dans un deuxième temps, la performance à l'orniéage des enrobés sera exposée.

6.1.1.1 Aptitude au compactage

A partir des résultats du tableau XX, la figure 21 illustre l'influence du filler sur l'aptitude au compactage évalué à la PCG et ce, à 10, 80 et 200 girations. Les résultats indiquent que l'ajout de filler a pour effet d'améliorer l'aptitude au compactage et sont en accord avec la littérature, seul le résultat de l'enrobé EG10-8,6 ne suit pas cette tendance.

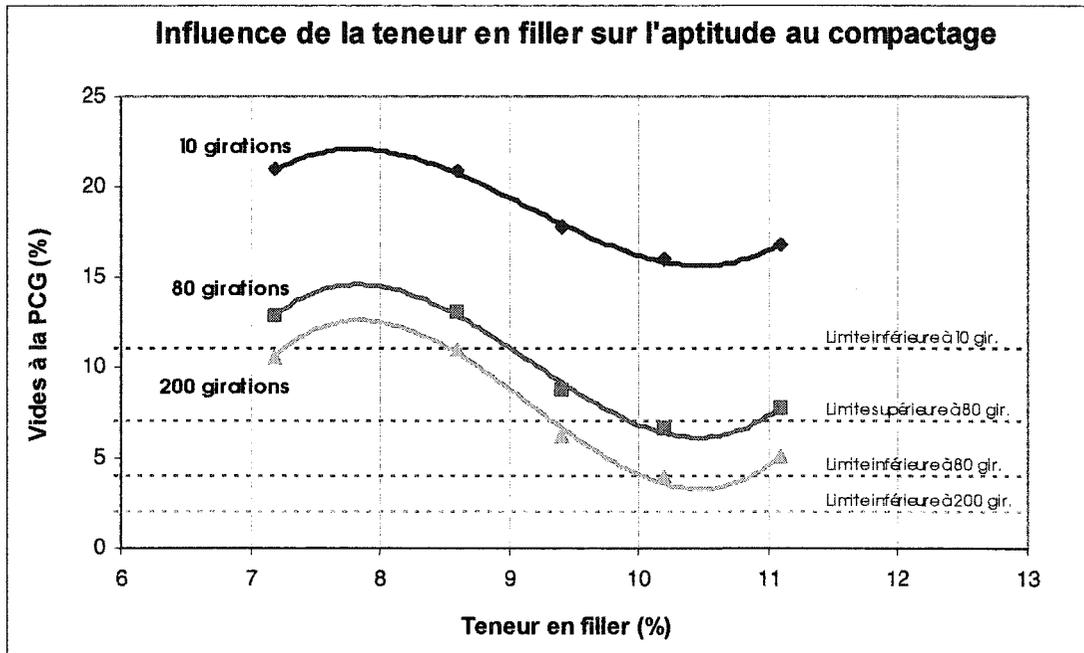


Figure 21 Influence de la teneur en filler sur l'aptitude au compactage (volet 1)

Les résultats présentés à la figure 21 montrent clairement une valeur optimale au niveau du dosage en filler vis-à-vis l'aptitude au compactage, soit une valeur comprise entre 9,5 et 11% de filler. Il a été évoqué dans le cadre de la revue de la littérature (section 1.3.3.7) qu'un surdosage en filler peut s'avérer néfaste du fait qu'un volume trop important de particules fines peut produire un desserrement au niveau de la structure granulaire. Or, les résultats présentés à la figure 21 indiquent que la teneur en vides à la formulation est minimale quand la teneur en filler est autour de 10,2% et que de part et

d'autre de cette valeur, le filler remplit certes une partie des vides, mais qu'au-delà de la valeur optimale, un surdosage en filler induit un desserrement de la structure granulaire. Il est intéressant de souligner que le MTQ impose une teneur en filler variant de 4 à 10% pour l'enrobé EG-10 (tableau VIII).

Pour les cinq enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1, l'écart relatif entre les vides mesurés à 10 et ceux mesurés à 200 girations varie de 9,8 à 12%. Plus l'enrobé est ouvrable, plus l'écart en vides entre 10 et 200 girations est élevé.

Il faut noter que les résultats de l'enrobé EG10-8,6 présentés à la figure 21 sont légèrement différents des autres enrobés. En comparant attentivement la granulométrie des cinq enrobés à teneur variable en filler, il est possible de constater que la fraction de particules aux tamis de 2,5mm, 1,25mm et de 630 μ m de l'enrobé EG10-8,6 diverge sensiblement par rapport à celles des autres enrobés. Dans le cas de l'enrobé EG10-8,6, c'est essentiellement le changement de granulométrie sur ces tamis qui est à l'origine des écarts observés à la PCG.

6.1.1.2 Résistance à l'orniérage

Après avoir obtenu des résultats intéressants à la PCG, trois enrobés sur cinq ont été soumis à l'essai à l'orniéreur pour évaluer l'influence du dosage en filler sur le couple ouvrabilité-orniérage.

La figure 22 présente l'influence du dosage en filler sur la résistance à l'orniérage des enrobés testés établie à partir des résultats présentés au tableau XXII. Jusqu'à 1000 cycles, l'augmentation de la teneur en filler se traduit par une faible diminution de la performance à l'orniérage, laquelle semble prendre de plus en plus d'importance au fur et à mesure que le dosage augmente. A priori, selon la synthèse de la littérature, on aurait pu s'attendre à plus d'orniérage pour l'enrobé contenant 7,2% de filler puisque le

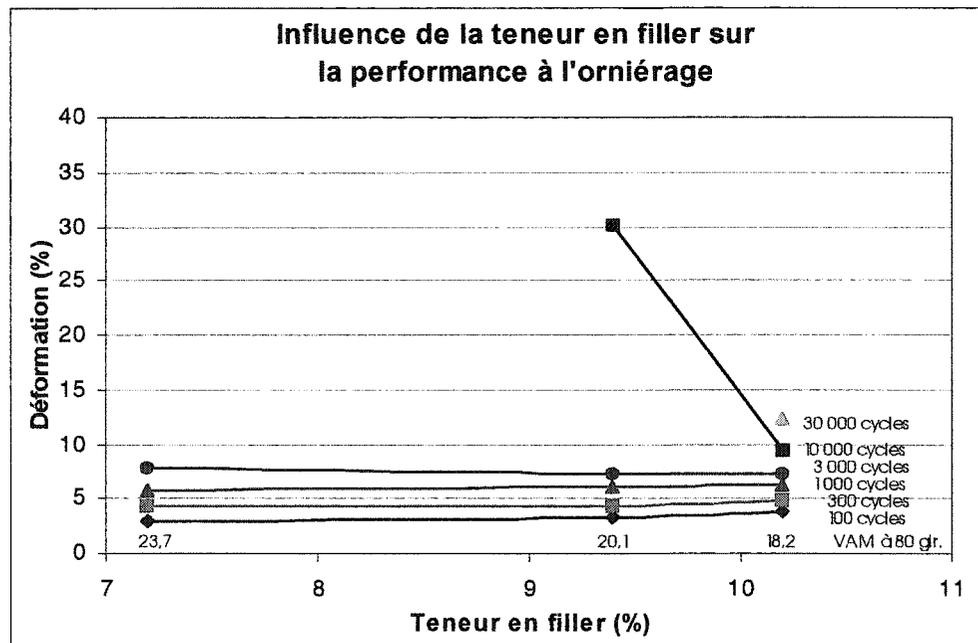


Figure 22 Influence de la teneur en filler sur la performance à l'orniérage

VAM évalué à 80 girations de l'enrobé de référence (EG10-7,2) est le plus élevé des trois enrobés testés. Or, curieusement, la tendance des résultats est plutôt à l'inverse!

Par ailleurs, avec l'évolution des cycles à l'orniéreur, au delà de 1000 cycles, la situation change littéralement : l'enrobé contenant 7,2% de filler (EG10-7,2) présente un pourcentage d'orniérage plus important que les deux autres. Par conséquent, au-delà de 1000 cycles, les résultats à l'orniérage vont dans le même sens que ceux présentés dans la littérature : un potentiel à l'orniérage accru lorsque le VAM de l'enrobé augmente.

En définitive, les résultats indiquent la présence de deux étapes distinctes qui caractérisent l'évolution à l'orniérage entre les trois enrobés étudiés dans le volet 1. Pour mieux illustrer cet aspect, la figure 23 présente l'évolution de la déformation en cours d'essais à l'orniéreur pour les trois enrobés testés. Bien que l'enrobé EG10-10,2 présente le degré d'orniérage le plus élevé dans les 1 000 premiers cycles (figure 22), sa performance générale montre un rendement totalement différent au-delà de 1 000 cycles

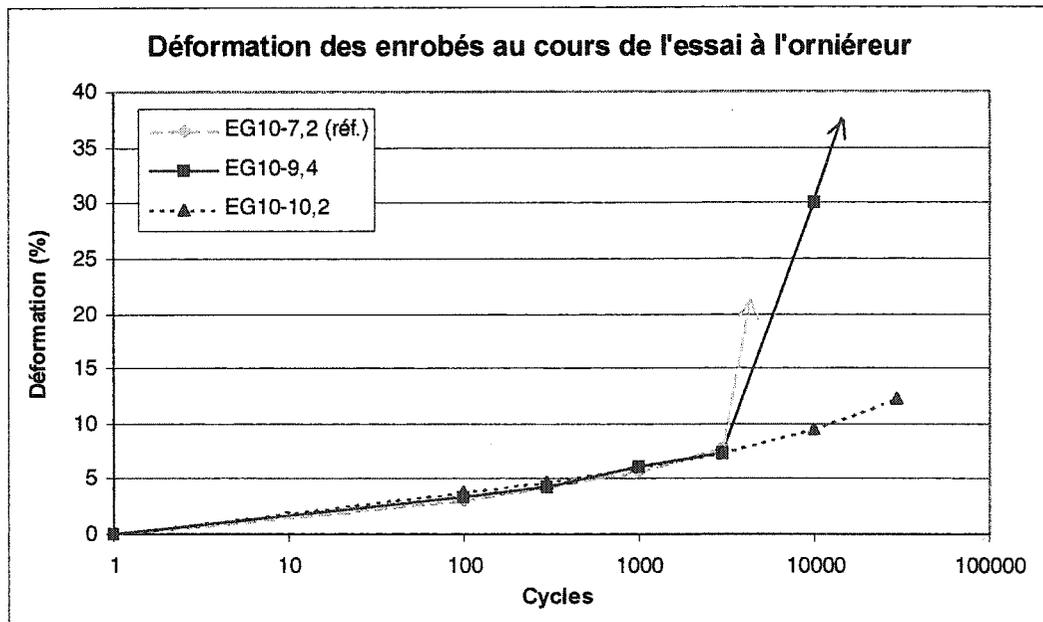


Figure 23 Évolution de l'orniérage des trois enrobés présentant diverses teneurs en filler

(figure 23). De surcroît, l'enrobé EG10-7,2 présente un piètre rendement au-delà de 3 000 cycles et ce, malgré une performance très acceptable dans les premiers cycles (< 1 000). En fait, en raison de la piètre performance à l'orniérage des enrobés EG10-7,2 et EG10-9,4, les essais ont été interrompus entre 3 000 et 10 000 cycles pour l'enrobé EG10-7,2 et à 10 000 cycles pour l'enrobé EG10-9,4.

Comment expliquer un tel comportement? Il est clair que le fait d'augmenter la teneur en filler permet de combler une partie des vides entre les particules grossières et d'assurer ainsi un certain blocage du squelette granulaire. Toutefois, cet effet bénéfique du dosage croissant en filler peut s'avérer nuisible dans le cas d'un surdosage (plus de 10,2% de filler). Un surdosage en filler se traduit par un desserrement de la structure granulaire qui nuit finalement à l'agencement optimal des particules.

Les résultats montrent clairement que la mesure de la déformation à l'orniérage est une mesure globale qui est conditionnée par deux mécanismes de base : un orniérage de

consolidation, plus important lorsque le VAM est grand, et un orniéragé par fluage, fortement tributaire de la rhéologie du mastic et du bitume.

En regard des résultats obtenus, l'augmentation de la teneur en filler dans l'enrobé accroît l'orniéragé initial (premiers cycles à l'orniéreur) et ce, en dépit du fait que le VAM de l'enrobé en soit réduit, mais abaisse l'orniéragé global des enrobés (grand nombre de cycles).

Afin de mieux cerner ce qui se passe dans le processus d'orniéragé des enrobés testés, une analyse plus raffinée des résultats obtenus à la PCG peut s'avérer intéressante. Le tableau XXIII présente la synthèse de la compacité des plaques d'enrobé soumises à l'essai d'orniéragé et des briquettes obtenues à la PCG pour les trois enrobés, EG10-7,2, EG10-9,4 et EG10-10,2.

Tableau XXIII

Synthèse de la compacité des plaques soumises à l'orniéreur
et des briquettes obtenues à la PCG

		EG10-7,2 ⁽¹⁾		EG10-9,4		EG10-10,2	
		Vides	Taux de Compaction	Vides	Taux de Compaction	Vides	Taux de Compaction
PCG	10 girations	21,0	79,0	17,8	82,3	16,0	84,0
	80 girations	12,9	87,2	8,8	91,2	6,7	93,4
	200 girations	10,6	89,4	6,2	93,8	4,0	96,1
Plaques soumises à l'orniéreur		7,7	92,3	5,4	94,6	n/m	n/m

⁽¹⁾ Enrobé de référence

Les résultats du tableau XXIII sont portés en graphique à la figure 24 et permet de comparer, en relation avec la teneur en filler des enrobés, le taux de compaction des plaques soumises à l'orniéreur et celui des briquettes obtenues à la PCG. Une étroite relation peut être observée entre le taux de compaction atteint suivant la procédure de mise en œuvre établie pour la confection des plaques et celui mesuré pour les briquettes

à la PCG. Toutefois, le degré de compaction obtenu pour la plaque ne correspond pas à celui des briquettes mesuré à " N_{design} " (80 girations).

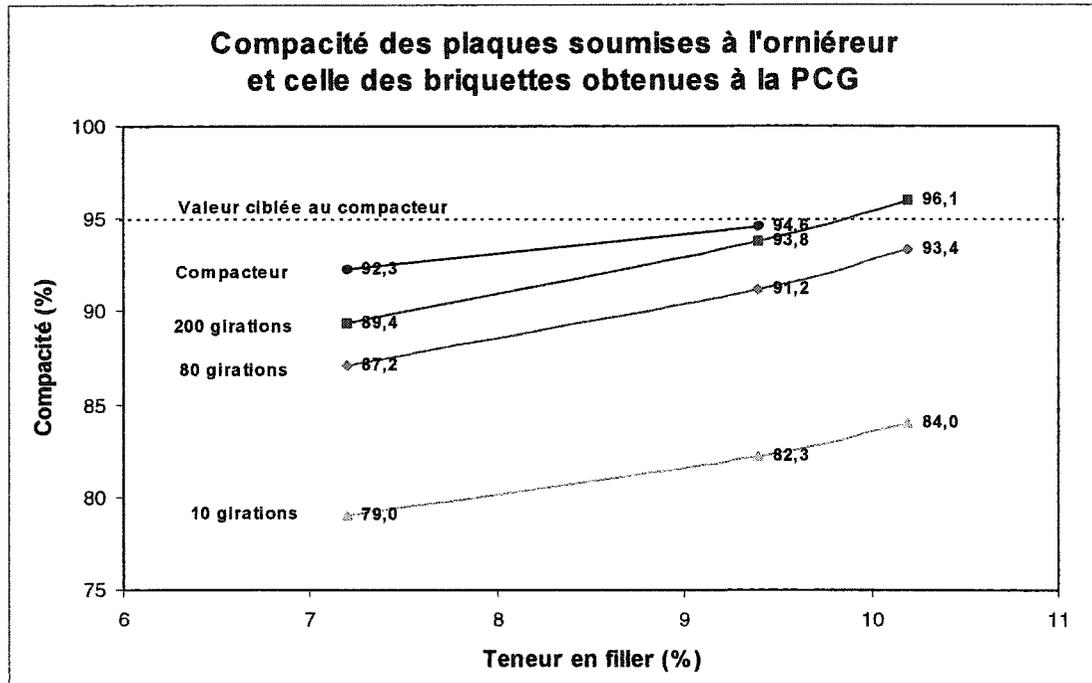


Figure 24 Relation entre la compacité des plaques soumises à l'orniéreur et celle des briquettes obtenues à la PCG (variation de la teneur en filler)

Il est clair que le taux de compaction des plaques confectionnées à l'aide du compacteur de plaques peut donner lieu non seulement à un taux de compaction inférieur à celui mesuré à 80 girations (N_{design}) mais également supérieur à celui établi après 200 girations! En effet, pour les enrobés EG10-7,2 et EG10-9,4, les plaques soumises à l'orniéreur présentaient respectivement un taux de compaction de 92,3% et 94,6%, des valeurs largement supérieures au taux de compaction mesuré après 200 girations à la PCG pour ces enrobés (89,4% pour l'EG10-7,2 et 93,8% pour l'EG10-9,4). En définitive, le taux de compaction des plaques peut s'avérer très différent de celui prédit à la PCG et se rapprocher de ce qu'il convient d'appeler le "taux de compaction maximal". Le "taux de compaction maximal" ou le "confinement maximal" de la structure granulaire pourrait être obtenu en soumettant à un nombre infini de girations les

éprouvettes à la PCG en condition isotherme, soit jusqu'à ce que le taux de compaction se stabilise. Par estimation, les éprouvettes pourraient être soumises à plus de 700 girations à la PCG avant de mesurer leur "taux de compaction maximal".

Pour bien comprendre l'évolution de la déformation à l'orniérage, il convient de se référer à la notion de "taux de compaction maximal " au-delà duquel la déformation à l'orniérage sera essentiellement attribuée au fluage de l'enrobé : orniérage associé au déplacement de ces particules, plutôt qu'un phénomène de post-compaction. La compaction effectuée par le compacteur de plaques, plus énergétique, permet dans certains cas d'attendre un taux de compaction voisin du "taux de compaction maximal", lequel peut s'avérer en dessous ou au-dessus de la valeur ciblée de 95%, dépendant de la granulométrie de l'enrobé.

Dans le contexte du couple ouvrabilité-orniérage, il est important de rappeler que la performance à l'orniérage de l'enrobé dépend de sa teneur en vides, laquelle est optimale entre 6 à 7% (compacité de 93 à 94%). De surcroît une surcompaction de l'enrobé est encore plus critique qu'une sous-compaction. Ceci étant dit, la compacité obtenue à la préparation des plaques pour l'essai d'orniérage pour l'enrobé EG10-7,2 (92,3%) est nettement plus voisine de la compacité optimale (93 à 94%) expliquant ainsi, en grande partie, la meilleure performance de cet enrobé au cours des premiers cycles d'essai (< 1000 cycles).

Dans le cas d'un enrobé non conforme aux exigences de la PCG à 80 girations, il est plus que probable que lors du compactage des plaques, le taux de compaction puisse être bien au-delà de celui mesuré à la PCG et ce, après 200 girations. Lors du compactage des plaques, les enrobés EG10-7,2 et EG10-9,4, non conformes à la PCG, ont présenté un taux de compaction inférieur à la valeur cible, fixée à 95%. En analysant les valeurs du tableau XXIII traitant de la compacité des plaques soumises à l'orniéreur et celles des briquettes obtenues à la PCG, ceci nous laisse présumer que la compacité des plaques de

l'enrobé EG10-7,2 est sûrement plus près de son "taux de compaction maximal" que l'EG10-9,4.

Bien que le taux de compaction des plaques de l'enrobé EG10-7,2 se rapproche du taux de compaction optimale en terme de la résistance à l'orniérage, cette compacité est plus que probable voisine de sa compacité maximale réduisant ainsi le potentiel de post-compaction de cet enrobé. Étant donné que la compacité des plaques de l'enrobé EG10-7,2 est sûrement plus près de son "taux de compaction maximal" que l'EG10-9,4, ceci implique qu'il atteint plus rapidement (avant 1000 cycles) une structuration optimale de sa masse granulaire offrant ainsi un maximum de résistance à la déformation. Toutefois, le dépassement de ce confinement maximal en raison de la densification des plaques de l'enrobé EG10-7,2 par le passage répété du pneumatique (1000 cycles et plus) conduit inévitablement à une structure d'enrobé dense, avec très peu de vides, pour laquelle la performance à l'orniérage est tributaire de la cohésion (la rhéologie) du mastic (couple bitume-filler). La performance à l'orniérage est dès lors liée à la résistance au fluage de l'enrobé. Pour l'enrobé EG10-7,2, l'orniérage de fluage se fait sentir plus rapidement après 1000 cycles que pour les autres enrobés puisque le manque de particules fines ne permet pas, entre-autres, un blocage efficace des plus grosses particules.

En résumé, lors de l'essai à l'orniéreur, les plaques de l'enrobé EG10-7,2 présentaient un VAM élevé et un Vi également élevé, 23,7% et 7,7% respectivement, permettant de mieux résister à l'orniérage de consolidation puisque l'air amortit les contraintes dues au passage du pneumatique. Avec le temps, on passe d'un orniérage de consolidation à un orniérage de fluage. À partir de ce stade, la structure granulaire de l'enrobé EG10-7,2 flue rapidement puisque la teneur en filler n'est pas optimale, c'est à dire que les particules fines ne permettent pas de restreindre le mouvement des plus grosses. À l'inverse, l'enrobé EG10-10,2 présente un meilleur taux de compaction suite à la préparation des plaques : VAM et Vi nettement plus faibles soit, 18,2% et 5,4%, plus loin de la compacité optimale pour résister à l'orniérage (93 à 94%). Rapidement, pour

l'enrobé EG10-10,2, on passe d'un orniérage de consolidation à celui de fluage en raison de sa basse teneur en vides. Par contre, la présence optimale en filler au sein du squelette granulaire permet de limiter l'évolution rapide de l'orniérage par fluage.

6.1.2 Substitution de particules angulaires par du sable roulé (volet 2)

Pour ce volet, l'objectif était de prendre l'enrobé possédant la moins bonne ouvrabilité dans les cinq enrobés du volet 1, l'enrobé de référence (EG10-7,2), et d'améliorer son aptitude au compactage en y ajoutant du sable naturel, soit un sable roulé.

Encore une fois l'analyse des résultats portera dans un premier temps sur l'aptitude au compactage des enrobés réalisés dans le cadre du volet 2 et, dans un deuxième temps, leur performance à l'orniérage sera traitée.

6.1.2.1 Aptitude au compactage

La figure 25 illustre l'influence de l'ajout de sable roulé sur l'aptitude au compactage établie à partir des résultats du tableau XXI (section 5.2). Les résultats indiquent que l'ajout de particules arrondies permet d'accroître l'ouvrabilité des enrobés en raison, probablement, de la baisse de la qualité des points de contact entre les particules.

L'ajout de 12% de sable à béton s'est traduit par une faible amélioration de l'aptitude au compactage. Pour cette teneur en sable, la baisse de la qualité des points de contact a permis d'améliorer l'aptitude au compactage, toutefois cette amélioration est modérée. En plus de modifier la qualité des points de contact entre les particules, l'ajout du sable roulé a comme conséquence de modifier la granulométrie de la masse granulaire et, notamment, de donner lieu à une granulométrie qui s'éloigne de celle correspondant à la CMVM. Cet effet sur le VAM est plus ou moins important dépendamment de la teneur

en sable incorporée dans l'enrobé. A la lueur des résultats, pour un ajout en sable de moins de 12%, il semble que la baisse de la qualité des points de contact joue un rôle prédominant sur l'aptitude au compactage par rapport à l'évolution du VAM lié au changement de granulométrie par l'ajout de sable roulé qui force l'éloignement de la granulométrie du combiné de celle de la CMVM.

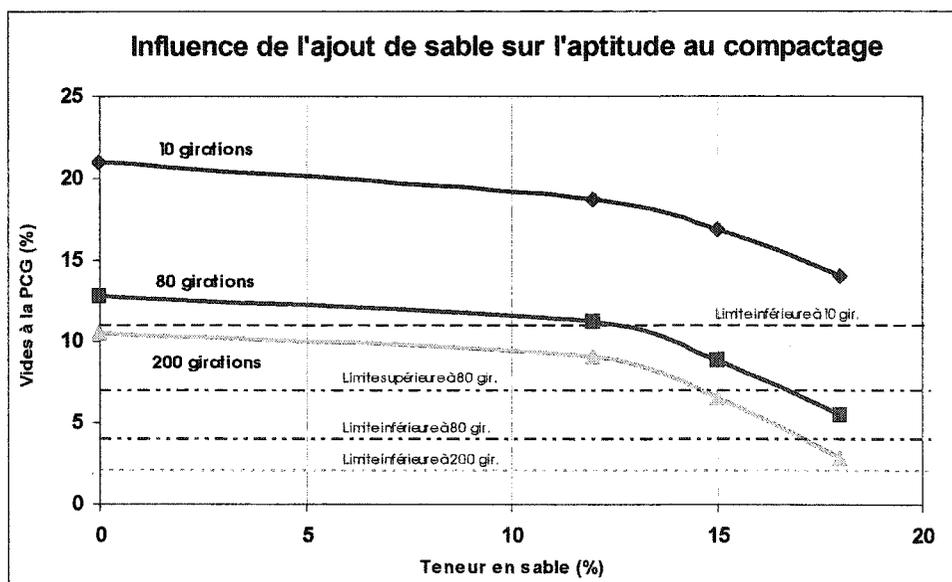


Figure 25 Influence de l'ajout de sable sur l'aptitude au compactage

D'autre part, pour un ajout en sable supérieur à 12%, la réduction de la qualité des points de contact et le changement du VAM par l'évolution de la granulométrie (rapprochement de la CMVM) permettent d'obtenir une meilleure aptitude au compactage. Il aurait été intéressant d'avoir des granulométries semblables entre les enrobés contenant des particules de sable roulé afin d'isoler l'importance de la qualité des points de contact de celui du VAM lié à la variation de la granulométrie du combiné granulaire sur le couple ouvrabilité-orniérage. À partir d'une granulométrie contrôlée, c'est-à-dire par une substitution des particules angulaires par des particules arrondies sans changer la granulométrie de la masse granulaire, il aurait été possible de quantifier l'importance relative de ces deux paramètres : l'importance de la qualité des points de

contact versus celle de la granularité du combiné (modification du VAM). Cet aspect sera traité ultérieurement.

Finalement, un dernier point à souligner est que l'écart relatif entre le volume des vides à 10 et celui à 200 girations varie de 9,7 à 11,1 pour les trois (3) enrobés contenant du sable naturel. Ces écarts sont très similaires à ceux obtenus pour les cinq enrobés présentant diverses teneurs en filler : 9,8 à 12% (section 6.1.1.1). La même conclusion s'impose : plus cet écart est élevé, plus l'enrobé présente une bonne ouvrabilité.

6.1.2.2 Résistance à l'orniérage

La figure 26 illustre l'influence de l'ajout de sable sur la résistance à l'orniérage des enrobés testés établie à partir des résultats du tableau XXII (section 5.3). Il est important de souligner qu'au moment où le degré de la déformation des plaques est trop important, soit des ornières trop prononcées, la mesure des élévations d'ornières ne peut pas être

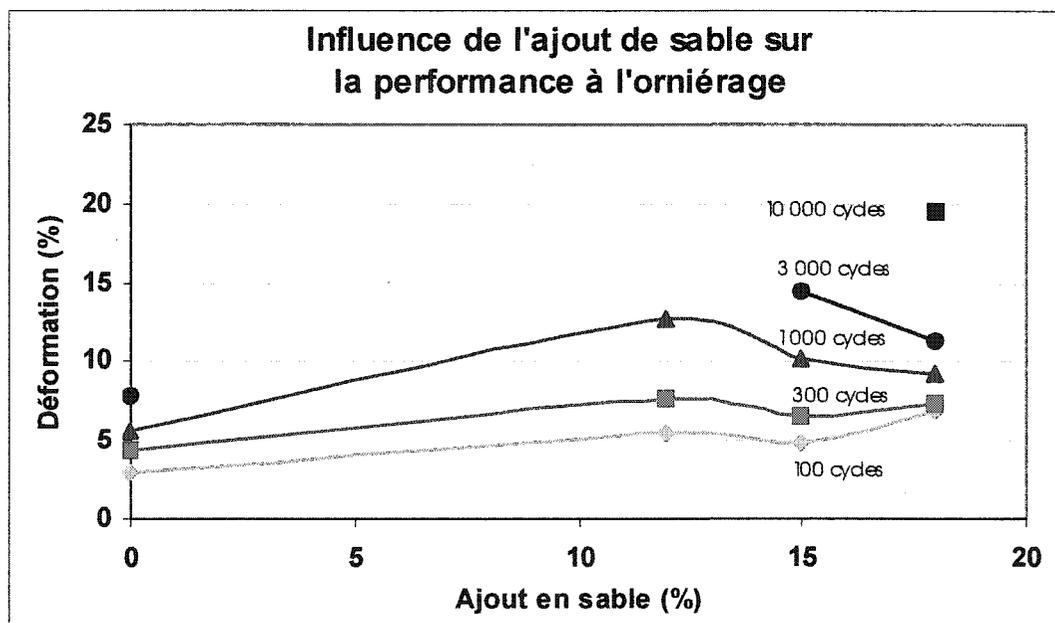


Figure 26 Influence du sable sur la performance à l'orniérage

effectuée. Les mesures d'ornières ont donc été effectuées jusqu'à 1 000 cycles pour l'enrobé EG10-7,2-SN12, 3 000 cycles pour l'enrobé EG10-7,2-SN15 et jusqu'à 10 000 cycles pour l'EG10-7,2-SN18. Dans le cas de l'enrobé EG10-7,2, les mesures d'ornières ont été arrêtées entre 3 000 et 10 000 cycles en raison de la déformation élevée des plaques. Il aurait été intéressant de mesurer l'élévation des ornières à 10 000 cycles afin de bien caractériser sa résistance à l'orniérage.

Pour un dosage inférieur à 12% en sable roulé, la figure 26 illustre bien que l'ajout de sable abaisse la performance à l'orniérage des enrobés. Par contre pour un dosage supérieur à 12%, l'augmentation de la teneur en sable fait en sorte que l'orniérage initial se fait de plus en plus rapidement (300 cycles et moins) et que par la suite, l'orniérage subséquent diminue progressivement (300 cycles et plus).

Pour mieux comprendre ce qui se passe lors d'un ajout graduel en sable à béton, un nouvel enrobé contenant un dosage intermédiaire en sable, compris entre 0 et 12%, soit un dosage de 5% en sable (enrobé EG10-7,2-SNA5) a été formulé. Compte tenu de l'épuisement des réserves en sable roulé utilisé pour la confection des enrobés contenant 12, 15 et 18% de sable SN, l'enrobé EG10-7,2-SNA5 a été confectionné à partir d'un autre sable roulé, le sable SNA. La granularité du sable SNA a été ajustée à celle du sable roulé SN. Les propriétés du sable roulé SNA sont présentées au tableau XXIV.

Pour l'enrobé EG10-7,2-SNA5, seule la résistance à l'orniérage a été évaluée afin de mieux cerner l'évolution de la résistance à l'orniérage par ajout croissant d'un sable. La Dmm et le pourcentage de bitume utilisé pour le dosage de cet enrobé ont été estimés à partir des valeurs correspondantes pour les enrobés EG10-7,2 et EG10-7,2-SN12. Il est clair que la granulométrie de l'enrobé EG10-7,2-SNA5 est très près de celle de l'enrobé EG10-7,2.

Tableau XXIV

Propriétés du sable roulé SNA

Caractéristiques	Normes	Sable naturel arrondi 0-5
Identification	n / a	SNA
Source	n / a	Banc Savary à Farnham
Catégorie	LC 2101	2 *
Densité brute	NQ 2560-065, 067 et 350	2,640
Absorption en eau (%)	NQ 2560-065, 067 et 350	1,00 *
Friabilité (%)	NQ 2560-075	n / m
Fragmentation (%)	LC 21-100	n / a
Coefficient d'écoulement (Ce)	NQ 2560-075	71
Résistance à la fragm. Los Angeles (%)	LC 21-400	n / a
Résistance à l'usure micro-Deval (%)	NQ 2560-070 et LC 21-101	n / m
Granulométrie	Tamis (mm)	
	10	100 / 100 **
	5	95 / 45,7 **
	2,5	89 / 28,8 **
	1,25	78 / 21,3 **
	0,630	59 / 17 **
	0,315	32 / 14,5 **
	0,160	12 / 12 **
	0,080	4,2 / 9,4 **
n / a : non applicable		
n / m : non mesuré		
* La catégorie du sable et son absorption en eau ont été estimées.		
** À gauche et à droite, granulométrie d'origine et granulométrie utilisée pour la formulation (après tamisage du sable).		

Les résultats des essais à l'orniérage de l'enrobé EG10-7,2-SNA5 ont été couplés à l'ensemble des résultats des enrobés constitués avec 12, 15 et 18% de sable roulé SN de la figure 26 et présentés à la figure 27.

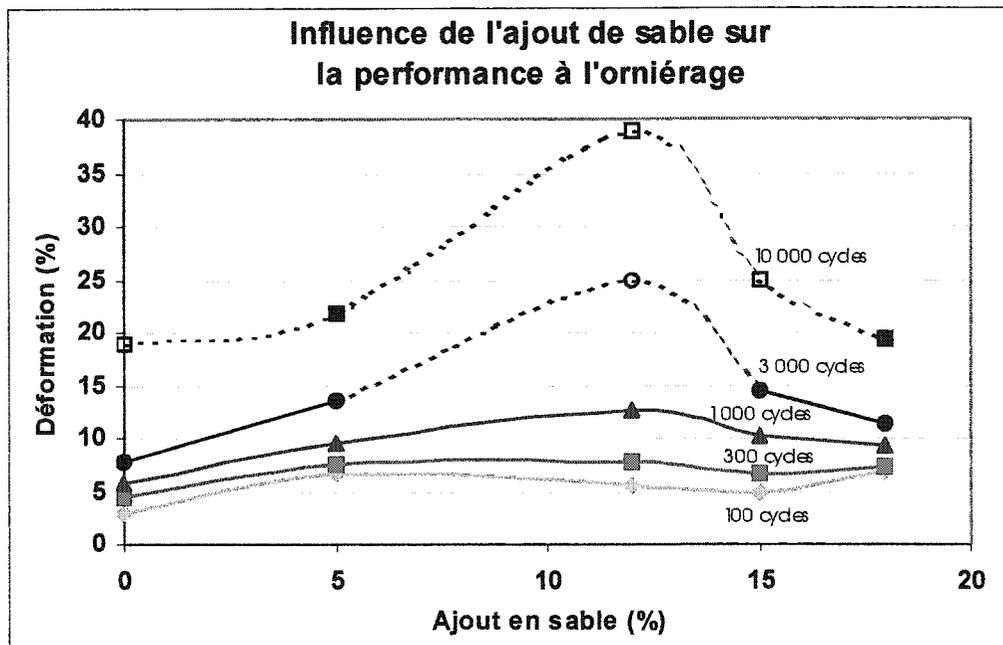


Figure 27 Influence de l'ajout de sable sur la performance à l'orniérage

Les points non remplis, présentés à la figure 27, constituent des valeurs estimées. Ces valeurs ont été estimées à partir de la tendance observée des courbes tracées de 100 à 1 000 cycles. Comme mentionné précédemment, bien que le niveau d'ornièr après 10 000 cycles pour l'enrobé EG10-7,2, n'a pas été mesuré, il est très probable qu'il serait inférieur à ceux obtenus pour les enrobés EG10-7,2-SNA5 et EG10-7,2-SN18 compte tenu du fait que le squelette granulaire de l'enrobé EG10-7,2 est constitué à 100% de particules angulaires.

Les résultats de l'enrobé EG10-7,2-SNA5 confirment la présence d'une valeur optimale au terme de la performance à l'orniérage lors de l'augmentation progressive de la teneur en sable roulé au sein du squelette granulaire d'un enrobé. La présence d'un optimum porte à croire qu'il y a un phénomène couplé, en raison de la hausse et de la baisse des déformations de part et d'autre de cet optimum, qui se manifeste par l'ajout d'un sable roulé.

Pour un dosage inférieur à 12%, la baisse de la performance à l'orniérage peut être associée à la réduction de la qualité des points de contact induite par la présence de particules très arrondies en remplacement des particules angulaires. Pour ces dosages en sable roulé, la baisse, non significative, du VAM ne peut contribuer à l'amélioration de la performance à l'orniérage de ces enrobés. Pour un dosage supérieur à 12%, la résistance à l'orniérage des enrobés est pondérée à la hausse.

Comment expliquer le fait qu'une augmentation du dosage en sable roulé, qui se traduit nécessairement par une réduction de la qualité des points de contact, se manifeste par une amélioration de la performance à l'orniérage de l'enrobé? De prime abord, cela paraît incohérent. Cependant, le phénomène peut être expliqué par l'énoncé suivant : à l'ajout de particules arrondies, la qualité des points de contact est rapidement mise en évidence, toutefois s'ajoute à cet effet un effet secondaire lié à l'agencement granulaire du squelette qui se traduit par une baisse du VAM qui dès lors joue un rôle de plus en plus important quant à la performance à l'orniérage des enrobés. La variation du VAM n'est pas simple à mettre en relief ici puisque la substitution de particules angulaires par des arrondies s'est traduit par un changement au niveau de la granulométrie des enrobés, quoique l'ajout de particules arrondies favorise un agencement plus optimal de la masse granulaire.

6.1.2.3 Sommaire

L'ajout d'un sable roulé, constitué de particules arrondies, se traduit inévitablement par une amélioration de l'aptitude au compactage et une perte au niveau de la performance à l'orniérage. Notamment, il est clair que la performance à l'orniérage liée à l'ajout d'un sable roulé va dépendre certes de l'évolution de la qualité des points de contact, laquelle est réduite en substituant des particules angulaires par des particules arrondies, mais également dépendante de l'évolution de l'agencement des particules au sein du squelette granulaire, lequel se traduit par une variation du VAM. À ce dernier point, il faut ajouter

que dans le cadre des enrobés testés, la variation du VAM est associable à deux éléments : 1) la présence de particules arrondies qui favorise la densification du squelette granulaire et 2) le changement de la granularité de l'ensemble du squelette granulaire, soit la distribution des particules.

6.1.3 Étude complémentaire portant sur l'influence des particules arrondies sur le couple ouvrabilité-ornièreage : volet 3

Suite au programme expérimental cherchant à mettre en perspective l'influence de l'ajout de particules arrondies par l'incorporation d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-ornièreage, nous avons été confrontés à l'effet couplé forme-distribution des particules limitant ainsi notre capacité de tirer des conclusions précises. Lequel de ces deux paramètres est le plus significatif? Pour satisfaire notre curiosité, il a été convenu d'étudier à nouveau l'effet de l'ajout de particules arrondies sur le couple ouvrabilité-ornièreage sans toutefois altérer la granulométrie de l'ensemble granulaire. Pour se faire, d'autres enrobés ont été confectionnés en substituant des particules anguleuses par des particules arrondies mais, cette fois, en prenant soin de ne pas modifier la granulométrie du squelette granulaire. En outre, cette nouvelle expérimentation prend en considération la granulométrie de l'enrobé EG10-9,4 plutôt que celle de l'enrobé EG10-7,2. La granulométrie de l'enrobé EG10-9,4 est nouvellement prise en compte afin de connaître la proportion en sable qu'il faudra pour obtenir une ouvrabilité adéquate et la comparer à celle qui a été requise pour l'enrobé EG10-7,2. Pour l'enrobé EG10-7,2, il a fallu un ajout en sable de 18%.

6.1.3.1 Formulation des enrobés à granulométrie fixe constitués d'un sable roulé

La figure 28 illustre la formulation des quatre nouveaux enrobés possédant des dosages variables en sable roulé SNA et dont la granulométrie est exactement la même que celle

% passant au 80µm				
7,2%	8,6%	9,4%	10,2%	11,1%
EG10-7,2	EG10-8,6	EG10-9,4	EG10-10,2	EG10-11,1

Ajout de sable arrondi (1)			Ajout de sable arrondi (1)
12%	15%	18%	5%
EG10-9,4-SNA12	EG10-9,4-SNA15	EG10-9,4-SNA18	EG10-9,4-SNA5,3-SPEC

(1) Même granulométrie que l'enrobé précédant

Figure 28 Formulation des quatre enrobés possédant la même granulométrie que l'enrobé EG10-9,4 (bitume PG 58-28; EG-10; Vbe de 12,4%)

de l'enrobé EG10-9,4. Les pourcentages représentant la quantité de sable ajouté font toujours référence à la portion granulaire seulement. Les quatre enrobés ont été formulés avec le même sable roulé SNA (tableau XXIII).

Le sable roulé SNA a été tamisé et reconstitué afin d'obtenir la granulométrie exacte de l'enrobé EG10-9,4. Cette façon de faire a permis de maintenir les rapports massiques constants entre les constituants : filler, pierres 0-2,5mm, 2,5-5mm et 5-10mm.

L'enrobé EG10-9,4-SNA5,3-SPEC a été confectionné dans le cadre de cette étude complémentaire avec un ajout de 5,3% de sable sur des tamis ciblés, soit les tamis de 315µm et 630µm. Cet ajout a été effectué en retirant des particules de même diamètre de la pierre concassée 0-2,5mm utilisée pour la confection des enrobés pour les substituer par des particules arrondies. L'enrobé EG10-9,4-SNA5,3-SPEC a été formulé afin de faire une corrélation avec la zone de restriction qui est comprise entre 315µm et 2,5mm, jugée critique vis-à-vis la performance à l'orniérage.

Les proportions de chacun de ces nouveaux enrobés confectionnés dans le cadre de cette étude complémentaire sont présentées au tableau XXV et le détail des dosages initiaux et finaux sont présentés à l'annexe 5.

Tableau XXV

Dosages finaux des enrobés à granulométrie contrôlée contenant du sable arrondi confectionnés dans le cadre de l'étude complémentaire

		TYPES D'ENROBÉS EG-10				
		EG10-9,4	EG10-9,4-SNA5	EG10-9,4-SNA12	EG10-9,4-SNA18	EG10-9,4-SNA5,3-SPEC
Dosage massique des différentes classes granulaires (%)	Filler	8,5	8,1	7,5	6,9	8,5
	0-2,5mm	17,0	16,1	14,9	13,9	12,0 *
	2,5-5mm	13,2	12,5	11,6	10,8	13,2
	5-10mm	55,6	52,7	48,8	45,5	55,6
	Sable arrondi	-	4,7 ⁽¹⁾	11,3 ⁽¹⁾	16,9 ⁽¹⁾	5,0 * ⁽¹⁾
	Pb (%)	5,81	5,90	5,95	5,91	5,81
	Pba réel (%)	1,01	1,11	1,14	1,09	1,02
	Dmm corrigée	2,576	2,573	2,565	2,557	2,577
* Sable : ajout de particules passant le tamis de 1,25mm et retenues sur le tamis de 315µm. Ces particules remplacent celles de même grosseur du granulat 0-2,5mm.						
⁽¹⁾ Pourcentage exprimé en rapport à la masse de l'enrobé.						

6.1.3.2 Aptitude au compactage

La figure 29 illustre les résultats de la mesure de l'aptitude au compactage des quatre nouveaux enrobés confectionnés et ceux de l'enrobé de référence (EG10-9,4) possédant tous la même granulométrie. Il est stupéfiant de constater que l'aptitude au compactage de ces cinq enrobés est très semblable. Ces résultats indiquent clairement que pour ces cinq enrobés, la forme arrondie des particules de sable influence que légèrement l'aptitude au compactage pour des dosages de l'ordre de ceux utilisés (inférieur à 18%).

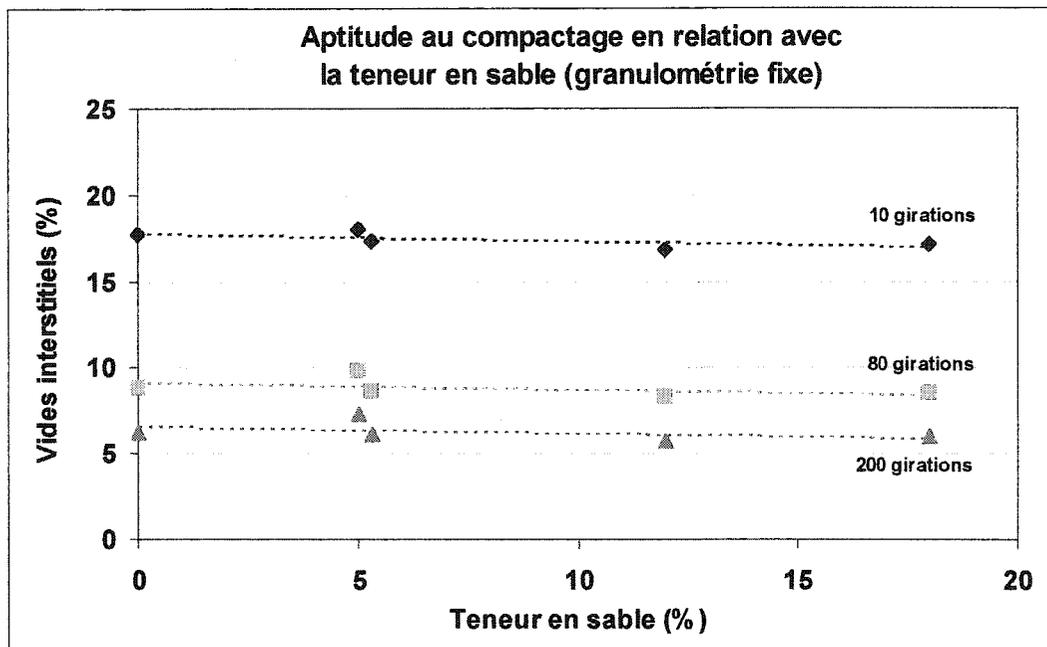


Figure 29 Aptitude au compactage des enrobés à granulométrie contrôlée contenant du sable arrondi

6.1.3.3 Résistance à l'orniérage

Sur les cinq enrobés à granulométrie contrôlée deux seuls ont été testés à l'orniéreur et les résultats sont présentés au tableau XXVI. Encore une fois, il est surprenant de constater que l'enrobé EG10-9,4-SNA5-SPEC possédant 5,3% de sable arrondi est plus performant à l'orniérage que l'enrobé EG10-9,4 constitué de particules angulaires seulement. Ce résultat n'est certes pas conventionnel, d'autant plus que l'ajout en sable pour l'enrobé EG10-9,4-SNA5-SPEC s'est fait essentiellement dans la zone de restriction.

Tableau XXVI

Performance à l'orniérage de deux enrobés à granulométrie contrôlée

Orniérage (%)		
Nombre de cycles à chaud	EG10-9,4	EG10-9,4-SNA5,3-SPEC
100	3,3	2,3
300	4,3	3,8
1 000	6,1	6,3
3 000	7,3	16,2
10 000	30,1	22,2
30 000	n/m	n/m
Compacité (%)	94,6	95,4

6.1.3.4 Sommaire

A granulométrie contrôlée, l'ajout de sable arrondi affecte légèrement l'aptitude au compactage et la résistance à l'orniérage des enrobés, ce qui n'est pas le cas pour les enrobés à granulométrie modifiée.

6.1.4 Réflexion portant sur l'influence des particules arrondies sur le couple ouvrabilité-orniérage

Dans le cadre du volet 3, les résultats obtenus illustrent que même un ajout de 18% de particules arrondies dans les enrobés à granulométrie contrôlée n'a qu'une faible influence sur le couple ouvrabilité-orniérage. Pourtant, le sable naturel SNA utilisé dans ce volet est plus arrondi que celui du volet 2. Il est à noter que l'ajout de particules arrondies modifie la qualité des points de contact de l'enrobé (2^{ème} critère de design). Ce critère de design devrait constituer un facteur important influençant le couple ouvrabilité-orniérage en raison du rang qu'il occupe dans le classement. Quoique dans le cadre du volet 2 (enrobés à granulométrie modifiée), l'ajout de particules arrondies

semble affecter fortement le couple ouvrabilité-ornièreage. Évidemment, dans le cadre du volet 2, il y a présence d'un effet combiné, soit la modification de la granulométrie et l'ajout de particules arrondies. La modification de la granulométrie affecte le troisième critère de design, soit la valeur du VAM.

Jusqu'à présent, en se basant sur les résultats obtenus dans le cadre du volet 2 et plus particulièrement ceux du volet 3, il semble bien que la modification de la granulométrie a un effet plus important sur le couple ouvrabilité-ornièreage que l'ajout de particules arrondies.

Par ailleurs, il est à souligner que la granulométrie de référence pour les deux volets est différente, granulométrie de l'enrobé EG10-7,2 pour le volet 2 et granulométrie de l'enrobé EG10-9,4 pour le volet 3. Étant donné que l'enrobé EG10-7,2 possède une moins bonne ouvrabilité que l'enrobé EG10-9,4, il est très probable qu'un changement quelconque ait une répercussion plus élevée sur son ouvrabilité que sur celle de l'enrobé EG10-9,4.

Est-ce seulement le changement de granulométrie qui peut expliquer le grand écart de comportement entre les enrobés des volets 2 et 3 possédant du sable arrondi? La prochaine section tentera d'éclaircir ce mystère en traitant de l'influence de la modification de la granulométrie (enrobés du volet 2) sur le couple ouvrabilité-ornièreage.

6.1.4.1 Modification de la granulométrie (élément du 3^{ième} critère de design)

Il est à souligner que la modification de la granulométrie a été considérée dans le cadre des volets 1 et 2. La figure 30 illustre la granulométrie des enrobés du volet 2 et permet de bien visualiser la modification de la granulométrie engendrée par l'ajout en sable.

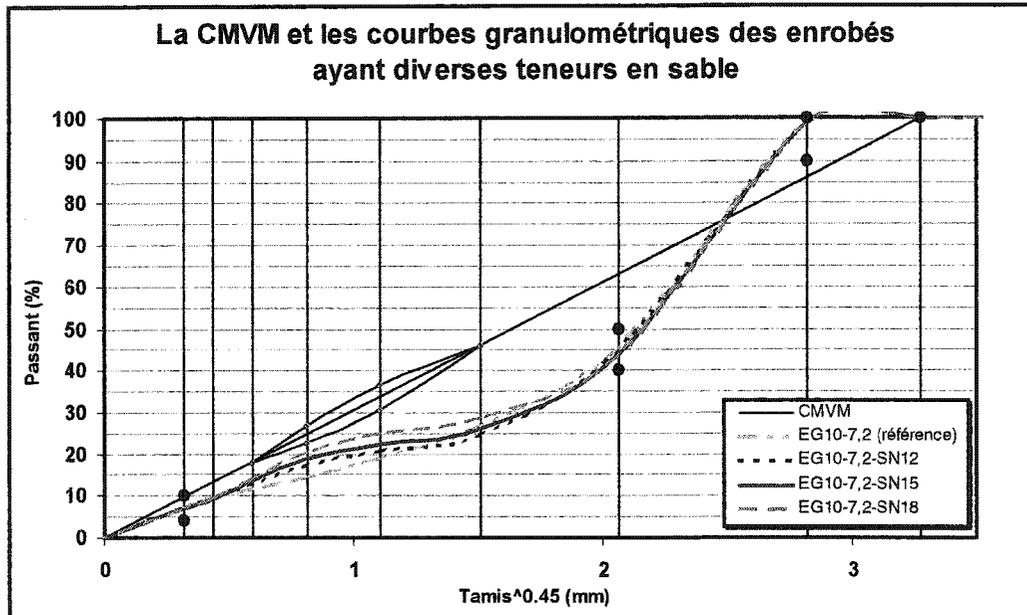


Figure 30 Granulométries des enrobés à granulométrie modifiée contenant diverses teneurs en sable

Un moyen simple de déterminer l'influence de la granulométrie sur le couple ouvrabilité-orniérage est de calculer l'écart (aire confinée) entre la CMVM et chacune des courbes granulométriques des enrobés. Plus la courbe granulométrique d'un enrobé est près de la CMVM, plus cet enrobé sera ouvrable, dans le cas où les caractéristiques des granulats et du bitume restent constantes (inchangées). La description détaillée de ce calcul sera fait ultérieurement à la section 6.1.5.3 traitant de la valeur du VAM (3^{ième} critère de design) se trouvant dans le bilan de la méthodologie. Par ailleurs, à la section 6.1.5.3, une analyse a été effectuée pour la teneur en filler (volet 1) et de très bonnes corrélations ont été trouvées.

La figure 31 illustre l'écart entre la CMVM et chacune des courbes granulométriques des enrobés ayant diverses teneurs en sable. La figure 31 illustre bien que l'ajout de sable engendre un éloignement des courbes granulométriques des enrobés EG10-7,2-SN12 et EG10-7,2-SN15 de la CMVM et ce, en rapport à l'enrobé de référence (EG10-7,2). Il est à considérer que l'écart se trouvant entre les enrobés EG10-7,2-SN15 et

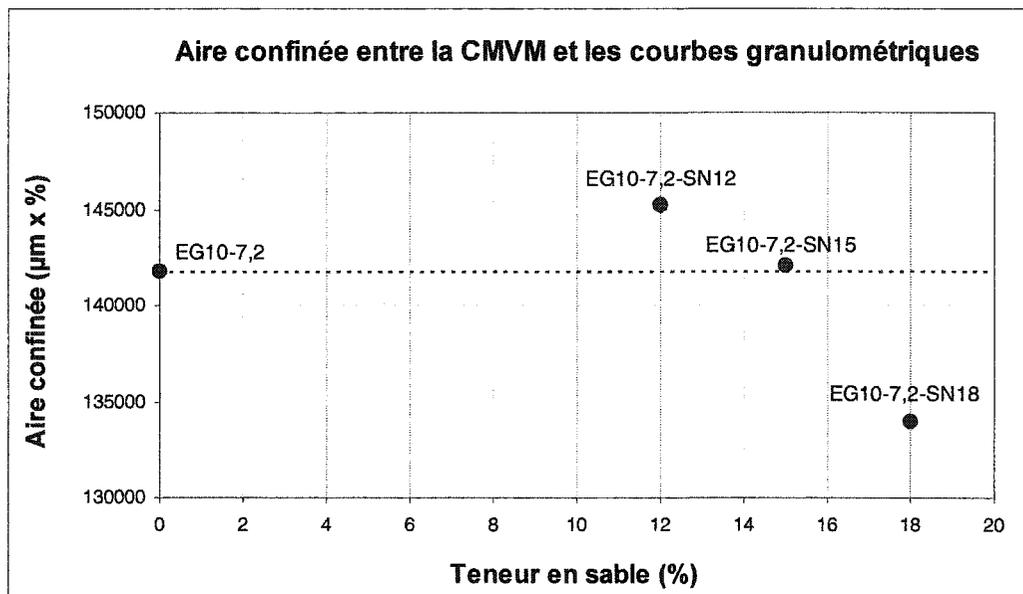


Figure 31 Aire confinée entre la CMVM et les courbes granulométriques de chacun des enrobés

EG10-7,2 est vraiment minimale. Pour l'enrobé EG10-7,2-SN18, l'ajout de sable a permis un rapprochement de sa courbe granulométrique de la CMVM comparativement à l'enrobé de référence (valeur plus faible de l'aire confinée). En considérant la granulométrie des enrobés et en excluant la baisse de la qualité des points de contact par l'ajout en sable favorisant l'ouvrabilité des enrobés, l'enrobé EG-10-7,2-SN18 devrait posséder une ouvrabilité supérieure aux enrobés EG10-7,2, EG10-7,2-SN15 et EG10-7,2-SN12 (par ordre décroissant d'ouvrabilité).

Les résultats obtenus dans le cadre du volet 2 démontrent bien que plus la teneur en sable est élevée, plus l'enrobé a une meilleure ouvrabilité et ce, sans tenir compte de leur granulométrie respective. En considérant les résultats du volet 2, il est finalement démontré que la modification de la granulométrie des enrobés a une faible influence sur le couple ouvrabilité-orniérage donnant plus de poids à l'ajout de particules arrondies. Pourquoi, dans ce cas, l'influence des particules arrondies dans le cadre du volet 3 peut être négligée et ce, pour des dosages jusqu'à 18% en sable et semblables à ceux utilisés

dans le cadre du volet 2? Il semble bien qu'il existe un autre facteur, autre que la granulométrie et l'ajout de particules arrondies en tant que tel qui affecte le couple ouvrabilité-ornière.

6.1.4.2 Dispersion des particules arrondies dans la structure granulaire

Après avoir effectué une analyse poussée, un élément important est ressorti, dans le cas d'un enrobé à granulométrie contrôlée, l'ajout du sable roulé s'est fait de façon uniforme sur la plupart des tamis (dispersion élevée) et non à des endroits bien précis lorsque la granulométrie de l'enrobé était modifiée. Le tableau XXVII amène des précisions sur cette affirmation et illustre la proportion de particules arrondies et angulaires retenues sur chacun des tamis (%). Évidemment, la somme des particules arrondies et angulaires retenues sur chacun des tamis est égale à 100%.

Tableau XXVII

Proportion de particules arrondies et angulaires retenues sur chacun des tamis (%)

	Proportion de particules arrondies et angulaires retenues par tamis (%)															
	7,2% de filler								9,4% de filler							
	Granulométrie modifiée								Granulométrie fixe							
	EG10-7,2-SN12		EG10-7,2-SN15		EG10-7,2-SN18		EG10-7,2-SNA5		EG10-9,4-SNA5		EG10-9,4-SNA12		EG10-9,4-SNA18		EG10-9,4-SNA5,3-SPEC	
Arrondies	Angulaires	Arrondies	Angulaires	Arrondies	Angulaires	Arrondies	Angulaires	Arrondies	Angulaires	Arrondies	Angulaires	Arrondies	Angulaires	Arrondies	Angulaires	
28 mm	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
20 mm	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
14 mm	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
10 mm	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
5 mm	0	100	0	100	0	100	0	100	5	95	12	88	18	82	0	100
*2,5 mm	7	93	9	91	13	87	3	97	5	95	12	88	18	82	0	100
*1,25 mm	35	65	47	53	54	46	9	91	5	95	12	88	18	82	0	100
*630 um	74	26	83	17	86	14	26	74	5	95	12	88	18	82	69	31
*315 um	90	10	94	6	95	5	49	51	5	95	12	88	18	82	94	6
160 um	69	31	76	24	79	21	36	64	5	95	12	88	18	82	0	100
80 um	26	74	31	69	35	65	10	90	5	95	12	88	18	82	0	100
Plateau	1	99	2	98	2	98	1	99	5	95	12	88	18	82	0	100
Légende :	Plus de 25% de part. arrondies						Plus de 50% de part. arrondies						Plus de 75% de part. arrondies			

Enrobés à granulométrie fixe – Dans le cas des enrobés ayant une granulométrie contrôlée comparativement à l'enrobé de référence, l'ajout de particules s'est fait de façon uniforme sur tout les tamis : 5, 12 ou 18% de particules arrondies retenues sur chacun des tamis. Par ailleurs, l'enrobé EG10-9,4-SNA5,3-SPEC possède de fortes proportions en sable sur deux de ces tamis sans toutefois affecter le couple ouvrabilité-ornièreage. Pour tous les enrobés à granulométrie fixe, le couple ouvrabilité-ornièreage a été affecté que très faiblement lors de l'ajout progressif en sable, ceci s'explique par la faible baisse de la qualité des points de contact (2^{ème} critère de design) de l'ensemble des particules.

Enrobés à granulométrie modifiée – Le tableau XXVII illustre que les enrobés possédant une granulométrie modifiée, comparativement à l'enrobé de référence, l'enrobé EG10-7,2, avaient de fortes proportions (> 25%) de particules arrondies entre les tamis de 80µm et 1,25mm et ce, spécifiquement pour trois tamis et plus. Le comportement des enrobés à granulométrie modifiée peut être expliqué par l'énoncé suivant : des concentrations élevées en sable arrondi sur plus de trois tamis rapprochés pourrait engendrer un maillon faible dans la reprise des contraintes dans l'enrobé, baisse de la qualité des points de contact à un endroit précis, affectant positivement leur ouvrabilité et négativement leur résistance à l'orniérage. Selon les données du tableau XXVII, il semble qu'il faut de fortes proportions (> 25%) en sable sur plus de trois tamis pour affecter le couple ouvrabilité-ornièreage. Le dernier énoncé est fondé sur les caractéristiques des enrobés à granulométrie contrôlée et ceux à granulométrie modifiée.

6.1.4.3 Sommaire

La très grande différence de comportement entre les enrobés des volets 2 et 3 peut s'expliquer par les énoncés suivants : 1) la granulométrie de référence pour les deux volets n'est pas la même, EG10-7,2 et EG10-9,4 respectivement pour les volets 2 et 3; 2) la dispersion des particules arrondies dans la structure granulaire n'est pas semblable,

pour le volet 2, il y a de fortes proportions (> 25%) en sable pour trois tamis et plus; 3) il y a un changement de granulométrie pour les enrobés du volet 2 comparativement à ceux du volet 3.

6.1.5 Bilan de la méthodologie

Cette analyse se termine en reprenant les cinq (5) critères de design afin de faire un survol complet et ordonné des facteurs affectant le couple ouvrabilité-ornièreage.

6.1.5.1 La prédominance des points de contact (1^{er} critère de design)

La prédominance des points de contact est assez difficile à déterminer, car aucun article traitant réellement de cet aspect a été trouvé. A la base, la prédominance des points de contact dépend de la granulométrie de l'enrobé. En se reportant à la granulométrie des enrobés testés dans le cadre des volets 1, 2 et 3, il est possible de constater que la structure granulaire de ces enrobés est constituée d'un volume important de grosses particules (55% retenus au tamis de 5mm) entre lesquels viennent s'introduire des particules fines : ce sont des enrobés pierreux. Cet énoncé se fonde sur le fait que les courbes du combiné granulaire des enrobés étudiés coupent la CMVM entre les tamis de 5 et 10mm, et que leur pente, au point d'intersection, est abrupte, témoignant ainsi d'une configuration granulaire constituée de grosses particules dominantes couplées à des fines. D'un point de vue macroscopique, le transfert de charge d'un pneumatique à travers un enrobé à structure pierreuse se fait essentiellement par l'entremise des grosses particules et donc, la qualité globale des points de contact entre les particules est définie par la qualité de ces grosses particules. La figure 32 présente la granulométrie des enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1. A partir des courbes granulométriques de ces enrobés, il est possible d'admettre que les points de contact dominant se font, en grande majorité, entre les grosses particules de diamètre voisin de 7,5mm, puisque les

courbes granulométriques de ces enrobés croisent la CMVM à 2,5 et qu'en ce point la pente de ces courbes est la plus élevée. Une pente abrupte jumelée à une différentielle importante du pourcentage passant indique que ce groupe de particules se présente en grand nombre et qu'il constitue une classe dominante.

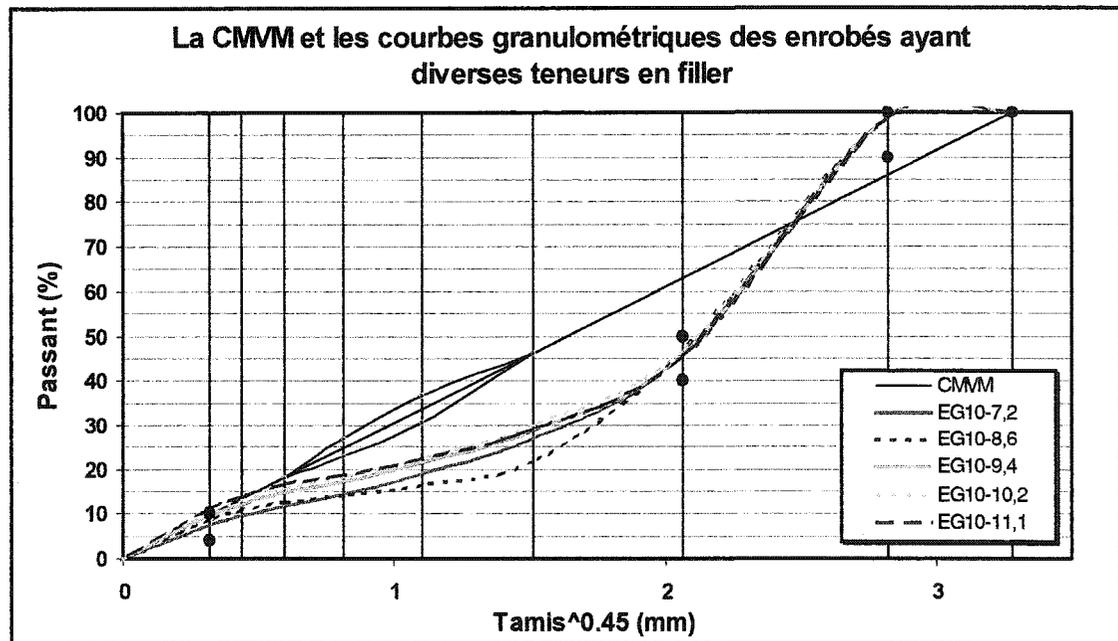


Figure 32 Granulométrie des enrobés confectionnés dans le cadre du volet 1

Cependant, il faut être prudent quant à la désignation d'une classe dominante relativement aux points de contact et ce, en dépit du fait que la granulométrie de l'enrobé coupe la CMVM avec une différentielle importante. En effet, il est possible de remarquer, à la figure 32, que les courbes granulométriques des enrobés EG10-10,2 et EG10-11,1 recourent à nouveau la CMVM aux tamis de 80 et 160 μ m respectivement. Cette situation implique que les particules fines de ces enrobés peuvent jouer un rôle important quant au transfert de charge au sein de la microstructure de ces enrobés. Il ne faut pas oublier qu'un surdosage en filler conduit au desserrement de la structure granulaire impliquant ainsi que les fines se retrouvent piégées entre les particules grossières et reconditionnent le transfert de charge entre les particules grossières qui, dès lors, ne sont plus directement en contact les unes avec les autres. Pour ces enrobés, les

particules fines, en grand nombre, repoussent littéralement les particules plus grossières : les fines n'agissent plus uniquement en tant qu'agent de remplissage, mais également comme un agent participant à la reprise des efforts. La qualité des points de contact à prendre en considération pour anticiper la performance à l'orniérage de ces enrobés se définit par les particules fines plutôt que par les particules grossières.

Comme déjà mentionné dans le cadre du volet 2, il est possible d'admettre que la prédominance des points de contact se produit principalement entre les particules de diamètre de 7,5mm. Or, la substitution d'une fraction des particules anguleuses par des particules arrondies (sable naturel) s'est faite sur des particules de diamètre nettement inférieur à la taille associée à la dominance des points de contact. Pourquoi dans ce cas, ces enrobés contenant du sable ont présenté une meilleure ouvrabilité et une moins bonne performance à l'orniérage au fur et à mesure que le dosage en sable augmente? Bien que la majorité des points de contact pour ces enrobés se fait entre les particules de 7,5mm de diamètre, il existe néanmoins des transferts de charge entre les particules intermédiaires. Pour les enrobés testés dans le cadre du volet 2, il semble que les particules arrondies affectent grandement la rhéologie de l'enrobé même si la majorité des points de contact ne se fait pas entre ces particules (< 5mm) parce que, notamment, la granulométrie de ces enrobés contenant du sable se rapproche progressivement de la CMVM entre les tamis de 315 μ m et 2,5mm. L'augmentation de la fraction intermédiaire de la masse granulaire par l'ajout de particules arrondies, entre les tamis de 315 μ m et 2,5mm, semble jouer un rôle plus critique au terme de la stabilité à l'orniérage. Par ailleurs, l'ajout de sable (particules arrondies) abaisse la qualité des points de contact des particules (2^{ème} critère de design) composant l'enrobé.

En définitive, il n'est pas simple dans certains cas de cibler une taille dominante au sein du squelette granulaire qui, par la qualité de leurs points de contact (2^{ème} critère de design), va contrôler la performance à l'orniérage de l'enrobé. Il semble bien que la représentation graphique de la CMVM et des granulométries des enrobés (tamis à la

puissance 0,45) puisse aider à cibler une taille critique. Cependant il faut apporter une attention particulière à la forme et à la texture de chaque groupe de granulats constituant l'enrobé.

6.1.5.2 La qualité des points de contact (2^{ème} critère de design)

La qualité des points de contact est fonction de la forme et de la texture des particules constituant l'enrobé. A leur tour, la forme des particules peut dépendre des conditions d'exploitation et du processus d'élaboration des matériaux, et la texture de surface est reliée directement à la nature même de la roche mère.

Dans le cadre du volet 1, la qualité des points de contact est excellente, toutes les particules composant les enrobés sont très angulaires. Dans le cadre de ce volet, la qualité des points de contact est définie, en grande partie, par la forme et la texture de surface des particules grossières de 5 à 10mm. Cependant, pour les enrobés EG10-10,2 et EG10-11,1, la qualité des points de contact à prendre en considération peut être définie, en majorité, par la qualité des particules fines composant le filler.

Dans le cadre du volet 2, l'ajout en sable s'est traduit par une forte proportion de particules arrondies entre les tamis de 80µm et de 1,25mm abaissant grandement la qualité des points de contact de cette fraction granulaire : création d'un maillon faible dans la reprise des efforts par l'enrobé et grande amélioration de son ouvrabilité. Pour les enrobés de ce volet, le couple ouvrabilité-ornière est très affecté par la qualité des particules arrondies présentent en grand nombre à un endroit bien précis.

Dans le cadre du volet 3, il a été constaté que pour un ajout en sable uniforme sur l'ensemble des tamis, la réduction de la qualité des points de contact en raison de la présence de ces particules arrondies avait affecté que faiblement le couple ouvrabilité-ornière et ce, même s'il y avait jusqu'à 18% de sable naturel.

6.1.5.3 La valeur du VAM (3^{ème} critère de design)

À partir de l'ensemble des essais réalisés, un élément important demeure dans le contexte du couple ouvrabilité-ornièreage : le VAM est un indicateur précieux pour anticiper la performance à l'orniérage de l'enrobé. Plus la valeur du VAM est faible, tout en ayant une teneur en vides en place adéquate, meilleure est la performance à l'orniérage de l'enrobé (tableau XXII). Lors de l'analyse, une attention particulière a été portée sur le VAM.

A partir de l'ensemble des résultats obtenus, une méthode d'analyse permettant d'anticiper l'évolution du VAM d'un enrobé donné a été élaborée. Cette réflexion est présentée ici et demeure valable dans la mesure où certains paramètres de formulation demeurent constants au sein de l'enrobé, soit : mêmes types de granulats, même Vbe et même bitume. Ces restrictions fixent en quelque sorte des éléments de constitution de l'enrobé qui ont une incidence significative sur la performance du couple ouvrabilité-ornièreage, tels que : 1) la qualité des points de contact : même type de granulats, 2) la rhéologie du bitume : même bitume et 3) la valeur du Vbe : Vbe fixe.

A partir de l'ensemble des enrobés testés, il a été possible de constater que le déplacement de la courbe granulométrique de l'enrobé par rapport à celle de la CMVM se traduit par un changement du VAM. Dans la perspective d'optimiser les étapes (les cinq critères de design) liées à la formulation d'un enrobé, qui visent à répondre aux exigences du couple ouvrabilité-ornièreage, une méthodologie permettant d'estimer l'ordre de grandeur du VAM pour un enrobé donné a été définie et ce, dans l'optique d'estimer son aptitude au compactage. L'idée de base se fonde sur 2 étapes : 1) évaluer le VAM d'un enrobé donné à partir des matériaux retenus par un essai à la PCG en laboratoire et 2) estimer l'évolution du VAM à partir de l'analyse de la courbe granulométrique.

Globalement, il faut : 1) établir une formulation réaliste, 2) évaluer en laboratoire la performance à la PCG de l'enrobé et calculer l'évolution de son VAM et 3) modifier, s'il y a lieu, sa granulométrie afin d'obtenir une ouvrabilité adéquate.

Partant du principe que pour un enrobé donné, avec des matériaux donnés, le VAM sera fonction de l'écart relatif entre sa granulométrie et la CMVM, il devient possible d'en quantifier l'évolution pour différents profils granulaires. D'autre part, il est clair que plus la courbe granulométrique s'éloigne de la CMVM, moins l'enrobé devrait présenter une bonne ouvrabilité : VAM élevé. Par conséquent, dans la mesure où l'on peut estimer l'évolution du VAM d'un enrobé à partir de sa granularité, il devient possible d'en estimer l'évolution de son aptitude au compactage sans avoir à multiplier les essais en laboratoire. Il est important de souligner ici que le but n'est pas de se soustraire aux essais en laboratoire qui sont essentiels, mais bien d'optimiser le processus de formulation. A partir de l'écart relatif entre la granulométrie de chacun des enrobés à celle de la CMVM, il est possible d'estimer l'évolution du VAM de l'enrobé et d'anticiper son ouvrabilité à la PCG. Dans cette optique, l'aire de part et d'autre de la CMVM a été calculée, délimitée par la granulométrie d'un enrobé, pour estimer la variation de son VAM.

Pour quantifier l'écart relatif entre la granulométrie d'un enrobé et celle de la CMVM, une méthodologie en trois étapes est proposée :

- 1) déterminer, s'il y a lieu, avec précision, où la courbe granulométrique de l'enrobé croise la CMVM : identifier la grosseur des particules, et l'introduire dans les calculs;
- 2) calculer l'aire sous la courbe granulométrique de l'enrobé et celle de la CMVM;

- 3) calculer l'écart des aires entre la courbe granulométrique de l'enrobé et la CMVM.

Cette méthodologie a été mise en application pour les enrobés testés dans le cadre du volet 1 du programme expérimental. Les granulométries des enrobés testés dans le cadre du volet 1 sont données au tableau XXVIII et ont été présentées à la figure 32.

Tableau XXVIII

Granulométrie des cinq enrobés contenant diverses teneurs en filler

	Filler (%) - Volet 1					Courbe de masse volumique maximale
	7,2 EG10-7,2	8,6 EG10-8,6	9,4 EG10-9,4	10,2 EG10-10,2	11,1 EG10-11,1	
28 mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20 mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
14 mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10 mm	98,8	98,9	98,8	98,9	98,8	85,9
7,5 mm	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5
5 mm	45,7	46,5	45,7	46,7	45,7	62,9
2,5 mm	26,9	21,8	28,8	29,8	29,0	46,1
1,25 mm	18,9	16,4	21,3	22,3	22,3	33,7
630 µm	14,4	14,0	17,0	18,0	18,6	24,8
315 µm	11,7	12,6	14,5	15,6	16,5	18,1
160 µm	9,3	10,7	12,0	12,9	13,9	13,4
80 µm	7,2	8,6	9,4	10,2	11,1	9,8
0 µm	0	0	0	0	0	0

Pour chacun des enrobés, l'aire présente sous sa courbe granulométrique a été calculée en multipliant les pourcentages passant par la grosseur des tamis en μm ($\% * \mu\text{m}$) et ce, pour chaque segment de tamis. L'aire sous la droite de la CMVM est aussi calculée. Pour terminer, l'aire sous la courbe granulométrique est soustraite par celle de la CMVM et ce, pour chaque segment de tamis afin d'obtenir la surface confinée entre les deux (valeurs absolues). L'ensemble de ces résultats est présenté au tableau XXIX.

Tableau XXIX

Surface totale confinée entre la granularité de l'enrobé
et la CMVM pour les cinq enrobés étudiés

	Surface totale confinée entre la granulométrie de l'enrobé et la CMVM pour les cinq enrobés étudiés ($\mu\text{m} \cdot \%$)				
	Filler				
	7,2	8,6	9,4	10,2	11,1
10 000 - 14 000 μm	25 786	25 819	25 786	25 826	25 785
7500 - 10 000 μm	16 116	16 137	16 116	16 142	16 116
5000 - 7500 μm	-21 526	-20 537	-21 512	-20 332	-21 542
2 500 - 5 000 μm	-45 461	-50 833	-43 054	-40 623	-42 926
1 250 - 2 500 μm	-21 253	-25 952	-18 544	-17 290	-17 835
630 - 1 250 μm	-7 834	-8 711	-6 258	-5 634	-5 455
315 - 630 μm	-2 645	-2 583	-1 785	-1 467	-1 234
160 - 315 μm	-807	-640	-387	-238	-89
80 - 160 μm	-265	-154	-71	-4	73
0 - 80 μm	-104	-47	-15	16	53
Surface totale confinée	141 797	151 413	133 530	127 570	131 107

En portant sur un graphique la surface totale confinée (figure 33), il est étonnant de constater la similitude qu'il existe entre cette figure et la figure 21 mettant en relation l'influence de la teneur en filler sur l'aptitude au compactage des enrobés. Il semble que

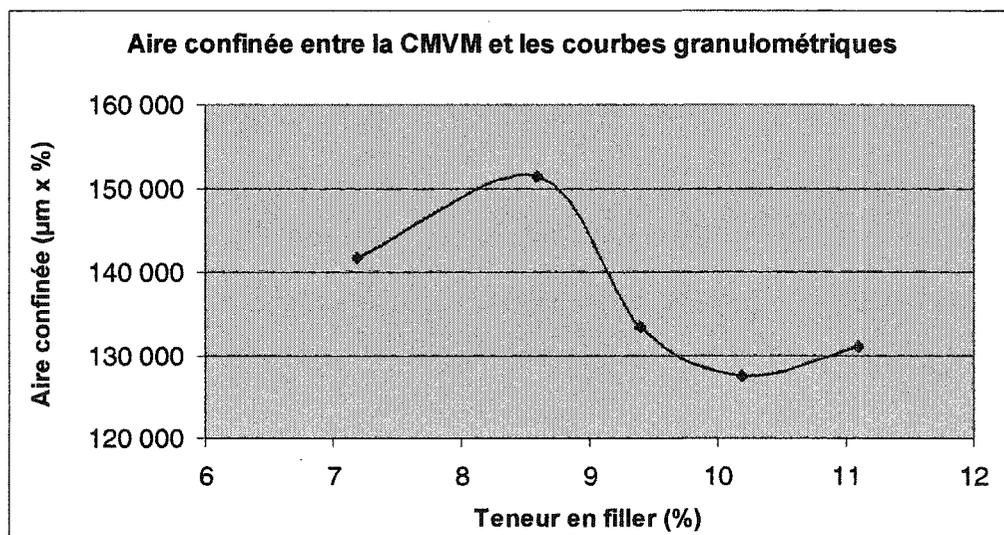


Figure 33 Surface totale confinée entre la granularité de l'enrobé
et la CMVM pour les cinq enrobés étudiés

plus l'écart entre la courbe granulométrique d'un enrobé et la CMVM est élevé, moins l'enrobé sera ouvrable. Cette affirmation est en parfait accord avec les énoncés de la littérature qui relatent que l'aptitude au compactage est proportionnelle à la valeur du VAM. A partir de la figure 33, il est possible de prédire que l'EG10-8,6 aura la moins bonne ouvrabilité. Cet énoncé coïncide avec les résultats expérimentaux. Il est donc possible à partir d'un premier essai à la PCG d'estimer, par la suite, l'évolution de l'ouvrabilité de l'enrobé à partir d'un changement de sa granulométrie et ce, par calcul. Évidemment, la mesure en laboratoire demeure essentielle.

6.1.5.4 La rhéologie du bitume (4^{ème} critère de design)

De façon élémentaire, la rhéologie d'un bitume affecte le couple ouvrabilité-ornièreage, un bitume dur confèrera à l'enrobé une résistance à l'ornièrage améliorée et une baisse de son ouvrabilité.

Dans le cadre du programme expérimental, le même type de bitume a été utilisé, il est donc facile de supposer que la rhéologie du bitume et ce, pour tous les enrobés n'a pas varié. Toutefois, des variances dans le temps de chauffage du bitume affectent fortement son durcissement, soit sa rhéologie. Par ailleurs, le temps séparant la confection des plaques et celui où on les soumet à l'essai à l'ornièreur constitue un autre facteur qui affecte le durcissement du bitume ("steric hardening") et donc sa rhéologie.

Malheureusement, la prise de données pour ce paramètre n'a pas été assez exhaustive afin de cerner des écarts qui auraient pu changer les résultats à la PCG ou à l'ornièreur.

6.1.5.5 La quantité de bitume : Vbe, VCB et le FBE (5^{ème} critère de design)

Pour tous les enrobés confectionnés dans le cadre des trois volets, leur film de bitume effectif (FBE), leurs vides comblés par du bitume (VCB) et leur pourcentage en bitume ont été calculés et analysés afin de trouver une corrélation entre ceux-ci et le couple ouvrabilité-orniérage. Toutefois, aucune corrélation fiable n'a pu être établie entre ces paramètres et le couple ouvrabilité-orniérage. Cela peut s'expliquer, en partie, par le Vbe constant (12,4%) utilisé pour tous les enrobés confectionnés et puisque ce facteur est le plus important du 5^{ème} critère de design.

Il est à souligner que selon le classement effectué dans la revue de la littérature et démontré par les résultats expérimentaux, les facteurs composant ce 5^{ème} critère de design sont ceux influençant le moins le couple ouvrabilité-orniérage.

CONCLUSION

Deux facteurs influençant le couple ouvrabilité-ornière ont été sélectionnés et incorporés dans le programme expérimental, soit la variation de la teneur en filler et l'ajout d'un sable roulé. Afin de limiter l'ampleur du programme expérimental, seul l'enrobé EG-10 a été choisi pour mieux comprendre l'influence de ces deux facteurs sur le couple ouvrabilité-ornière. Par ailleurs, il est à souligner que les résultats obtenus dans le programme expérimental en relation avec l'enrobé EG-10 pourront, évidemment, varier dans le cas où un autre enrobé est employé.

Dans le cadre du volet 1 du programme expérimental, le fait d'augmenter la teneur en filler permet de combler une partie des vides entre les particules grossières et d'assurer ainsi un certain blocage du squelette granulaire. Par contre, un surdosage en filler se traduit par un desserrement de la structure granulaire qui nuit à l'agencement optimal des particules. Dans le cas d'un surdosage, les fines n'agissent plus uniquement en tant qu'agent de remplissage, mais également comme un agent participant à la reprise des efforts. Par ailleurs, l'augmentation de la teneur en filler accroît et diminue respectivement l'orniérage initial et global des enrobés. L'orniérage de consolidation est plus important lorsque le VAM est grand et l'orniérage par fluage est tributaire de la rhéologie du mastic (bitume-filler).

Dans le cadre du volet 2, l'augmentation de l'ajout en sable se traduit par une amélioration de l'ouvrabilité et une perte au niveau de la performance à l'orniérage des enrobés en raison de la baisse de la qualité entre les points de contact. Le changement de granulométrie entre les enrobés influence également le couple ouvrabilité-ornière. La très haute concentration en particules arrondies entre les tamis de 80 μ m et 1,25mm explique en majorité la grande ouvrabilité et la faible résistance à l'orniérage de ces enrobés.

Dans le cadre de la réflexion portant sur l'influence des particules arrondies, il est démontré que la très grande différence de comportement entre les enrobés des volets 2 et 3 peut s'expliquer par trois énoncés : 1) la granulométrie de référence pour les deux volets n'est pas la même, EG10-7,2 et EG10-9,4 respectivement pour les volets 2 et 3; 2) la dispersion des particules arrondies dans la structure granulaire n'est pas semblable, pour le volet 2, il y a de fortes proportions (> 25%) de particules arrondies retenues sur trois tamis et plus; 3) il y a un changement de granulométrie pour les enrobés du volet 2 comparativement à ceux du volet 3.

Par ailleurs, l'analyse des résultats démontre que le comportement des enrobés des volets 1, 2 et 3 et le couple ouvrabilité-orniérage sont bien représentés par les cinq critères de design élaborés dans la revue de la littérature.

À la base, la prédominance des points de contact dépend de la granulométrie de l'enrobé. Dans le cas de l'enrobé EG-10, la prédominance des points de contact se fait essentiellement entre les particules grossières (55% retenus au tamis de 5mm) entre lesquelles viennent s'introduire des particules fines. Cet énoncé se fonde sur le fait que sa courbe granulométrique coupe la CMVM entre les tamis de 5 et 10mm, et que la pente au point d'intersection est abrupte. Une pente abrupte jumelée à une différentielle importante du pourcentage passant indique que ce groupe de particules se présente en grand nombre et qu'il constitue une classe dominante. Il n'est pas simple dans certains cas de cibler une taille dominante au sein du squelette granulaire qui, de par la qualité de leurs points de contact, va contrôler la performance de l'enrobé. Il semble bien que la représentation graphique de la CMVM et des granulométries des enrobés (tamis à la puissance 0,45) puisse aider à cibler une taille critique.

La qualité des points de contact est fonction de la forme et de la texture des particules constituant l'enrobé. Dans le cas des enrobés du volet 2, la forte proportion de particules arrondies entre les tamis de 80 μ m et de 1,25mm a abaissé grandement la qualité des

points de contact de cette fraction granulaire : création d'un maillon faible dans la reprise des efforts par l'enrobé et amélioration de son ouvrabilité.

La valeur du VAM est un indicateur précieux pour anticiper la performance des enrobés. Plus la valeur du VAM est faible, tout en ayant une teneur en vides adéquate, meilleure est l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage de l'enrobé. La méthodologie permettant d'estimer l'ordre de grandeur du VAM en calculant l'aire de part et d'autre de la CMVM, délimitée par la granulométrie de l'enrobé, est efficace. À partir de cette méthodologie et d'un premier essai à la PCG, il est possible d'estimer l'évolution de l'ouvrabilité de l'enrobé pour un changement de granulométrie donné et ce, par calcul.

Étant donné l'utilisation du même type de bitume pour la confection des enrobés et la piètre compilation de données expérimentales, l'importance d'un changement dans la rhéologie du bitume sur le couple ouvrabilité-orniérage n'a pu être établie.

Aucune corrélation fiable n'a pu être établie entre le 5^{ème} critère de design et le couple ouvrabilité-orniérage, car le paramètre le plus significatif, le V_{be} , était constant.

Donc, en résumé, l'élaboration des cinq critères de design a permis d'atteindre l'objectif premier de ce mémoire qui était de trouver une corrélation entre l'ouvrabilité et la résistance à l'orniérage des enrobés.

ANNEXE 1

Définitions relatives aux différentes phases de l'enrobé

Voici quelques définitions relatives aux différentes phases de l'enrobé :

- Les vides interstitiels dans l'enrobé (V_i) représentent le volume occupé par l'air emprisonné entre les granulats enrobés dans un enrobé compacté, exprimé en pourcentage du volume brut de l'enrobé compacté (V_{mb}) :

$$V_i(\%) = \frac{V_i}{V_{mb}} \times 100 \quad (\text{éq. A1.1})$$

- Le volume de bitume effectif (V_{be}) est défini comme étant : le volume total du bitume (V_b) dans l'enrobé moins le volume de bitume absorbé par les granulats (V_{ba}) exprimé en pourcentage par rapport au volume de l'enrobé sans vides interstitiels (V_{mm}) :

$$V_{be}(\%) = \frac{V_b - V_{ba}}{V_{mm}} \times 100 \quad (\text{éq. A1.2})$$

- Les vides intergranulaires (V_{AM}) constituent le volume occupé par l'espace entre les granulats dans un enrobé compacté, incluant les vides interstitiels dans l'enrobé (V_i) et le volume de bitume effectif (V_{be}), exprimé en pourcentage par rapport au volume brut de l'enrobé compacté (V_{mb}) :

$$V_{AM}(\%) = \frac{V_i + V_{be}}{V_{mb}} \times 100 \quad (\text{éq. A1.3})$$

Le V_{AM} peut être également calculé directement par l'addition des vides interstitiels (V_i) et du volume de bitume effectif (V_{be}) exprimé par rapport au volume de l'enrobé compacté. Ainsi, le V_{be} exprimé par rapport au volume de l'enrobé à 0% de vides interstitiels (valeur du V_{be} exigée lors de la formulation

(tableau XIV)) doit donc être ramené par rapport au volume de l'enrobé incluant les vides interstitiels (V_i) :

$$VAM(\%) = \frac{Vbe \times (100 - Vi)}{100} + Vi \quad (\text{éq. A1.4})$$

- Les vides comblés par le bitume (VCB) composent le volume des vides intergranulaires (VAM) occupé par le volume de bitume effectif (Vbe), exprimé en pourcentage du volume des vides intergranulaires (VAM) :

$$VCB(\%) = \frac{Vbe}{VAM} \times 100 \quad (\text{éq. A1.5})$$

- Le volume brut du granulat (V_{gb}) constitue le volume de la pierre même, des pores perméables et imperméables au bitume.
- Le volume effectif du granulat (V_{ge}) comprend le volume de la pierre même en incluant et excluant respectivement les pores imperméables et perméables au bitume.

L'abréviation VAM provient de l'expression "vides dans l'agrégat minéral", cette expression n'est plus utilisée aujourd'hui, mais l'abréviation VAM a été conservée (Langlois et coll., 2001).

ANNEXE 2

Complément d'informations sur la rhéologie et la structure des bitumes

Structure d'un bitume de type "sol"

Si les micelles se trouvent très dispersées (peu d'interaction entre-elles) au sein de la phase continue, et si la concentration des asphaltènes et leur masse moléculaire sont faibles, le bitume a un comportement de type "sol" (figure A1). Les micelles se trouvent en nombre faible et se déplacent librement dans la matrice de bitume. Une micelle est constituée par le regroupement de plusieurs molécules (figures A1 et A3). En raison du faible nombre d'interaction entre les micelles, la rhéologie de ce type de bitume est gouvernée par la phase dispersante.

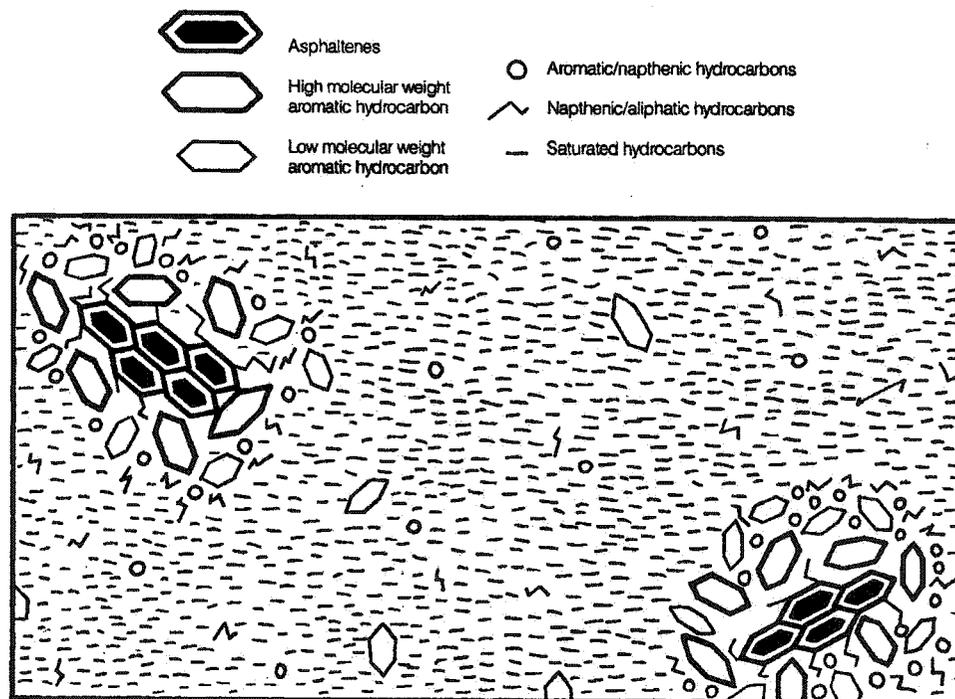
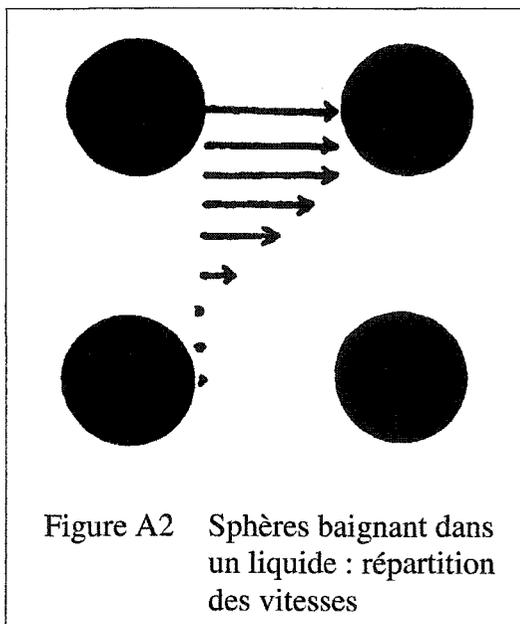


Figure A1 Structure d'un bitume de type "sol" (Source : Shell, 1990)

Comportement d'un bitume de type "sol"– Les bitumes de type "sol" ont un comportement semblable à celui d'un fluide newtonien à haute température, c'est-à-dire que leur vitesse de déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée. A des

températures d'utilisation, ces bitumes présentent un comportement viscoélastique avec une prédominance visqueuse (Young et coll., 1998). Le comportement viscoélastique est traité plus en détail à la section traitant du comportement mécanique d'un bitume routier. Kennel (1977) cite : « Dans le cas de bitume sol et compte tenu du type de morphologie des asphaltènes, on comprend que l'allure du comportement soit celle essentiellement newtonienne des maltènes, naturellement rehaussée par la présence de la charge ». La charge constitue la structure formée par les asphaltènes. Sous l'action d'une charge, les bitumes de type "sol" présentent des grandes déformations et peuvent subir des déformations permanentes. Dues au phénomène visqueux, les efforts internes induits par la charge vont décroître lentement avec le temps : phénomène de relaxation. La neutralisation des effets de compression causés par la charge s'effectue par un déplacement ou une réorientation des molécules internes. Selon Dron (1977), ce type de bitume peut être représenté par des sphères indéformables dispersées dans un liquide newtonien (figure A2). Les sphères représentent les micelles.



Bien qu'il n'existe pas de relation quantitative entre la composition et les propriétés rhéologiques, on peut dire qu'un bitume de type "sol" sera plus susceptible aux effets de la température qu'un bitume de type "gel" tout en présentant un comportement plus visqueux (Shell, 1991).

Structure d'un bitume de type "gel"

Si la teneur en asphaltènes est suffisante, des réseaux tridimensionnels se forment, il y a formation de micelles de très grandes tailles, qui confèrent au bitume une structure de type "gel" (figure A3).

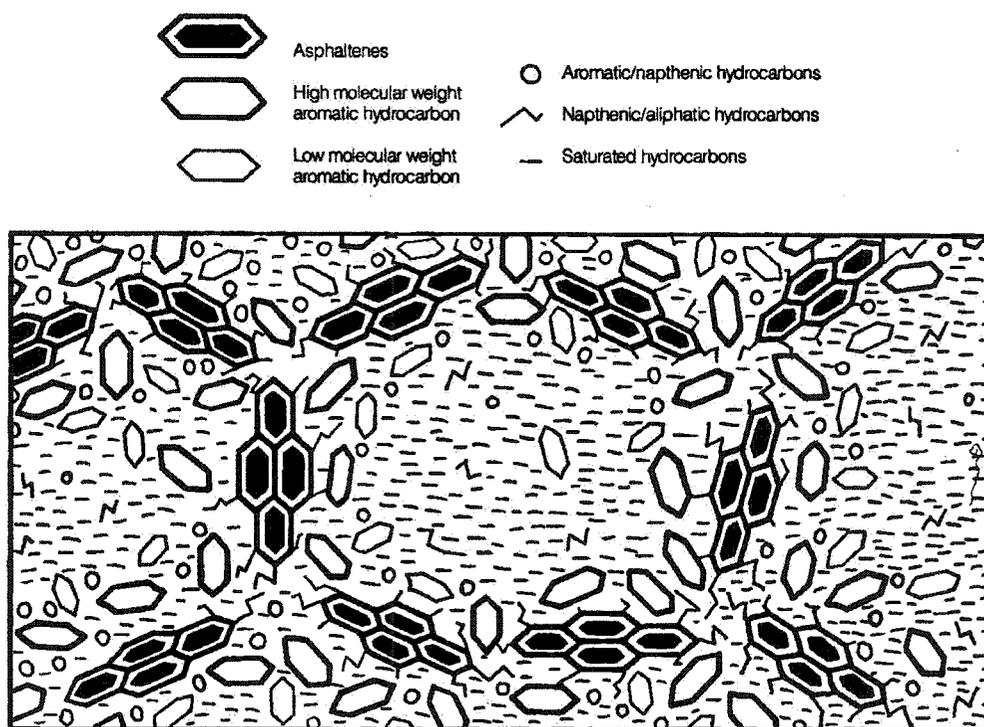
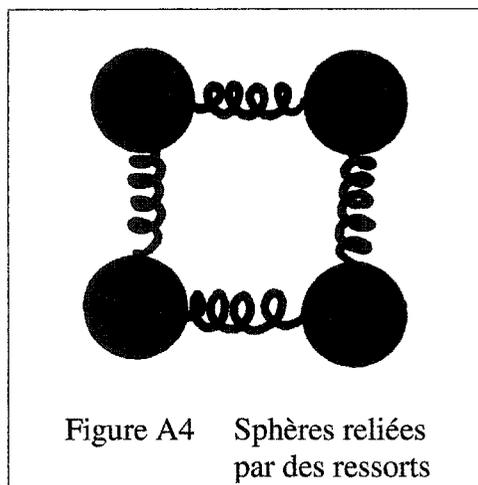


Figure A3 Structure d'un bitume de type "gel" (Source : Shell, 1990)

Comportement mécanique d'un bitume de type "gel" – Les bitumes de type "gel" ont un comportement non newtonien, c'est-à-dire que leur vitesse de déformation est non proportionnelle à la contrainte appliquée. Un nombre plus important de micelles se retrouvent dans ce type de bitume. Les interactions de ce type de bitume se font entre les micelles avoisinantes et quelque peu avec la phase dispersante. Selon Dron (1977), ce type de bitume peut être schématisé par un ensemble de sphères reliées par des ressorts et qui baignent dans la phase dispersante, ce qui simule assez bien le caractère tremblotant d'une gelée (figure A4). Ce qui implique que ce type de bitume sera

élastique, mais l'élasticité sera retardée par la viscosité de la phase dispersante. Donc, il



peut se déformer mais il ne peut pas s'écouler. Pour que cela soit possible, il faut que les liaisons se rompent. Cela est accompli avec une augmentation de la température du bitume ou en malaxant plus ou moins vigoureusement. Il a été noté que les liaisons brisées se reforment avec le temps (Dron, 1977). Kennel (1977) cite : « Pour le bitume gel, la déformation provoquera une désagrégation de la structure, et

c'est de ce phénomène que provient le caractère non newtonien. De plus, cette structure associe des asphaltènes et des résines ».

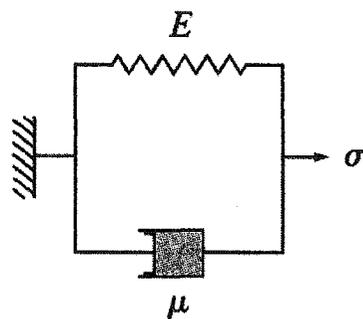
Pour un bitume de type "gel", lorsqu'il y a élévation de la température, les asphaltènes et les résines sont progressivement solubilisés par la phase huileuse et freine de ce fait l'abaissement de la viscosité des deux composants (groupements de micelles et la phase dispersante), réduisant ainsi sa susceptibilité aux variations thermiques. Toutefois, à faible vitesse de déformation, dans le domaine où les deux bitumes ont, pour l'essentiel, un comportement newtonien, c'est le bitume "gel" qui est légèrement plus susceptible à la température (Kennel, 1977).

Les bitumes soufflés, riches en asphaltènes de masses moléculaires relativement élevées ont ainsi une faible susceptibilité à la température et, dans certaines plages de température et de temps de charge, un comportement quasi élastique (Shell, 1991). Ils sont souvent utilisés comme matériaux de revêtement de toits et certains ne peuvent être utilisés comme matériaux routiers, car ils présentent des viscosités trop élevées (Shell, 1990).

Structure d'un bitume routier

La plupart des bitumes routiers sont de type "sol-gel". Les bitumes de type "sol-gel" ont une structure intermédiaire entre les deux types précédents.

Comportement mécanique d'un bitume routier – La rhéologie des bitumes routiers à une température donnée est toujours fonction de sa composition chimique et de sa structure. Ces bitumes ont essentiellement un comportement viscoélastique (combinaison d'un matériau élastique et d'un fluide Newtonien) dont les propriétés sont influencées à la fois par la température et le temps de chargement. Le bitume peut être modélisé par un système ressort-amortisseur montés en parallèle ou en série tel que présenté aux figures A5 a) et A5 b). Le ressort représente la composante élastique qui se déforme rapidement sous l'effet d'une charge, mais qui tend à reprendre sa forme originale. L'amortisseur, quant à lui, symbolise davantage la composante visqueuse qui réagit plus lentement et dont la déformation est irréversible.



$$\sigma = E \epsilon + \mu \dot{\epsilon}$$

Figure A5 a)
Modèle de Kelvin ou Voigt



$$\frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\mu} = \dot{\epsilon}$$

Figure A5 b)
Modèle de Maxwell

où σ : Contrainte (MPa);
 E : Module d'élasticité ou module de Young (MPa);

- ε : Déformation (mm/mm);
 μ : Facteur de masse (MPa·sec);
 $\dot{\varepsilon}$: Taux de déformation (1/sec);
 $\dot{\sigma}$: Taux de contrainte (MPa/sec).

Il est important de mentionner que la température et le temps de chargement peuvent être inter-reliés par le concept de superposition temps-température. Le concept de superposition temps-température implique que le comportement du bitume à haute température et soumis à une contrainte de courte durée sera équivalent à celui observé pour une température basse et à la même contrainte, mais réparti sur une plus longue période de temps (Langlois et coll., 2001).

En condition isochrone, le bitume exhibera à diverses températures trois types de comportement rhéologique sous l'action de petites déformations : 1) un comportement élastique à basse température, 2) un comportement viscoélastique à des températures intermédiaires et 3) un comportement purement visqueux à haute température. L'orniérage des enrobés se produit lorsque la température est : a) intermédiaire ou b) élevée.

A) Comportement d'un bitume routier à des températures intermédiaires – À des températures intermédiaires (environ de -25 à 40°C) ou sous l'application de petites déformations, le bitume présente un comportement viscoélastique. À ces températures, lorsque le bitume est mis sous charge, le bitume se déforme de façon élastique (ressort) et visqueuse (amortisseur). Il est à souligner que la déformation permanente du bitume est très faible et proportionnelle à la température ou au temps de chargement.

B) Comportement d'un bitume routier à haute température – À haute température (plus de 40°C environ) ou sous l'application prolongée d'une charge, le bitume possède, en grande partie, un comportement visqueux (amortisseur). Un comportement visqueux

implique que le bitume se déforme de façon différée sans retrouver sa forme initiale (déformation permanente). La déformation permanente est inversement proportionnelle à la viscosité ou à la résistance au cisaillement du bitume. Plus la température est élevée, plus la résistance au cisaillement est faible et plus la déformation permanente sera grande. En plus, un bitume pur, bitume sans additif, est généralement considéré comme un fluide newtonien pour des températures supérieures à 60°C (Langlois et coll., 2001).

ANNEXE 3

Détails sur les caractéristiques des granulats

Caractéristiques intrinsèques

Les caractéristiques intrinsèques sont reliées à la nature même de la roche mère. Ces caractéristiques sont donc inchangeables.

Le MTQ a élaboré la norme 2101 pour le classement des gros granulats sur la base de leurs résistances à l'usure (essai micro-Deval (MD)) et à la fragmentation dynamique par chocs (essai Los Angeles (LA)). Les différentes catégories de gros granulats normalisées par le MTQ sont présentées au tableau AI.

Tableau AI

Catégories de gros granulats selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et aux chocs

Caractéristiques intrinsèques	Méthodes d'essais	Catégories de gros granulats					
		1	2	3	4	5	6
Micro-Deval (MD)	LC21-070	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 35	≤ 40
Los Angeles (LA)	LC21-400	≤ 35	≤ 45	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 50
Micro-Deval et Los Angeles (MD + LA)		≤ 40	≤ 55	≤ 70	≤ 75	≤ 80	≤ 85

(Source : Tableau 2101-2 de la norme 2101 du MTQ, 2001)

Les catégories de granulats fins sont établies sur la base de leurs résistances à l'usure (essai micro-Deval (MD), méthode d'essai LC 21-101) et à la friabilité (méthode d'essai LC-21-080). Les différentes catégories de granulats fins normalisés par la norme 2101 du MTQ sont présentées au tableau AII.

Tableau AII

Catégories de granulats fins selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et de friabilité

Caractéristiques intrinsèques	Méthodes d'essais	Catégories de granulats fins		
		1	2	3
Micro-Deval (MD)	LC21-101	≤ 30	≤ 35	≤ 35
Friabilité	LC21-080	≤ 40	≤ 40	–

(Source : Tableau 2101-4 de la norme 2101 du MTO, 2001)

Caractéristiques de fabrication

Les caractéristiques de fabrication vont plutôt dépendre des conditions d'exploitation et du processus d'élaboration des matériaux. Ces caractéristiques sont donc modifiables en jouant sur les procédés d'exploitation.

Les catégories de gros granulats sont établies selon leurs caractéristiques de fragmentation, plus précisément sur la teneur en particules fragmentées (méthode d'essai LC 21-100), et de forme (particules plates et allongées; méthode d'essai LC 21-265). Les principales catégories de gros granulats selon la norme 2101 du MTQ sont présentées au tableau AIII.

Tableau AIII

Catégories de gros granulats selon leurs caractéristiques de fabrication

Caractéristiques de fabrication	Méthodes d'essais	Catégories de gros granulats				
		a	b	c	d	e
Fragmentation (%)	LC 21-100	100	≥ 75	≥ 60	≥ 60	≥ 50
Particules plates (%) ⁽¹⁾	LC 21-265	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 30	--
Particules allongées (%) ⁽¹⁾	LC 21-265	≤ 40	≤ 40	≤ 45	≤ 50	--

Note :

1. Pour les particules plates et allongées, l'essai s'effectue sur la partie retenue au tamis de 10 mm.

(Source : Tableau 2101-3 de la norme 2101 du MTQ, 2001)

Caractéristiques complémentaires

Les caractéristiques complémentaires sont celles qui ont une incidence sur la performance de l'enrobé, mais qui ne sont pas prises en compte lors de la classification des granulats. Ce sont les caractéristiques de propreté, de résistance au polissage par projection et la présence de particules délétères : particules nuisibles (mottes d'argiles, particules friables et matière organique).

Le tableau 4202-3 tiré de la norme 4202 du MTQ (tableau AIV) illustre les valeurs des caractéristiques complémentaires que doivent respecter les granulats pour être retenus dans la formulation d'un enrobé.

Tableau AIV

Caractéristiques complémentaires des granulats pour enrobés à chaud, selon les usages

Caractéristiques complémentaires des granulats pour enrobés à chaud, selon les usages		
Caractéristiques complémentaires	Méthodes d'essai	Couche unique, couche de surface
Gros granulats		
Propreté (particules < 80 µm) gravière et sablière (% max.) ⁽¹⁾	CAN/CSA A23.2-5A	1,0
Propreté (particules < 80 µm) carrière (% max.) ⁽¹⁾	CAN/CSA A23.2-5A	1,5
Coefficient de polissage par projection (min.) ⁽²⁾	LC 21-102	0,45
Granulats fins		
Mottes d'argile et particules friables (% max.)	CAN/CSA A23.2-3A	2,0
Coefficient d'écoulement ⁽³⁾	LC 21-075	≥ 80
Teneur en particules inférieures à 5 µm (% max.) ⁽⁴⁾	NQ 2501-025	4

Notes :

1. Cette caractéristique s'applique à chaque classe granulaire. Le pourcentage maximale de particules inférieures à 80 µm est de 1,5 % pour une classe granulaire qui provient à 100 % du concassage d'un matériau retenu au tamis 40 mm.
2. Le coefficient de polissage par projection ne s'applique que pour les gros granulats de caractéristiques intrinsèques de catégorie 1 ou 2 mentionnée dans la norme 2101 «Granulats». Chaque source (site d'exploitation d'où origine chacun des gros granulats faisant partie des classes granulaires nécessaires à l'élaboration de l'enrobé) de gros granulats doit être conforme à l'exigence relative au coefficient de polissage par projection. L'évaluation est faite à partir d'une classe granulaire dont la majorité des particules est comprise entre les tamis de 6,3 mm et de 10 mm.
3. Cette caractéristique s'applique lorsque des granulats fins de catégorie 1 sont exigés.
4. Le pourcentage est établi par rapport au passant 5 mm.

(Source : Tableau 4202-3 de la norme 4202 du MTQ, 2001)

Le coefficient de polissage par projection est déterminé après avoir fait la projection d'un flux d'eau et d'abrasifs sur des particules de pierre. Le principe de l'essai est de fournir une mesure relative caractérisant l'état limite de polissage d'une pierre soumise à l'action du trafic. Après le polissage, la mesure de la rugosité des particules de granulats est faite à l'aide du pendule de frottement défini par la norme AFNOR P 18-578 « Mesure de la rugosité d'une surface à l'aide du pendule de frottement ».

Caractéristiques minimales d'un granulat pour la formulation d'un enrobé

Pour entrer dans la formulation d'un enrobé, les gros granulats et les granulats fins devront faire partie des catégories présentées aux tableaux AIV (caractéristiques complémentaires) et AV (caractéristiques intrinsèques et de fabrication).

Tableau AV

Catégories de granulats pour enrobés à chaud

Catégories de granulats pour enrobés à chaud	
Gros granulats⁽¹⁾	
– Caractéristiques intrinsèques	4, 3, 2 ou 1
– Caractéristiques de fabrication ⁽²⁾	d, c, b ou a
Granulats fins	
– Caractéristiques intrinsèques	2 ou 1
Notes :	
1. La catégorie de chaque caractéristique pour chaque classe granulaire ne doit pas être inférieure qualitativement de plus d'une catégorie de celle exigée.	
2. Les exigences sur les particules plates et sur les particules allongées de la catégorie «a» citées au tableau 2101-3 de la norme 2101 «Granulats» ne sont pas requises lorsque cette catégorie est associée aux catégories 1 et 2 de gros granulats selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et aux chocs.	

(Source : Tableau 4202-2 de la norme 4202 du MTQ, 2001)

Le filler doit être conforme à la norme ASTM D 242 "Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures". En somme, le filler doit avoir un pourcentage passant de l'ordre de 100, de 95 à 100 et de 70 à 100 pour les tamis de 630µm, 315µm et 80µm. De plus, le filler ne doit pas contenir de matières organiques et avoir un indice de plasticité supérieur à 4.

ANNEXE 4

Réajustement du Pbi et de la Dmm

Voici les essais et les calculs à faire pour le réajustement du Pbi et la Dmm :

- 1) La détermination de la densité maximale de l'enrobé en laboratoire permet de connaître l'absorption réelle de bitume par les granulats.

$$Dge = \frac{Pmm - Pbi,est.}{\frac{Pmm}{Dmm} - \frac{Pbi,est.}{Db}} \quad (\text{éq. A3.1})$$

$$Pba = 100 \cdot \frac{Dge - Dgb}{Dgb \cdot Dge} \cdot Db \quad (\text{éq. A3.2})$$

- 2) Sur la base de la mesure de la densité maximale de l'enrobé en laboratoire, un ajustement de la quantité totale de bitume (Pbi) est requis dû au fait que l'absorption réelle de bitume diffère de celle estimée; une variation au niveau de la teneur en bitume absorbée se traduit directement par une variation du bitume effectif.

$$Pbi = \left[\frac{Vbe \cdot Db + Pba \cdot Dgb \cdot (100 - Vbe) + 100}{Dgb \cdot (100 - Vbe) + Vbe \cdot Db + Pba \cdot Dgb \cdot (100 - Vbe) + 100} \right] \cdot 100 \quad (\text{éq. A3.3})$$

- 3) L'ajustement de la teneur en bitume (Pbi) a comme conséquence que la valeur de la Dmm mesurée en laboratoire doit être elle aussi ajustée.

$$Dmm = \frac{Pmm}{\frac{Pg}{Dge} + \frac{Pbi}{Db}} \quad (\text{éq. A3.4})$$

Dge : Densité effective du granulat;

Pmm : Masse de l'enrobé total non compacté exprimée en pourcentage

- de la masse de l'enrobé, c'est-à-dire 100;
- Pbi, est. : Masse de bitume initial estimée et introduit lors de la formulation, exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé;
- Dmm : Densité maximale de l'enrobé (sans vides interstitiels);
- Db : Densité du bitume;
- Pba : Masse de bitume absorbé, exprimée en pourcentage de la masse du granulat;
- Dgb : Densité brute du granulat combiné;
- Pbi : Masse du bitume initial, exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé;
- Vbe : Volume de bitume effectif (exprimé en % par rapport à 0% de vides) exigé pour l'enrobé à formuler;
- Pg : Masse du granulat, exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé;
- Pb : Masse du bitume final, après avoir fait toutes les étapes liées à la formulation, exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé.

ANNEXE 5

Formulation des enrobés à granulométrie contrôlée contenant du sable arrondi

Dosages initiaux des quatre enrobés à granulométrie contrôlée contenant du sable arrondi

Le tableau AVI illustre les dosages initiaux de chacun des enrobés avant la détermination de la Dmm.

Tableau AVI

Dosages initiaux des quatre enrobés (granulométrie fixe)

		TYPES D'ENROBÉS EG-10				
		EG10-9,4	EG10-9,4-SNA5	EG10-9,4-SNA12	EG10-9,4-SNA18	EG10-9,4-SNA5,3-SPEC
Dosage massique des différentes classes granulaires (%)	Filler	8,5	8,1	7,5	7,0	8,5
	0-2,5mm	17,0	16,1	14,9	13,9	12,4 *
	2,5-5mm	13,2	12,5	11,6	10,8	13,2
	5-10mm	55,6	52,8	49,0	45,6	55,6
	Sable arrondi	-	4,7	11,3	17,0	5,0 *
Pbi (%)		5,73	5,72	5,71	5,70	5,73
Pba estimé (%)		0,93	0,91	0,88	0,85	0,93
Vbe visé (%)		12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
* Sable : ajout de particules passant le tamis de 1,25mm et retenues sur le tamis de 315µm. Ces particules remplacent celles de même grosseur du granulat 0-2,5mm.						

Densité maximale, Dmm, et teneur réelle en bitume absorbé, Pba%

Deux échantillons ont été confectionnés pour déterminer la densité maximale de chacun des enrobés (tableau AVII).

Tableau AVII

Résultats des densités maximales mesurées en laboratoire et des teneurs réelles en bitume absorbé pour les enrobés à granulométrie contrôlée contenant du sable arrondi

Caractéristique		EG10-9,4	EG10-9,4- SNA5	EG10-9,4- SNA12	EG10-9,4- SNA18	EG10-9,4- SNA5,3-SPEC
Dmm	Échantillon 1	2,588	2,580	2,573	2,567	2,582
	Échantillon 2	2,583	2,581	2,577	2,563	2,578
	Moyenne	2,586	2,580	2,575	2,565	2,580
	Δ Dmm	0,005	0,001	0,004	0,004	0,004
Pba réel (%)		1,11	1,11	1,14	1,09	1,02
Pbi (%)		5,73	5,72	5,71	5,70	5,73
Vbe (%)		12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Pba estimé (%)		0,93	0,91	0,88	0,85	0,93

BIBLIOGRAPHIE

AIPCR, comité provincial. *Orniérage : état de la pratique au Québec*, Routes souples (Québec), Comité technique C8 de l'AIPCR pour le XX^{ème} Congrès mondial de la Route, Montréal, 1995.

AÏTCIN, C., JOLICOEUR, G., MERCIER, M. *Technologie des granulats*, 2^{ème} édition, Les éditions Le Griffon d'argile, 1992, 386 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). *Hot-mix asphalt paving handbook*, Washington, D. C., 1991.

ASPHALT INSTITUTE, MARKER, V. *Tender mixes : The causes and prevention*, information series no.168 (IS-168), june 1977, 6 p.

ASPHALT INSTITUTE. *Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types*, Manual series no.2 (MS-2), sixième édition, 1995, 141 p.

ASPHALT INSTITUTE. *Principles of construction of hot-mix asphalt pavements*, The asphalt Institute manual series no.22 (MS-22), 1983 et 1998.

BENSE, P. *Dangers, causes et remèdes de l'orniérage des chaussées*, RGRA, #759, février 1998, pp. 45-50.

BRION, Y. *Structure colloïdale des bitumes*, Laboratoire central des ponts et chaussées, Rapports des laboratoires, Série physique et chimie PC-4, 1984, 52 p.

BRÛLÉ, B., RAYMOND, G., SUCH, C. *Relations composition-structure-propriété des bitumes routiers*, État des recherches au LCPC, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1987, vol. 148, pp. 69-81.

BYNUM, D., TAXLER, R.N. *Gel permeation chromatography data on asphalts before and after service in pavements*, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, 1970, Vol. 39, pp. 683-702.

CAMPEN, W.H., SMITH, J.R., ERICKSON, L.S., MERTZ, L.R. *The control of voids in aggregates for bituminous paving mixtures*, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 26, 1957, pp. 297-311.

CHARBONNEAU, D. *Enrobés bitumineux et trafic lourd*, Routes et transports, vol. 29, # 4, automne 2000, pp. 28-31.

CHARBONNEAU, D. *Ornières d'usure dues à l'arrachement des granulats : Enrobés EB-14 et ESG-14*, Communication téléphonique, avril 2002.

CHOMTON, G., VALYER, P.J. *Applied rheology of asphalt mixes practical applications*, International conference on structure design asphalt pavement, Third symposium, vol. 1, Univ. Of Michigan, Dept. of civil engineering, 1972, pp. 214-225.

CHOQUET, F., Strategic Highway (SHRP), *Le vieillissement du bitume*, International Conference, The Hague, 1993, 20-24 sept.

CHOWDHURY, A., GRAU, J.D.C., BUTTON, J.W., LITTLE, D.N. *Effect of aggregate gradation on permanent deformation of Superpave HMA*, 80th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 2001.

DRON, R. *Méthode d'étude des caractéristiques viscoélastiques des bitumes*, Bitumes et enrobés bitumineux, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Décembre 1977, Numéro spécial V, ISSN 0458-5860.

DURAND, J.-M. *Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles*, ministère des Transports du Québec (MTQ), Édition 1993, ISBN : 2-550-27480-6, 43 p.

EISENMANN, J., HILMER, A. *Influence of wheel load and inflation pressure on the rutting effect at asphalt-pavements – experiments and theoretical investigations*, proceedings, sixth international conference on the structural design of asphalt pavements, 1987, vol. 1, Ann Arbor, pp. 392-403.

FIELD, F. *Voids in the mineral aggregate test methods and specification criteria*, Proceedings of the twenty-third annual conference of Canadian technical asphalt association, 1978, pp. 204-231.

GLOVER, C.J., BULLIN, J.A., BURTON, J.W., DAVISON, D.G.R., HLAVINKA, M.W., PHILIP, C.V. *Characterisation of asphalts using gel permeation chromatography and other methods*, Report / USDOT-FHWA 419-F, 1987.

GOODE, J.F., LUFSEY, L.A. *A new graphical chart for evaluating aggregate gradations*. Proc. AAPT, vol. 31, 1962, pp. 176-192.

GRIFFITH, J.M., KALLAS, B.F. *Aggregate voids characteristics in asphalt paving mixes*, Highway Research Board, Proceeding, 1957, vol. 36, pp. 382-387.

HAND, A.J., EPPS, A.L. *Impact of gradation relative to the Superpave restricted zone on HMA performance*, 80th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 2001.

HERSCHKORN, P. sous la direction de Jeuffroy, G., Sauteray, R. *Couches de roulement – Cours de routes*, 2^{ième} tirage, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, 1985, pp.162.

HUBER, G.A., HEIMAN, G.H. *Effect of asphalt concrete parameters on rutting performance : a field investigation*, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, 1987, pp. 33-61.

KANDHAL, P.S., MALLICK, R.B. *Effect of mix gradation on rutting potentiel of dense graded asphalt mixtures*, 80th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 2001.

KENNEL, M. *Morphologie et rôle des asphaltènes dans les bitumes routiers*, Bitumes et enrobés bitumineux, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, décembre 1977, Numéro spécial V, ISSN 0458-5860.

LANGLOIS, P., LECLERC, A.-M., PARADIS, M., TOURANGEAU, G., TREMBLAY, G. *Formulation d'enrobés selon la méthode LC*, GCI-718 : Enrobés, Notes de cours, Université de Sherbrooke et Transports Québec (Direction du Laboratoire des chaussés), janvier 2001, 203 p.

LANGLOIS, P. *L'ajout en sable et les enrobés tendres*, Communication téléphonique, mars et avril 2002.

LELIÈVRE, A. *Les enrobés bitumineux*, Les éditions "Le Griffon d'argile", ISBN 2-89443-016-7, 1994, 408 p.

McLEOD, N.W. *Relationships between density, bitumen content and voids properties of compacted bituminous paving mixtures*, Highway Research Board proceedings, 1956, vol. 35, pp. 327-404.

McLEOD, N.W. *Selecting the aggregate specific gravity for bituminous paving mixtures*, Highway Research Board, Proceedings 1957, vol. 36, pp. 282-317.

McLEOD, N.W. *Designing standard asphalt paving mixtures for greater durability*, Proceedings of the sixteenth annual conference of Canadian Technical Asphalt Association, 1971, vol. XVI, Montréal (Québec), pp. 53-94.

McLEOD, N.W., McLEAN., J.A. *A laboratory investigation of the compaction of dense graded asphalt concrete*, Proceedings of the nineteenth annual conference, Canadian technical asphalt association, vol. 19, November 1974, pp. 377-450.

McLEOD, N.W. *The design of dense graded asphalt concrete pavements*, Proceedings of the thirty-second annual conference, Canadian Technical Asphalt Association, 1987, pp. 352-404.

McRAE, J.L. *Discussion on the paper of N.W. McLeod "Void requirements for dense-graded bituminous paving mixtures"*, ASTM special technical publication no. STP 252, 1960, pp. 108-112.

MONISMITH, C.L., TAYEBALI, A.A. *Permanent deformation (rutting) considerations in asphalt concrete pavement sections*, Proocceeding, The Association of Asphalt paving Technologists, Williamsburg, Virginia, 1985, Vol. 57, pp. 414-463.

MOUGHABGHAB, Z. *Étude de l'orniérage, de la fissuration thermique et du désenrobage dans les enrobés bitumineux*, Université Laval, TA 7.5 UL 1994 M975 1, 1994.

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES (O.C.D.E.). *Résistance à la déformation plastique des chaussées souples*, rapport préparé par un groupe de recherche routière de l'O.C.D.E., Paris, 1975, pp. 124.

PARADIS, M., BÉRUBÉ, M.-A. *Influence de la fraction sable (80 μ m - 2.5mm) des granulats et du filler minéral (<80 μ m) sur la résistance à l'orniérage des chaussées routières*, Études et recherches en transports, Ministère des transports, 1997.

PARADIS, M. *Les produits expérimentaux et spéciaux utilisés au ministère des Transports du Québec*, Présentation à la journée Bitume 2001, Transports Québec, 29 mars 2001, Drummondville, 9 p.

PARKER, F., BROWN., E.R. *Effects of aggregate properties on flexible pavement rutting in Alabama*, Transportation Research Board 70th annual meeting, 1991, 40 p.

PERRATON, D. *CTN-356 : Sciences des matériaux*, notes de cours, Université du Québec, École de technologie supérieure, Département de génie de la construction, septembre 2000.

PROTEAU, M., PAQUIN, Y. *Analyse de performance de la résistance à l'orniérage de différents bitumes purs et modifiés par ajout de polymères*, Entreprise DJL, 35^{ème} congrès de l'A.Q.T.R., avril 2000.

PUZINAUSKAS, V.P. *Filler in asphalt mixtures*, research report no. 69-2 (RR-69-2), Asphalt Institute, révisé en avril 1983, 29 p.

SCHOLZ, T.V., BROWN, S.F. *Factors affecting the durability of bituminous paving mixtures*, Performance and durability of bituminous materials, Edited by J.G. Cabrera and J.R. Dixon, Published in 1996 by E and FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, ISBN 0-419-20540-3, pp. 173-190.

SERFASS, J.-P., BENSE, P., TESSONNEAU, H. *Nouvelles techniques de lutte contre l'orniérage*, Revue générale des routes et aérodromes, 1995, #735.

SHELL BITUMEN. *The shell bitumen handbook*, compiled by David Whiteoak, Angleterre, 1990, 336 p.

SHELL BITUMEN. *The shell bitumen industrial handbook*, 1995, 411 p.

SOCIÉTÉ DES PÉTROLES SHELL. *Bitumes : techniques et utilisations*, Shell bitumes, France, 1991, 149 p.

TREMBLAY, D. *Influence des différents paramètres de formulation et optimisation des enrobés à matrice de pierre*, Mémoire, Montréal, mai 2001, 143 p.

TRÉPANIÉ, G. *Le VAM : un critère pour la formulation, la fabrication, la normalisation et le contrôle des enrobés*, étude bibliographique, Montréal, École de technologie supérieure, 1990, 121 p.

YOUNG, J.F., MINDESS, S., GRAY, R.J., BENTUR, A. *The science and technology of civil engineering materials*, Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, 1998, ISBN 0-13-659749-1.

Autres références consultées

ASCHENBRENER, T. *Comparison of results obtained from the LCPC rutting tester with pavements of known field performance*, TRB 940118.

CAMPEN, W.H., SMITH, J.R., ERICKSON, L.S., MERTZ, L.R. *Factors that control asphalt requirements of bituminous paving mixtures and a method for determining the proper asphalt content*. Proc. AAPT, vol. 32, 1963, pp. 530-554.

CORTÉ, J.-F., BROSSEAUD, Y., KERZREHO, J.-P., SPERNOL, A. *Étude de l'orniérage des couches de roulement au manège d'essai du LCPC*, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, # 217, sept.-oct. 1998.

GRIFFITH, J. M., KALLAS, B.F. *Influence of fine aggregates on asphaltic concrete paving mixtures*. HRB Proc., vol. 37, 1958, pp. 219-255.

HADDOCK, J., PAN, C., FENG, A., WHITE, T.D. *Effect of gradation on asphalt mixture performance*, Journal of the transportation research board #1681, 1999, pp. 59-68.

LAFORTE, M.A., TESSIER, G.R., THÉRIAULT, R. *Performance d'un béton bitumineux fabriqué de scorie d'aciérie*, 24^{ème} Congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes, Routes et Transports, printemps 1989, pp. 15-20.

LANGLOIS, P., BEAUDOIN, M. *Méthode de formulation LC pour les enrobés*, Bulletin d'information technique, Direction du laboratoire des chaussées, vol. 2, #12, déc. 1997.

LECLERC, A.-M. *Évolution des enrobés au Québec Perspectives 90*, Revue générale des routes et aérodromes, #731, juillet-août 1995, pp. 67-73.

MAUPIN Jr., G.W. *Effect of baghouse fines on compaction of bituminous concrete*, VTRC 81-R49, Virginia Highway and Transportation Research Council, Charlottesville, Va., mai 1981.

McLEOD, N.W. *Void requirements for dense-graded bituminous paving mixture*, Special Technical Publication no. STP 252, American Society for testing and materials, 1960, pp. 81-107.

MTQ. *Cahier des charges et devis généraux*, M.T.Q., Québec, 1986.

MTQ. (Recommandations), *Enrobés pour construction neuve ou reconstruction*, Direction du Laboratoire des chaussées, <http://www2.mtq.gouv.qc.ca/reseau/chaussees/fiches/neuves.pdf>, 2000 (Consulté le 15 novembre 2001).

NIJBOER, L.W. *Plasticity as a factor in the design of road carpets*. Amsterdam Laboratory of the N.V. De Bataafshe petroleum Maatschappij (Royal Dutch Shell group), Elsevier publishing company Inc.

PARADIS, M. *L'étude des enrobés bitumineux en laboratoire : l'approche du ministère des Transports du Québec*, Routes et transports, vol. 29, # 4, automne 2000.

VERSTRAETEN, J. *Enrobés bitumineux à haute résistance à l'orniérage par fluage*, Comité technique de l'AIPCR (Association internationale permanente des Congrès de la Route), rapport 08.03.B, 1995.

Normes consultées

- ASTM D 242-95 Standard specification for mineral filler for bituminous paving mixture, éd. 1995.
- ASTM D 422-63 Test method for particle-size analysis of soils, éd. 1998.
- LC 21-100 Détermination du pourcentage de particules fracturées du gros granulat, éd. 2000.
- LC 21-101 Détermination du coefficient d'usure par attrition du granulat fin à l'aide de l'appareil micro-Deval, éd. 1999.
- LC 21-400 Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles, éd. 1998.
- LC 25-005 Recouvrance d'élasticité, éd. 2000.
- LC 25-007 Évaluation de la température associée à une viscosité, éd. 1998.
- LC 26-003 Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire, éd. 2000.
- LC 26-004 Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du Laboratoire des chaussées, éd. 1997.
- LC 26-010 Réduction en laboratoire d'échantillons en vue d'essais, éd. 2000.
- LC 26-040 Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés, éd. 1997.
- LC 26-045 Détermination de la densité maximale, éd. 1999.
- LC 26-400 Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé, norme préliminaire, décembre 2001.
- LC 26-410 Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage, norme préliminaire, décembre 2001.
- NF P 98-250-2 Préparation des mélanges hydrocarbonés; partie 2 : Compactage des plaques, éd. 1991.

NF P 98-253-1	Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés; partie 1 : Essai d'orniérage, éd. 1991.
Norme 2101	Granulats, éd. 1999.
Norme 4202	Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées, éd. 2000.
NQ 2300-900	Mélanges bitumineux – Détermination de caractéristiques par le calcul de divers facteurs, éd. 1987.
NQ 2501-025	Sols – Analyse granulométrique des sols inorganiques, éd 1987.
NQ 2560-040	Granulats – Analyse granulométrique par tamisage, éd. 1982.
NQ 2560-065	Granulats – Détermination de la densité et de l'absorptivité du granulat fin, éd. 1983.
NQ 2560-067	Granulats – Détermination de la densité et de l'absorptivité du gros granulat, éd. 1983.
NQ 2560-070	Granulats – Détermination du coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil micro-Deval, éd. 1989.
NQ 2560-075	Granulats – Détermination du coefficient d'écoulement des granulats fins, éd. 1991.
NQ 2560-080	Granulats – Détermination du coefficient de friabilité des granulats fins, éd. 1986.
NQ 2560-350	Granulats – Détermination par lavage de la quantité de particules passant au tamis de 80µm, éd. 1983.