

**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
MÉLANIE BERTRAND**

**UTILISATION DE GRANULATS COLORÉS POUR LA FORMULATION
D'ENROBÉS BITUMINEUX COLORÉS**

MONTRÉAL, LE 5 AOÛT 2002

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

- **Madame Michèle Saint-Jacques, professeur et directrice de mémoire**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure
- **Monsieur Daniel Perraton, professeur et codirecteur de mémoire**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure
- **Monsieur Gabriel Assaf, professeur et président du jury**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure
- **Monsieur Jean-Sébastien Dubé, professeur**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET UN PUBLIC
LE 3 JUILLET 2002
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

UTILISATION DE GRANULATS COLORÉS POUR LA FORMULATION D'ENROBÉS BITUMINEUX COLORÉS

Mélanie Bertrand

Sommaire

La sécurité routière est un sujet d'actualité pour bon nombre de gestionnaires routiers. De plus, l'usage de différents modes de transports sur les mêmes voies de circulation créent de la confusion chez les usagers et contribue même à l'augmentation des accidents en milieu urbain. Or, la signalisation verticale et horizontale ne suffit plus à partager les espaces réservés aux différents modes de transport. Utilisés déjà depuis bon nombre d'années en Europe, les enrobés de couleur permettent de définir les différents espaces requis pour assurer la sécurité des différents usagers d'une route qu'ils soient cyclistes, automobilistes, camionneurs ou piétons.

Cette étude vise à établir, à partir de la revue de la documentation, les caractéristiques et composantes d'un EBC (enrobé bitumineux coloré), à s'assurer qu'il est possible de retrouver facilement les matières premières requises et d'en mesurer les performances en laboratoire. Le programme expérimental repose sur la couleur que permet d'obtenir l'usage de granulats colorés associés à l'utilisation de pigments de couleur ou de liant synthétique.

Les phases 2 et 3 du programme expérimental permettront d'optimiser quatre mélanges d'EBC en utilisant des granulats et pigments de couleurs variées et en utilisant un liant synthétique pour un des quatre mélanges. Selon les résultats obtenus lors des essais de caractérisation des granulats, de la résistance à l'ombrage et d'oxydation en laboratoire, les enrobés bitumineux colorés possèdent de bonnes qualités de maniabilité, de résistance à la déformation ainsi qu'au changement de couleur. C'est pourquoi les EBC s'avèrent un choix judicieux pour permettre une meilleure cohabitation des différents usagers de la route.

REMERCIEMENTS

L'achèvement de cette grande aventure m'a permis d'acquérir de nombreuses qualités tant professionnelles que personnelles. Un projet de cette envergure ne peut se réaliser sans l'appui de personnes qui ont de près ou de loin contribué à la réalisation de mon mémoire de maîtrise. Les deux dernières années que j'ai passées à l'ETS sont inoubliables pour toutes sortes de raisons.

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de maîtrise Mme Michèle St-Jacques ainsi que mon co-directeur M. Daniel Perraton pour leur soutien tant technique, monétaire que moral. Sans leurs encouragements et leurs idées, le projet n'aurait pu être réalisé. De plus, ils m'ont permis de voyager, d'assister à des conférences techniques dans le domaine des routes et des matériaux ainsi que de présenter mon état d'avancement des travaux lors d'une conférence.

Afin de rendre possible mon projet, j'ai obtenu la précieuse collaboration de gens de l'industrie que se soit pour la fourniture de produits inédits ou par la transmission de connaissances sur le sujet. Je tiens donc à remercier les gens et entreprises suivantes : monsieur Dinh Duong de la compagnie Bitumar Inc. pour l'échantillon de bitume synthétique, monsieur Werner Hans de la compagnie Bayer Inc. pour les échantillons de pigments de couleur ainsi que les informations techniques sur la fabrication d'enrobés colorés, monsieur Jude Langlois de Les carrières Saint-Ferdinand Inc. pour les échantillons de granulats colorés ainsi que monsieur Michel Lazure du site d'enfouissement Miron pour sa collaboration concernant l'expérience québécoise en matière de revêtements colorés.

J'aimerais par la suite remercier le personnel de soutien du département de génie de la construction de l'École de technologie supérieure. Une pensée toute particulière à monsieur Alain Desjardins pour sa disponibilité et son aide précieuse durant les essais de laboratoire.

Je tiens aussi à remercier les professeurs du département de génie de la construction de m'avoir fait confiance en me confiant des périodes en tant qu'auxiliaire d'enseignement. Cela m'a permis d'accroître mes connaissances techniques ainsi que mes talents d'oratrice tout en subventionnant mes études.

Je ne voudrais pas passer sous silence l'aide et le soutien quotidien de mes deux collègues et amis Alan Carter et Sébastien Lamothe sans qui les deux années passées à la maîtrise n'auraient pu être aussi agréables.

Un gros merci à Éric et Annie qui m'ont permis de lâcher mon fou et de mettre un baume sur les moments difficiles. Un merci sincère à Stéphane Lavallée qui a été d'une aide inestimable.

Enfin, j'aimerais remercier tous mes parents et amis qui m'ont encouragé et ont cru en moi pour la poursuite de mon projet. J'offre une pensée toute spéciale à tous ceux et celles que j'ai négligé par mon manque de disponibilité durant les derniers deux ans.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xv
GLOSSAIRE	xvii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : LES ENROBÉS COLORÉS; REVUE DE LA DOCUMENTATION	4
1.1 Constituants : granulats, liants et pigments	4
1.1.1 Granulats	5
1.1.2 Liants	7
1.1.2.1 Bitumes standards	7
1.1.2.2 Bitumes pigmentables	8
1.1.2.3 Bitumes synthétiques	9
1.1.2.4 Liants à base de résines	10
1.1.2.5 Comportement des bitumes synthétiques	15
1.1.3 Pigments	16
1.1.3.1 Taux de pigmentation	21
1.1.3.2 Dosage en pigments	22

1.2 Formulation des enrobés colorés	24	
1.3 Utilisation des enrobés colorés	27	
1.4 Avantages des enrobés colorés	34	
1.4.1 Comportement à l'omierage	34	
1.4.2 Économie d'éclairage	37	
1.4.3 Amélioration de la sécurité	40	
1.5 Coûts et mise en œuvre des enrobés colorés	42	
1.6 Expériences québécoises	45	
 CHAPITRE 2 : GRANULATS POUR LA FORMULATION D'ENROBÉS		
COLORÉS QUÉBÉCOIS		47
2.1 La géologie du Québec	47	
2.1.1 La géologie du Québec : Chronologie	47	
2.1.2 La géologie du Bouclier canadien	48	
2.1.2.1 La province du Lac Supérieur	49	
2.1.2.2 La province de Grenville	50	
2.1.3 La géologie des Basses-Terres du St-Laurent	51	
2.1.4 La géologie des Appalaches	51	
2.2 La production de granulats au Québec et au Canada	51	
2.3 Les propriétés des roches	55	
2.3.1 La classification des roches	55	
2.3.1.1 Les roches ignées	56	
2.3.1.2 Les roches sédimentaires	59	
2.3.1.3 Les roches métamorphiques	61	
2.4 Les sources de granulats colorés au Québec	64	
2.4.1 Les granulats de couleur verte	64	
2.4.2 Les granulats de couleur rose	65	
2.4.3 Les granulats de couleur beige	65	
2.5 Les pigments colorés	65	
2.5.1 Les pigments bleus	65	
2.5.2 Les pigments verts	66	
2.5.3 Les pigments rouges	66	

2.5.4 Les pigments bruns	67
2.5.5 Les pigments jaunes	67
2.5.6 Les pigments blancs	67
CHAPITRE 3 : CHOIX DES CONSTITUANTS POUR LA FORMULATION D'ENROBÉS COLORÉS	69
3.1 Critères de conception	69
3.2.1 Aspects techniques	70
3.2.2 Aspects sécuritaires	70
3.2.3 Aspects économiques	70
3.3 Critères de sélection des constituants	71
3.3.1 Choix des GG	71
3.3.2 Choix des GF	72
3.3.3 Choix des pigments	72
3.3.4 Choix du liant	72
CHAPITRE 4 : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	74
4.1 Étapes de réalisation	74
4.2 Paramètres étudiés	78
4.3 Matériaux utilisés	78
4.3.1 Granulats	79
4.3.2 Bitumes	81
4.3.3 Pigments	81
4.4 Formulations réalisées	82
4.5 Essais en laboratoire	83
4.5.1 Essais sur GG	84
4.5.1.1 Analyse granulométrique par tamisage	84
4.5.1.2 Détermination de la densité et de l'absorptivité du GG	84
4.5.1.3 Détermination du coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil micro-Deval	85
4.5.1.4 Détermination du pourcentage de particules plates et de particules allongées	85

4.5.1.5 Détermination des particules fines du tamisat de 80 µm	86
4.5.1.6 Particules concassées	86
4.5.1.7 Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles	86
4.5.1.8 Adhésivité passive des liants anhydres en présence d'eau	86
4.5.2 Essais sur GF	87
4.5.2.1 Analyse granulométrique des sols inorganiques	87
4.5.2.2 Détermination de la densité et de l'absorptivité du GF	87
4.5.2.3 Détermination du coefficient d'écoulement des GF	88
4.5.2.4 Détermination du coefficient de friabilité des GF	88
4.5.2.5 Détermination du coefficient d'usure par attrition du GF à l'aide de l'appareil micro-Deval	88
4.5.3 Essais sur bitume	89
4.5.3.1 Viscosité Brookfield	89
4.5.3.2 Dynamic Shear Rheometer	90
4.5.3.3 Essai de densité	91
4.5.4 Essais sur enrobés bitumineux	91
4.5.4.1 Résistance à l'oxydation	91
 CHAPITRE 5 : PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	92
5.1 Résultats des essais sur les granulats	92
5.1.1 Essais sur GG	92
5.1.1.1 Analyse granulométrique par tamisage	92
5.1.1.2 Détermination de la densité et de l'absorptivité du GG	94
5.1.1.3 Détermination du coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil micro-Deval	96
5.1.1.4 Détermination du pourcentage de particules plates et de particules allongées	97
5.1.1.5 Détermination des particules fines du tamisat de 80 µm	97
5.1.1.6 Particules concassées	98
5.1.1.7 Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles	99

5.1.1.8 Essai d'adhésivité passive des liants anhydres en présence d'eau	100
5.1.2 Essais sur GF	101
5.1.2.1 Analyse granulométrique des sols inorganiques	102
5.1.2.2 Détermination de la densité et de l'absorptivité du GF	102
5.1.2.3 Détermination du coefficient d'écoulement des GF	103
5.1.2.4 Détermination du coefficient de friabilité des GF	104
5.1.2.5 Détermination du coefficient d'usure par attrition du GF à l'aide de l'appareil micro-Deval	105
5.1.3 Synthèse des résultats des essais sur granulats	106
5.2 Essais sur le bitume	108
5.2.1 Viscosité Brookfield	109
5.2.2 Dynamic Shear Rheometer	109
5.2.3 Essai de densité	109
5.2.4 Synthèse des résultats des essais sur bitume	111
5.3 Formulation	111
5.3.1 Mesure de la D_{mm} et du P_{ba} %	114
5.3.2 Remarques concernant les résultats de D_{mm}, de P_{ba} % et de P_{bi} %	117
5.3.3 Aptitude au compactage des enrobés confectionnés	117
5.3.4 Remarques concernant l'aptitude au compactage des enrobés confectionnés	121
5.3.5 Remarques concernant la résistance à l'orniérage des enrobés confectionnés	121
5.3.6 Résistance à l'orniérage des enrobés confectionnés	122
5.3.7 Synthèse des résultats d'essais sur EBC	124
5.4 Résistance à l'oxydation	124
CHAPITRE 6 : DISCUSSION ET ANALYSE DES RÉSULTATS	127
6.1 Comportement des granulats étudiés	127
6.2 Caractérisation des bitumes	128
6.3 Étude du comportement des EBC	129

6.3.1 Étude de l'aptitude au compactage des EBC	129
6.3.1.1 Aspect visuel des EBC compactés à la PCG	130
6.3.2 Étude de la résistance à l'orniérage des EBC	131
6.3.3 Étude de la résistance à l'oxydation des EBC	132
CONCLUSION	133
RECOMMANDATIONS	135
ANNEXES	
1 : Fiches techniques des pigments employés	136
2 : Norme française	143
3 : Fiche technique du bitume employé	151
BIBLIOGRAPHIE	153

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau I	Caractéristiques des bitumes pigmentables	9
Tableau II	Caractéristiques des bitumes synthétiques	10
Tableau III	Comparaison de l'absorptivité spécifique de différents liants	14
Tableau IV	Comparaison des propriétés de différents types de liants	15
Tableau V	Les types de pigments et taux de pigmentation recommandés pour colorer les enrobés à chaud selon le type de liant	23
Tableau VI	Composition d'un enrobé bitumineux bleu	26
Tableau VII	Composition d'un enrobé bitumineux beige	26
Tableau VIII	Composition d'un enrobé sans pigment	27
Tableau IX	Domaines d'emploi de la couleur en milieu urbain	33
Tableau X	Comparaison de la résistance à la fatigue de deux types d'enrobés bitumineux	36
Tableau XI	Comparaison des facteurs de réflexion et de luminance entre différents matériaux routiers	38
Tableau XII	Coût de différents pigments	43
Tableau XIII	Signification des lettres concernant la production de pierre architecturale au Québec	53
Tableau XIV	Utilisation du granite et du grès dans le domaine routier	54
Tableau XV	Utilisation du granite et du grès par rapport à l'utilisation de la pierre totale	54
Tableau XVI	Échelle de dureté de Mohs	57
Tableau XVII	Paramètres initiaux de formulation des EBC	79
Tableau XVIII	Caractéristiques des granulats choisis	80
Tableau XIX	Caractéristiques des pigments choisis	83
Tableau XX	Température limite H selon la température élevée de caractérisation	90
Tableau XXI	Résultats de l'analyse granulométrique des trois types de granulats	93
Tableau XXII	Résultats et indices de fidélité concernant le GG	95

Tableau XXIII	Résultats de l'essai micro-Deval sur les granulats	96
Tableau XXIV	Résultats obtenus à l'essai sur particules plates et allongées du granite	97
Tableau XXV	Résultats à l'essai sur particules fines de la norme CSA	98
Tableau XXVI	Synthèse des résultats concernant les particules fracturées	99
Tableau XXVII	Synthèse des résultats de l'essai Los Angeles	100
Tableau XXIII	Synthèse des résultats d'adhéritivité liants/granulats	101
Tableau XXIX	Synthèse des résultats d'absorptivité et densité des GF de type ortho-quartzite	103
Tableau XXX	Résultats de l'essai d'écoulement des GF	104
Tableau XXXI	Synthèse des résultats d'essai de friabilité des GF	105
Tableau XXXII	Synthèse des résultats obtenus à l'essai d'usure par attrition	106
Tableau XXXIII	Synthèse des caractéristiques des granulats étudiés	107
Tableau XXXIV	Synthèse des résultats des essais de viscosité Brookfield	109
Tableau XXXV	Résultats de l'essai de densité	110
Tableau XXXVI	Synthèse des caractéristiques du bitume synthétique	111
Tableau XXXVII	Exigences pour un enrobé bitumineux de type ESG-10	115
Tableau XXXVIII	Synthèse des résultats obtenus pour les D_{mm} , P_{ba} et P_{bi}	116
Tableau XXXIX	Dosages réels des enrobés colorés confectionnés en laboratoire après ajustements	118
Tableau XXXX	Caractéristiques des EBC	124

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	6
Figure 1.2	11
Figure 1.3	12
Figure 1.4	13
Figure 1.5	17
Figure 1.6	19
Figure 1.7	20
Figure 1.8	24
Figure 1.9	27
Figure 1.10	28
Figure 1.11	28
Figure 1.12	28
Figure 1.13	29
Figure 1.14	29
Figure 1.15	30
Figure 1.16	35
Figure 1.17	35
Figure 1.18	38
Figure 1.19	39
Figure 1.20	39
Figure 1.21	41
Figure 1.22	44
Figure 1.23	46
Figure 1.24	46
Figure 2.1	49
Figure 2.2	52

Figure 2.3	Fluctuations de la production de pierre au Canada	55
Figure 2.4	Le cycle des roches et leur processus de formation	64
Figure 2.5	Couleur des pigments utilisables avec un bitume synthétique	68
Figure 3.1	Zones permettant le choix du type de liant	73
Figure 4.1	Synthèse du programme expérimental	75
Figure 4.2	Synthèse des étapes de la phase 1 du programme expérimental	76
Figure 4.3	Synthèse des étapes de la phase 2 du programme expérimental	77
Figure 4.4	Synthèse des étapes de la phase 3 du programme expérimental	77
Figure 5.1	Analyse granulométrique de l'échantillon d'ortho-quartzite	93
Figure 5.2	Séchage à la serviette des granulats pour obtenir l'état SSS	93
Figure 5.3	Granulats dans le bassin d'eau soumis à la poussée d'Archimède	94
Figure 5.4	Appareil micro-Deval durant l'essai de friabilité	95
Figure 5.5	Procédure de lavage au tamis de 80 µm	97
Figure 5.6	Échantillon pour l'essai de particules concassées	98
Figure 5.7	Appareil Los Angeles	99
Figure 5.8	Échantillons après l'essai d'adhésivité	100
Figure 5.9	Analyse granulométrique par sédimentation	101
Figure 5.10	Matériel pour l'essai d'absorptivité sur GF	102
Figure 5.11	Montage pour l'essai d'écoulement	103
Figure 5.12	Charge abrasive pour l'essai de friabilité des GF	104
Figure 5.13	Appareil micro-Deval et chronomètre ajusté à 15 minutes	105
Figure 5.14	Viscosimètre Brookfield	107
Figure 5.15	Courbe de températures	109
Figure 5.16	Courbe granulométrique du Mélange 1	111
Figure 5.17	Courbe granulométrique du Mélange 2	112
Figure 5.18	Courbe granulométrique du Mélange 3	112
Figure 5.19	Courbe granulométrique du Mélange 4	113
Figure 5.20	Résultats de l'essai à la PCG pour chacun des mélanges utilisés	118
Figure 5.21	Évolution des vides dans le Mélange 1	118
Figure 5.22	Évolution des vides dans le Mélange 2	119
Figure 5.23	Évolution des vides dans le Mélange 3	119
Figure 5.24	Évolution des vides dans le Mélange 4	120

Figure 5.25	Ornières dans le Mélange 1 à 3 000 cycles	121
Figure 5.26	Ornières dans le Mélange 2 à 3 000 cycles	122
Figure 5.27	Ornières dans le Mélange 3 à 3 000 cycles	122
Figure 5.28	Ornières dans le Mélange 3 à 10 000 cycles	122
Figure 5.29	Variation de couleur avant et après oxydation (24 heures)	124
Figure 5.30	Variation de couleur avant et après oxydation (72 heures)	125
Figure 6.1	Volume des vides selon le type de mélange utilisé	130

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

-	Environ
ACIA	Agence canadienne d'inspection des aliments
ACR	Acryliques et vinyliques
Bar	Unité de pression
cd	Candela
CERTU	Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques
CETU	Centre d'études des tunnels
cm	Centimètre
cm ³	Centimètre cube
D _{gb}	Densité brute des granulats
D _{mm}	Densité maximale du mélange
DSR	Dynamic Shear Rheometer
ε	Epsilon
EBC	Enrobé bitumineux coloré
EP	Résines époxydiques
ESG	Enrobé bitumineux semi-grenu
F/m ²	Franc par mètre carré
g	Gramme
GF	Granulat fin (<i>ou granulats fins</i>)
GG	Gros granulat (<i>ou gros granulats</i>)
Hz	Hertz
kg	Kilogramme
Kg/m ³	Kilogramme par mètre cube
L	Litre
lx	Lux
m	Mètre
m ²	Mètre carré
min	Minute
mL	Millilitre

mm	Millimètre
μm	Micromètre
mm^3	Millimètre cube
MPa	Mégapascal
MTQ	Ministère des Transports du Québec
N	Newton
N_{design}	Nombre de girations correspondant à la compaction de design
N_{final}	Nombre de girations correspondant à la compaction finale
N_{initial}	Nombre de girations correspondant à la compaction initiale
$^{\circ}\text{C}$	Degré celsius
$^{\circ}\text{F}$	Degré farenheight
P_{bs}	Pourcentage de bitume absorbé par les granulats
Pa	Pascal
Pa.s	Pascal seconde
P_{bi}	Teneur en bitume exprimée en pourcentage
$P_{\text{bi.est}}$	Pourcentage de bitume initial
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PEBA	Polyester
PMMA	Poly(méth)acryliques
PUR	Polyuréthannes
s	Seconde
VAM %	Pourcentage des vides intergranulaires
V_{be}	Volume de bitume effectif
$V_{\text{i}} \%$	Pourcentage des vides interstitiels

GLOSSAIRE

Alluvions. Dépôts de sédiments tels le sable, le gravier ou les cailloux, abandonnés par un cours d'eau lorsque le débit ou la pente sont insuffisants.

Agrégats. Matériaux greus d'origine minérale, calibrés, destinés à être utilisés avec ou sans liant. Voir aussi *Granulats*.

Asphalte coulé. Mélange de granulats fins, de bitume et de filer présentant une consistance fluide à chaud, malaxé dans une installation fixe ou mobile, puis transporté par camion malaxeur. Il est utilisé sur route, trottoir ou en étanchéité d'ouvrage et de bâtiment.

Asphalte naturel. Roche sédimentaire, généralement calcaire, naturellement empreinte de bitume natif, dans une proportion qui varie de 6 à 10% selon les gisements. On retrouve dans les Bermudes et à Trinidad de tels phénomènes.

Asphaltène. Solide noir, cassant, pratiquement impénétrable, qui donne sa couleur au bitume (5 à 25% de la composition d'un bitume).

Béton bitumineux à chaud. Mélange de liant hydrocarboné, de granulats

(éventuellement de dopes ou d'additifs), dosés, chauffés et malaxés dans une centrale d'enrobage. Ils sont ensuite transportés et mis en œuvre sur chaussée. Ils sont utilisés en couche de roulement.

Béton bitumineux semi-greux. Béton bitumineux à chaud utilisé pour la réalisation de couche de surface (couche de liaison et/ou de roulement) pour des chaussées à moyen et fort trafics.

Bitume standard (bitume pur). Bitume obtenu directement par procédé de raffinage, sans aucun ajout. Il est composé de saturés, d'aromatiques, de résines et d'asphaltènes.

Bitume synthétique. Voir *liant synthétique*.

Bitume pigmentable. Bitume dépourvu en tout ou en partie d'asphaltènes le rendant apte à être coloré plus facilement. Des résines viennent compenser les pertes de propriétés créées par le retrait des asphaltènes.

Coalescence. Union des granules d'une solution colloïdale ou des gouttelettes d'une émulsion.

Couleurs atténuees. Couleurs caractérisées par une faible intensité.

Il s'agit du rose, brun, brique, sable, ocre, bleu et gris, d'une tonalité claire ou sombre.

Dyke. Filon de roche magmatique.

Enrobé bitumineux. Un enrobé bitumineux est un mélange uniforme de granulats enrobés de bitume utilisé dans les revêtements de chaussées.

Enrobé coulé à froid (ECF). Mélange de granulats, d'émulsion et d'additifs réalisés grâce à un matériel spécifique, automoteur, adapté à sa consistance. Ils sont utilisés pour la réalisation de couche de roulement; ne pas confondre avec les coulis bitumineux qui sont utilisés en couche de reprofilage, ou de préparation, avant la réalisation d'une couche de roulement.

Filler. Poudre minérale dont les grains sont inférieurs à 0,063 mm. La présence de filler augmente la compacité de l'enrobé ou du béton.

Granulats. Agrégats de différentes tailles : les gravillons et les sables sont des granulats. Un ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 80 mm. Terme technique, il désigne un matériau intervenant dans la composition de la chaussée et comprend les sables, les gravillons et les graves. Le terme de « matériau »

est en pratique souvent pris comme synonyme de granulat. Voir aussi Agrégats.

îlot directionnel. Terre-plein non circulable permettant d'orienter la circulation dans une direction précise.

îlot séparateur. Séparation physique de deux sens de circulation.

Liant. Constituant permettant de lier des granulats entre eux pour réaliser des matériaux présentant de bonnes performances mécaniques.

Liant hydrocarboné. Liant à base d'hydrocarbures. Les liants hydrocarbonés ont des propriétés de cohésion et d'adhésivité qui leur permettent de lier les granulats, et possèdent la propriété de garder une certaine souplesse.

Liant synthétique. Matériau composé uniquement de résines et de polymères entrant dans la composition d'EBC. Il est utilisé à la place du bitume standard pour l'obtention de couleurs plus éclatantes. Ceux-ci possèdent les mêmes caractéristiques rhéologiques que les bitumes standards. Voir aussi bitume synthétique.

Maltène. Fraction huileuse stable du bitume. Les maltènes sont solubles dans l'heptane, cette propriété étant

utilisée pour les séparer des asphaltènes.

Minéral. Les minéraux sont les constituants des roches. Substance inorganique naturelle possédant une structure atomique et une composition chimique caractéristique.

Orniérage. Déformation permanente longitudinale occasionnée par le passage des roues au même endroit.

Porphyre. Roche plutonique, proche du granit, à caractéristiques mécaniques élevées. De ce fait, elle est souvent utilisée pour des couches de roulement sur voies à trafic élevé (pavés de Paris).

Résine. Produit chimique solide ou semi-liquide, translucide et insoluble dans l'eau, utilisé dans les peintures, les colles, les revêtements de sol.

Ressuage. Remontée de liant bitumineux à la surface d'une couche de roulement (enduit) ou de mortier constitué de liant et de fines dans le cas d'une couche de roulement en enrobé.

Rhéologie. L'étude de la déformation d'un corps sous l'effet d'une sollicitation est la rhéologie. La rhéologie est la science qui fait l'étude des lois de comportement des

matériaux (viscosité, plasticité, élasticité) liant les contraintes et les déformations à un instant donné.

Roche. Agrégat naturel consolidé qui peut être constitué de divers matériaux (minéraux, débris de minéraux ou d'autres roches, verre volcanique, matière organique, coquillages, charbon, pétrole, etc.) et qui correspond à un mode de formation particulier. Il est possible qu'une roche soit presque entièrement constituée d'un seul minéral, on appelle cette roche alors une roche mono minéralisée comme c'est le cas pour le quartzite.

Rutile. Oxyde de titane.

Schiste. Roche métamorphique, altérée, feuilletée se divisant aisément en lames.

Spinelle. Oxyde d'aluminium et de magnésium pouvant donner des pierres fines de couleurs variées.

Urbain. Qui concerne la ville.
Aménagement urbain : aménagement en ville (différent de rural).

INTRODUCTION

Les enrobés bitumineux colorés (EBC) sont des matériaux de voirie au même titre que les enrobés bitumineux standards noirs, les pavés, le béton ou la pierre. Afin de donner une couleur aux enrobés bitumineux, plusieurs techniques sont envisageables ainsi que plusieurs matériaux employés. C'est ce dont il sera question dans le premier chapitre.

Selon le Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU) (1997), les enrobés colorés doivent répondre à trois objectifs précis pour que leur utilisation convienne à l'usage déterminé. Le premier de ces objectifs concerne le cadre de vie. L'utilisation des enrobés colorés peut contribuer à créer des ambiances urbaines, à améliorer la distinction entre les différents espaces tout en diminuant l'utilisation de marquage horizontal. Le second objectif consiste à rendre plus sécuritaire les voies urbaines en ayant un effet bénéfique sur les habitudes de conduites des usagers (Hunter et autres, 2000). Le dernier objectif concerne la prudence d'utilisation des enrobés colorés. Puisque le choix de couleurs possibles est important, il est essentiel de définir des critères de réalisation en milieu urbain afin d'éviter la confusion.

Les enrobés colorés ont suscité l'intérêt dans différents pays et ce, depuis plusieurs années. En effet, les États-Unis, la Grande-Bretagne, l'Allemagne, l'Italie et la France se sont penchés sur l'étude des enrobés clairs ou colorés. Les premiers enrobés colorés étaient de teinte rouge foncé et utilisés principalement en voirie urbaine. Cette couleur était obtenue par l'ajout de pigments d'oxyde de fer lors du malaxage combiné à l'utilisation de granulats de couleur assortie. Plus tard, l'utilisation de bitumes pigmentables a permis d'obtenir une teinte rouge plus franche et d'économiser sur la quantité de pigments en plus de permettre la réalisation d'enrobés verts à l'aide de pigments d'oxyde de chrome. Les liants de synthèse ont fait leur apparition dans les années 1980 et ont permis d'élargir la palette de couleurs pour les revêtements de chaussées souples (AIPCR, 1999). Il semble y avoir mésentente entre les auteurs en ce qui concerne le pionnier des fabricants de liant synthétique. En effet, Groz et

Masson (1995) stipulent que c'est dans le début des années 1990 que les compagnies Gerland et BP ont fait breveter ce type de liant. Loustalot et autres (1995) et Dollin et Genardini (1994) attribuent plutôt à Shell les mérites de la première recette du bitume synthétique. De plus, Pannetier et Mariaud (1994) mentionnent que ce type de liant a perdu de sa popularité dans les années 1980 pour subir un regain d'intérêt au début des années 1990. Ce qui laisserait croire que la naissance des liants synthétiques daterait des années 1980.

Actuellement au Québec, on note une nouvelle tendance lorsqu'il est question d'infrastructures urbaines. En effet, dans un contexte économique favorisant les projets de réfection des infrastructures, la tendance est pour une vision globale des infrastructures urbaines. Ce type de vision permet d'intégrer pour un même projet différents aspects inter-reliés tels que la sécurité, la qualité de vie, l'ambiance urbaine, les enjeux sociaux et politiques ainsi que la durabilité des matériaux. En effet, avec la venue des contrats de performance exigés par le ministère des Transports du Québec, la bonne planification combinée avec un choix de matériaux durable est de mise.

Cette nouvelle tendance entraîne donc un intérêt pour des matériaux nouveaux et l'utilisation de technologies de pointe. Dans un même ordre d'idée, la recherche universitaire est de plus en plus axée vers des champs d'application pratiques, permettant d'apporter des solutions à des problématiques courantes.

Dans le monde et plus particulièrement au Québec, la sécurité routière revêt une grande importance. Des panneaux publicitaires nous invitent à ralentir à l'approche de chantiers ou pour se méfier du phénomène de glace noire, des messages télévisés chocs invitent les gens à ralentir et à ne pas prendre le volant lors de consommation d'alcool. Les piétons et les cyclistes font partie intégrante des politiques de sécurité qui vise à rendre plus visibles les traverses aux carrefours en utilisant des matériaux contrastants comme le béton ou le pavé uni.

Puisque les Européens utilisent depuis plusieurs années les enrobés colorés dans le but de rendre plus sécuritaires les zones piétonnes et cyclables, la présente étude

consiste à déterminer si cette technologie est importable dans le contexte québécois. L'étude tentera de cibler en un premier temps quelles sont les utilisations, les composantes et les limitations de l'utilisation des enrobés bitumineux colorés dans une étude bibliographique. Par la suite, il s'agira de déterminer s'il est possible de se procurer tous les matériaux requis pour effectuer au Québec des enrobés bitumineux colorés. Une étude des caractéristiques des matériaux sera effectuée afin de déterminer s'il est possible de les utiliser pour la confection d'enrobés bitumineux répondant aux exigences des normes québécoises. Finalement, la performance en laboratoire des enrobés bitumineux colorés confectionnés sera mesurée afin de vérifier l'hypothèse qu'il est possible d'effectuer des enrobés bitumineux de couleur au Québec avec des matériaux locaux.

CHAPITRE 1

LES ENROBÉS COLORÉS, REVUE DE LA DOCUMENTATION

Les enrobés colorés possèdent comme particularité une couleur autre que le noir. Ils doivent avoir les mêmes caractéristiques d'adhérence de surface, de résistance au vieillissement sous l'effet des rayons ultra-violets ou du poinçonnement que les enrobés standards (Shell, 1997). La coloration provient soit du liant, des granulats ou des deux composants à la fois. Pour obtenir une couleur plus éclatante, il est possible d'ajouter des pigments minéraux au mélange. Il existe six techniques permettant de colorer les revêtements routiers en France. Parmi les techniques utilisées, il y a les enduits superficiels d'usure (ESU) avec granulats colorés de fine dimension (4/6) qui sont utilisés dans les zones peu circulées. Il y a aussi les coulis bitumineux utilisés dans les zones piétonnes. Les enrobés coulés à froid colorés figurent aussi parmi les techniques utilisées pour les rues et les pistes cyclables. L'asphalte coloré est employé pour les rues et les trottoirs de ville. Les enrobés colorés à chaud appliqués en faible épaisseur (≤ 4 cm) font partie des techniques employées. Les bitumes pigmentables sont aussi utilisés pour la confection d'enrobés colorés. La dernière technique, utilisée depuis cinq à six ans, emploie des bitumes synthétiques pour les routes plus achalandées (CERTU, 1997 et St-Jacques et Brosseau, 2002).

Selon Whiteoak (1991), il existe une autre méthode pour colorer les revêtements routiers. Il s'agit de saupoudrer des particules fines de granulats colorés lors de la compaction. Celles-ci sont saupoudrées sur l'enrobé encore chaud et à l'aide du rouleau compresseur sont maintenues en place dans le liant. L'usage de ce type de revêtement est limité aux endroits à trafic léger, les voies piétonnes et les entrées privées.

1.1 Constituants : granulats, liants et pigments

Les enrobés noirs conventionnels contiennent trois constituants: les granulats, le filler et le bitume. Lorsqu'il est question d'enrobés colorés ou clairs, les constituants

demeurent les mêmes mais des pigments peuvent être ajoutés au mélange. À ce moment, ils peuvent remplacer le filler ou être calculés à part. Les prochains paragraphes font la lumière sur les constituants des EBC.

1.1.1 Granulats

Les auteurs Domecq et Sicard (1995) précisent que la couleur dominante d'un EBC devient celle des granulats qui le composent après un ou deux ans de mise en service. Lassalle et autres (1981) quant à eux notent que la couleur se révèle à son maximum qu'après le passage d'un certain nombre de trafic qui décape le film de bitume superficiel. Lorsque des liants synthétiques sont utilisés, la question de l'usure ne se pose pas puisque les granulats sont tout de suite visibles. Il est important dans un cas comme dans l'autre de choisir des granulats qui seront le plus près possible de la teinte finale souhaitée. De plus, le choix des granulats doit se faire en tenant compte du niveau de trafic (Domecq et Sicard, 1995). Ainsi, les granulats contenus dans un enrobé bitumineux soumis à un trafic élevé ou à du trafic lourd doivent posséder d'excellentes propriétés mécaniques par rapport à un enrobé bitumineux destiné à du trafic léger.

Les granulats entrant dans la composition des revêtements colorés sont de deux types : les granulats naturels traités ou non traités. Lorsque la couleur ou les caractéristiques de la roche recherchées ne se retrouvent pas dans la nature, il est possible d'avoir recours à des traitements mécaniques et chimiques qui permettent d'atteindre le plus possible les propriétés souhaitées. De cette façon, certains pays préfèrent utiliser des granulats blancs insensibles aux pneus en broyant et mélangeant des galets de mer siliceux ou d'autres roches. Ce mélange permet d'allier les propriétés d'esthétisme et de durabilité. Le désavantage de cette technique réside dans son coût élevé. Les noms de commerce utilisés pour désigner les types de granulats traités sont différents selon les pays. C'est le Danemark, la France et l'Italie qui exploitent des marques de granulats traités (Lassalle et autres, 1980). Les galets de mer en silex sont aussi utilisés dans les revêtements colorés après avoir été calcinés à des températures atteignant 1600°C (Appia, 2000). De plus, il est possible

de recourir à des composés chimiques pour colorer les granulats en laboratoire. La figure 1.1 montre des granulats qui ont subi un traitement de couleur.

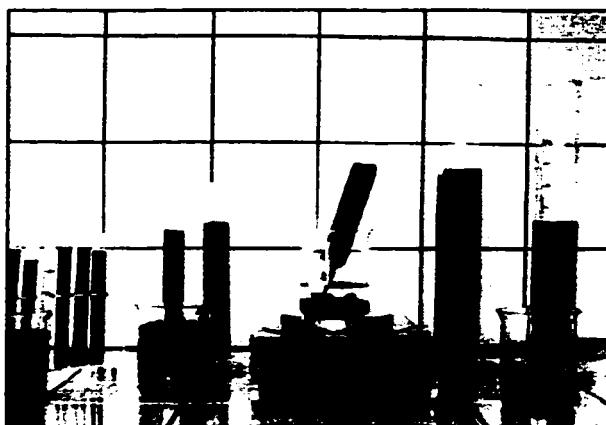


Figure 1.1 Granulats colorés en laboratoire

Source : Chromoroc, 2002

Certains granulats ont naturellement des couleurs particulières. Le porphyre, plus communément appelé quartzite, peut être de couleur rouge ou rose. De même, l'ophite verte, ou serpentine, est une roche de couleur verte. Les roches calcaires sont souvent de couleur jaune ou grise et celles qui pourraient convenir pour un enrobé destiné aux couches de surface sont parfois blanches. Par contre, la liaison des roches calcaires avec le bitume est si grande que le décapage par le trafic se produit mal. Le décapage du bitume par rapport aux granulats laisse apparaître la couleur naturelle de ceux-ci. C'est cette couleur qui est considérée comme étant la couleur finale d'un enrobé bitumineux et est visible après environ trois années d'usure par le trafic. Aussi, la gomme des pneus les teinte souvent de façon indélébile (Lassalle et autres, 1980). Selon Lassalle et autres (1981), il n'est pas obligatoire d'avoir des granulats particulièrement clairs pour la fraction inférieure à 2 mm.

Au Québec, il y a un véritable potentiel naturel de granulats colorés. Les informations concernant les sources de granulats naturels québécoises se retrouvent au deuxième chapitre.

1.1.2 Liants

Lorsqu'il est question d'enrobés colorés, il est important de s'attarder à la question du type de liant utilisé. Deux classes de liants sont utilisées pour les enrobés colorés : les liants bitumineux et les liants à base de résines. Dans la famille des liants bitumineux se retrouvent les bitumes standards, les bitumes pigmentables et les bitumes synthétiques. La famille des liants à base de résines comprend quatre classes : les époxydes, les polyuréthanes, les polyméthacryliques et les acryliques et vinyliques (Domecq et Sicard, 1995 et CERTU, 1997).

1.1.2.1 Bitumes standards

Puisqu'il sera question plus loin de la polymérisation des résines et des polymères, quelques rappels s'imposent. Lorsque l'on traite un bitume standard à l'heptane normal, il est possible d'obtenir deux fractions distinctes : les maltènes et les asphaltènes (Bonniot, 1993).

Les maltènes, composées d'huiles et de résines, forment la partie soluble à l'heptane d'un bitume et possèdent une masse moléculaire variant entre 300 et 1250 g/mol. Les asphaltènes quant à eux, forment la partie insoluble et possèdent une masse moléculaire supérieure à 900 g/mol (Bonniot, 1993). Les maltènes sont formées de saturés, d'aromatiques et de résines (MTQ, 2001).

Les asphaltènes sont des composés solides friables de couleur noire et se retrouvent dans le bitume en pourcentage variant entre 10% et 30%. Les asphaltènes sont des composés aromatiques solides et friables de couleur brun-noir (MTQ, 2001). L'asphaltène est un composé condensé de poids moléculaire élevé majoritairement à l'origine de la couleur noire du bitume (AIPCR, 1999). Puisque les asphaltènes sont portés à s'associer, ils sont considérés comme étant le composé le plus responsable du comportement rhéologique des bitumes. Un bitume est donc composé d'une suspension de particules agglomérées d'asphaltènes baignant dans un milieu huileux (Bonniot, 1993).

Il est possible d'utiliser le bitume noir standard pour la préparation d'EBC. Par contre, avec ce bitume, la seule couleur réalisable est le rouge et ce, avec l'ajout de grandes quantités de pigments d'oxyde de fer ou de titane. L'obtention d'autres couleurs se révèle impossible puisque le pouvoir colorant des autres types de pigments, tels que les oxydes de chrome et de cobalt, n'est pas assez élevé pour permettre la coloration d'un bitume noir (CERTU, 1997).

1.1.2.2 Bitumes pigmentables

Les bitumes pigmentables utilisés pour les enrobés colorés possèdent moins d'asphaltènes que les bitumes purs soit entre 4 et 5% pour les bitumes pigmentables par rapport à 15% dans un bitume standard (CERTU, 1997). Ils proviennent d'un brut sélectionné déjà pauvre en asphaltènes et d'un procédé de raffinage adapté (AIPCR, 1999). Il est possible d'ajouter des polymères permettant aux bitumes pigmentables d'obtenir les mêmes caractéristiques mécaniques que les bitumes standards. Le rouge obtenu avec l'utilisation de bitume pigmentable est d'une nuance plus claire qu'avec le bitume standard. De plus, d'autres couleurs peuvent être obtenues comme le vert et le bleu (Domecq et Sicard, 1995). Par contre, ces bitumes par leur constitution chimique particulière demeurent plus susceptibles aux variations thermiques que les bitumes standards (AIPCR, 1999). Il est donc important de limiter l'usage de l'enrobé formulé avec ce liant aux endroits à faible trafic lourd afin d'éviter toute déformation par fluage ou orniérage (Domecq, Sicard, 1995 et CERTU, 1997). Le tableau I montre les caractéristiques de deux types de bitumes pigmentables. Les comparaisons entre les bitumes ont été effectués à l'aide de trois paramètres : la pénétrabilité, le point de ramollissement et la température de Fraass. La pénétrabilité permet de déterminer quelle résistance offre le liant à l'enfoncement d'une aiguille selon une pression et un temps donné. Le point de ramollissement mesuré à l'aide de la technique de bille et anneau permet de prédire la résistance de l'enrobé bitumineux à la déformation. La température de Fraass permet de déterminer la fragilité d'un enrobé bitumineux à basse température.

Tableau I**Caractéristiques des bitumes pigmentables**

Caractéristiques	Liant synthétique LSF-2	Liant BP Color (grade 100)
Pénétrabilité (0,1 mm)	112	99
Point de ramollissement (°C)	58,5	59
Température Fraass (°C)	n/d	- 15

Sources : Potti, J.J. (1997) et Lesage et Groz (1992)

Des valeurs élevées au point de ramollissement bille et anneau ainsi qu'au point de fragilité Fraass permettent de dire que les bitumes pigmentables ont une faible susceptibilité à la température bien qu'ils le soient plus que des bitumes standards (Lesage et Groz, 1992). Selon Shell Bitumen (2001), la température d'équi-viscosité est 25% plus basse que pour un bitume standard. Ce qui permet des températures de malaxage voisinant les 135-140°C.

1.1.2.3 Bitumes synthétiques

Ce type de liant ne contient pas d'asphaltènes (Herment et Reymonet, 1989). Les bitumes reconstitués sans asphaltènes ou bitumes synthétiques sont obtenus par le mélange de coupes pétrolières et pétrochimiques comme les résines, les huiles et les agents qui permettent une stabilité aux attaques des ultraviolets et sont additionnés de polymères. Ils possèdent les mêmes grades de pénétration que les bitumes standards de classe 20/30 à 70/100. Lorsque les auteurs de l'AIPCR (1999) mentionnent le liant synthétique, il s'agit plutôt de bitume synthétique, selon la tendance et les définitions des articles de Domecq et Sicard (1995) et de Turmel et autres (1995). Puisqu'ils ne contiennent pas d'asphaltènes, l'élément noir du bitume, ils sont transparents en film mince. Cette propriété de transparence permet de réduire l'utilisation de pigments par rapport aux bitumes pigmentables. Leur composition chimique leur permet d'obtenir les mêmes propriétés que les bitumes standards. Par contre, ils ont une plus grande

susceptibilité thermique et une tenue à l'eau moins élevée que des bitumes standards de même classe. Toutefois, ils peuvent être employés pour des endroits fortement circulés (CERTU, 1997). Bien que le coût des bitumes synthétiques soient beaucoup plus élevés que celui des bitumes standards, ils demeurent compétitifs par rapport à d'autres matériaux comme les pavés ou les dalles (voir la section 1.5) (Domecq et Sicard, 1995). Le tableau II montre les caractéristiques de quelques bitumes synthétiques de la compagnie Colas.

1.1.2.4 Liants à base de résines

Cette famille de liants utilisée pour les EBC ne sont pas obtenus à partir de coupes pétrolières et tout comme les bitumes de synthèse, ils ne contiennent pas d'asphaltènes. Il s'agit de liants fabriqués à base de résines et de procédés chimiques de polymérisation. Il y a cinq types de résines utilisées pour les revêtements de sol. Il s'agit des résines époxydiques, polyuréthannes, poly(méth)acryliques PMMA, polyesters, acryliques et vinyliques (Turmel et autres, 1995).

Tableau II

Caractéristiques des bitumes synthétiques

Caractéristiques	Colclair®	Colclair® P1	Colclair® P2
Pénétrabilité à 25°C (0,1 mm)	57	53	60
Bille et anneau (°C)	46	54,5	59
Point de Fraass (°C)	-10	-15	-15
Indice de pénétrabilité	-1,9	+0,1	+1,2

Source : Herment et Reymonet, 1989

Résines époxydiques - Ces résines sont obtenues à l'aide de deux composants : des poly époxydes jumelés à des durcisseurs polyaminés. Le schéma de la figure 1.2 montre les réactions. Le liant ainsi obtenu possède de bonnes résistances mécaniques

(traction et flexion), une susceptibilité thermique négligeable et est résistant à l'action des produits chimiques comme les solvants, les acides et les hydrocarbures (CERTU, 1997). De plus, Turmel et autres (1995) notent une forte adhérence sur différents supports. Les résines époxydiques sont formulées sans solvant, en émulsion ou en phase solide selon leur utilisation.

Les effets à long terme ne sont pas à négliger non plus. En effet, la couleur a tendance à s'éclaircir sous l'action des ultraviolets. Plusieurs couleurs peuvent par contre être obtenues avec ce type de liant (CERTU, 1997).

Résines polyuréthanes - En ce qui concerne les liants synthétiques à base de polyuréthane, ils sont obtenus par polymérisation. Il s'agit ici de l'addition de polyisocyanates sur des polyols ou des polyamines. Le réseau peut-être formé aussi à partir de la réaction des polyisocyanates avec l'humidité de l'air. Le polyisocyanate est un polymère en soi et provient de la réaction entre un polyol et un isocyanate monomère ou d'une combinaison de plusieurs isocyanates monomères. La figure 1.3 montre les réactions possibles pour l'obtention de polymérisation (Turmel et autres, 1995).

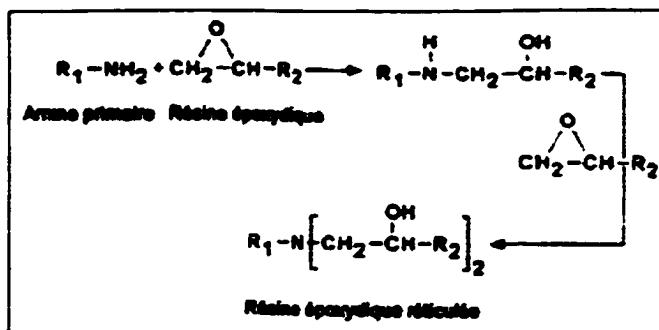


Figure 1.2 Réaction chimique des résines époxydiques

Source : Turmel et autres, 1995

Il est possible d'obtenir une polymérisation à l'aide de deux composantes comme pour les époxydes, mais il est aussi envisageable de l'obtenir à partir d'un mono-composant.

Tout comme pour les époxydes, il est possible d'obtenir un choix de couleur important (Domecq et Sicard, 1995). Des variantes peuvent être obtenues en utilisant des isocyanates aliphatiques permettant une faible susceptibilité thermique et qui ne jauniraient pas avec le temps. Les principaux avantages liés à l'utilisation de ces résines dans les liants sont l'amélioration de l'adhérence sur support sec, les bonnes caractéristiques chimiques et surtout mécaniques qu'elles offrent, la possibilité de faire varier le module d'élasticité et de modifier le temps de réaction. De plus, comme pour les résines époxydiques, les résines polyuréthanes permettent l'imperméabilisation et l'étanchéité des revêtements (Turmel et autres, 1995).

Résines poly(méth)acryliques - Les liants utilisant des résines de ce type sont obtenus par polymérisation. Il s'agit d'un mélange de monomères et d'oligomères acryliques ou méthacryliques durcit en place par polymérisation radicalaire. Ce sont des peroxydes organiques, des composés azoïques ou photoamorceurs qui initient la polymérisation. La figure 1.4 montre les réactions possibles (Turmel et autres, 1995). Ce type de liant se polymérise rapidement et offre une résistance mécanique élevée. Il offre également une forte adhérence au support (Domecq et Sicard, 1995). De plus, il présente une grande rigidité et un risque élevé d'inflammabilité à l'application ainsi qu'une odeur forte et persistante en plus d'offrir une résistance chimique moyenne (Turmel et autres, 1995).

Résines polyesters - Ces résines pouvant être utilisées dans les liants synthétiques consistent, encore une fois, en de la copolymérisation radicalaire. Il s'agit de polycondensat polyester insaturé (polyester, vinylester,...) et de styrène. L'initiateur est le plus souvent un peroxyde organique. C'est le type de polycondensat insaturé et le taux de styrène qui confèrent au matériau ses performances (Turmel et autres, 1995). Il est à noter que le taux d'humidité doit être restreint en présence de polycondensat (surtout en ce qui concerne les polyamides) puisque celui-ci吸orbe l'humidité et subit une hydrolyse lors de la mise en œuvre. Le fait de limiter le taux d'humidité du polymère permettra d'éviter la dégradation de celui-ci (Deterre et Froyer, 1997).

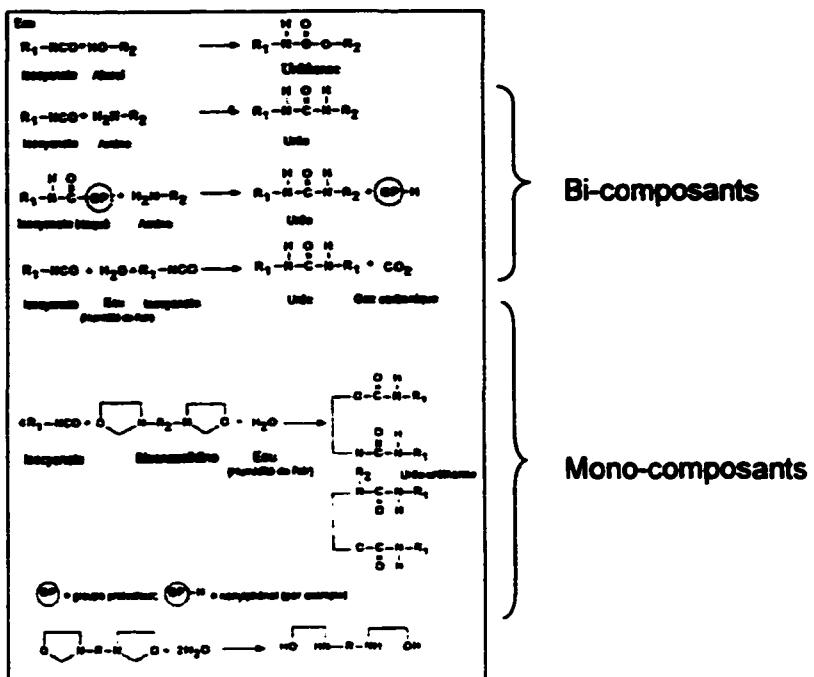


Figure 1.3 Réaction chimique des résines polyuréthanes
Source : Turmel et autres, 1995

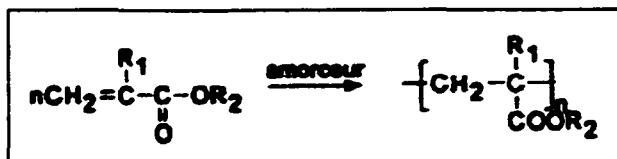


Figure 1.4 Schéma des réactions avec résines poly(méth)acryliques
Source : Turmel et autres, 1995

C'est généralement un composé de peroxyde organique qui initie la polymérisation. Le produit offre une très bonne résistance aux agressions chimiques (en particulier aux acides), de bonnes résistances mécaniques et permet une mise en service rapide. Toutefois, ces résines présentent tout comme pour les polyméthacryliques, une forte rigidité, une odeur persistante et une inflammabilité élevée à l'application. Habituellement, ces résines sont utilisées pour les revêtements de sol que lorsque des performances d'anti-corrosion sont recherchées (Turmel et autres 1995).

Résines acryliques et vinyliques – Ces deux résines retrouvées dans certains liants de synthèse sont regroupées dans la même catégorie. Ces résines se retrouvent sous forme d'émulsion de co-polymères prêtes à l'emploi. Leur prix est plus faible que celui des liants des autres catégories. Le séchage a lieu par évaporation des produits volatils et par la formation d'un film avec la coalescence des globules du polymère (Turmel et autres, 1995). Par contre, la qualité, la durée de vie et la stabilité chimique sont plus faibles. C'est pourquoi ces résines sont plutôt réservées aux peintures et revêtements anti-poussière ou dans le cas de revêtements supportant un faible trafic (Domecq et Sicard, 1995). D'autres utilisations peuvent aussi être prévues comme les traverses piétonnes, les courts de tennis ou certains aménagements urbains (Turmel et autres, 1995).

C'est l'opacité d'un liant qui permet de déterminer s'il sera facile de le colorer ou non. Un essai de colorimétrie comme la mesure de l'absorptivité spécifique par un matériau d'une solution de concentration donnée de liant peut être effectué afin de déterminer cette caractéristique (AIPCR, 1999). Le tableau III permet d'apprécier les différences d'absorptivité spécifique selon le liant employé. Il est à noter que les liants sont de même grade.

Tableau III

Comparaison de l'absorptivité spécifique de différents liants

	Bitume classique	Bitume pigmentable	Liant de synthèse
Teneur en asphaltène (%)	10 – 15	3 - 5	0
Absorptivité spécifique à 600 nm ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{l}$)	0,6 - 0,8	0,3 - 0,4	< 0,05

Source : AIPCR, 1999

Les chiffres du tableau III montrent que plus la teneur en asphaltènes est élevée plus l'absorptivité spécifique est grande, ce qui pourrait avoir un effet défavorable sur le phénomène d'omiérage. Le sujet est élaboré plus en profondeur à la section 1.4.1.

Agents chimiques - Il est à noter que les agents chimiques peuvent être aussi simples que de l'eau. En effet, l'humidité que les granulés de polyamides contiennent peuvent provoquer des changements dans les chaînes moléculaires et ainsi faire diminuer les propriétés mécaniques du liant. De la même façon un acide fort oxydant agira sur un polymère en modifiant sa nature chimique. L'eau, les acides, les bases, les hydrocarbures, les alcools, les esters, les cétones, les essences et les graisses comptent parmi les principaux agresseurs chimiques des polymères (Deterre et Froyer, 1997). Le tableau IV montre une comparaison des propriétés de différents types de liants courants. Les résultats démontrent que bien que se soit des liants d'origine différente, ils ont des caractéristiques semblables.

Tableau IV

Comparaison des propriétés de différents types de liants

Caractéristiques	Bitume standard	Liant avec résines époxy	Peinture avec résines acryliques
Pénétration à 25°C	85-100	94	80
Bille et anneau (°C)	40-50	45,5	46,5
Densité à 25°C	n/d	1,042	1,052

Source : Kang et autres, 1985

1.1.2.5 Comportement des bitumes synthétiques

Le labo 240 en France (Godebert, 1992) a mené une étude permettant de comparer trois liants clairs pour usage sur trottoir. Les propriétés testées sont le retrait dimensionnel, l'indentation à 40°C, la susceptibilité thermique et le comportement face

à des sollicitations mécaniques. Un bitume clair, le Shell Cados, a été utilisé comme liant témoin durant l'étude puisqu'il n'est plus utilisé de nos jours.

En ce qui concerne le retrait dimensionnel, le liant Shell Mexphalte C possède un retrait supérieur de 30% à celui de Total LSC et augmente du double par rapport au liant témoin. L'ajout de pigments n'influence pas le comportement au retrait dimensionnel des liants. En ce qui concerne l'indentation à 40°C, les liants doivent posséder un enfoncement situé entre 0,20 mm et 0,80 mm et avant l'ajout de pigments les liants rencontrent tous cette exigence. L'ajout de pigment augmente l'enfoncement uniquement du liant Total LSC. La susceptibilité thermique du liant Total LSC augmente d'environ 40% par rapport aux deux autres types de liants. Lorsque des pigments blancs sont ajoutés, celle-ci passe à 50%. C'est le liant Total LSC qui obtient les meilleurs résultats aux essais de traction-compression. De plus, la pigmentation n'influence pas le comportement des liants aux sollicitations mécaniques.

Selon Dollin et Genardini (1992), la faible susceptibilité thermique du Shell Mexphalte C réside dans l'ajout d'élastomères.

1.1.3 Pigments

Les pigments peuvent être soit d'origine organique ou minérale. Il est préférable d'utiliser des pigments minéraux dans les mélanges bitumineux puisqu'ils sont plus stables à la température, à l'action des éléments chimiques, à la lumière et aux intempéries (Bayer, 1994). L'utilisation de pigments ne change pas la couleur des matériaux. Les pigments sont plutôt adsorbés par les pores des granulats en étant dissout dans le liant (Kang et coll, 1985). De même, Lassalle et autres (1981) mentionnent que les pigments colorent le liant pour ensuite donner une couleur au mélange. Ce sont des pigments minéraux naturels qui ont été à l'origine de la coloration en rouge des revêtements routiers. Ceux qui sont utilisés présentement sont synthétiques (Zündel, 1999).

La gamme des pigments minéraux comprend tous les oxydes tels l'oxyde de fer rouge ou brun, l'oxyde de chrome jaune ou vert, l'oxyde de titane vert et les pigments à phase mixte comme le bleu de cobalt. Il est aussi possible d'utiliser des pigments bleu de Prusse et bleu d'outremer (Kang et autres, 1985). Les pigments d'oxyde de chrome sont plus chers et moins stables que les autres pigments minéraux et l'oxyde de titane est utilisé plutôt dans les cas où l'esthétique est importante. L'oxyde de titane est plus stable que l'oxyde de chrome tout en demeurant assez cher (Lassalle et autres, 1980). Les pigments organiques quant à eux, ont une faible résistance aux intempéries et ont un prix élevé par rapport aux pigments minéraux. C'est pourquoi leur utilisation n'est pas indiquée pour les enrobés bitumineux (Bayer, 1994). La figure 1.5 montre les sites de production des pigments minéraux Bayer à travers le monde. Il est à noter que des pigments de chromate de plomb sont aussi utilisés pour les pigments de couleur jaune. Les pigments les plus courants sont le beige, le rouge, le blanc, le vert et le bleu. Ils sont utilisés en enrobés à chaud, en émulsions anioniques ou cationiques, en applications en enduits ou pour les enrobés coulés à froid. La nature du pigment a une influence directe sur la rupture et la cohésion initiale compte tenu de l'activité des fractions minérales fines dans les enrobés coulés à froid. Puisque les pigments possèdent une grande surface spécifique de l'ordre de 10, la teneur en liant doit être augmentée par rapport à celle du coulis sans pigment (Potti, 1997).



Figure 1.5 Sites de production des pigments Bayer

Source : Bayer, 2001

La couleur la plus répandue pour la coloration des enrobés colorés est le rouge et est réalisée à partir de pigments d'oxyde de fer. Ces pigments ont un pouvoir colorant élevé et peuvent colorer un bitume standard avec un résultat satisfaisant. Le Bayferrox 130 semble le produit le mieux adapté pour la coloration de bitumes ordinaires. De plus, la compagnie SIT Kronos a fourni les pigments de dioxyde de titane pour les planches d'essais du projet de Bouches-du-Rhône en France (Mercadier et autres, 1995).

Les couleurs des pigments sont altérées avec l'action du soleil et des intempéries. C'est pourquoi il existe un essai américain « Accelerated Weathering Test » qui permet de quantifier les dommages occasionnés par le soleil, les intempéries et la saleté sur les revêtements colorés. Le changement de couleur noté ΔE est mesuré tous les 120 heures sur un échantillon de 70 (ΔL) par 120 (Δa) par 1 (Δb) mm. Les granulats sont remplacés par du carbonate de calcium, ce qui permet d'accélérer les dommages causés par les intempéries. Les valeurs initiales de L, a et b sont mesurées avant l'essai et les différentiels sont mesurés à chaque tranche de 120 heures. L'équation 1.1 permet de quantifier le changement de couleur observé après l'exposition au soleil et aux intempéries dans le temps. De plus, il permet de déterminer la perte de matériel dû à l'usure et aux intempéries.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (1.1)$$

où :

- a est la largeur de l'échantillon
- b est la profondeur de l'échantillon
- L est la longueur de l'échantillon
- Δa est la différence entre la largeur de l'échantillon avant et après l'essai
- Δb est la différence entre la profondeur de l'échantillon avant et après l'essai
- ΔL est la différence entre la longueur de l'échantillon avant et après l'essai
- ΔE est le changement de couleur calculé

Il est souhaitable de ne pas dépasser un changement de couleur de plus de 30 unités selon le National Bureau of Standards of Korea (Kang et autres, 1985). La figure 1.6 montre les résultats obtenus avec différents pigments de couleur.

Les résultats démontrent que tous les pigments soumis à l'analyse sont faiblement altérables par les intempéries et la saleté. En effet, une variation d'environ deux unités uniquement pour 600 heures est observable. Il semble que l'oxyde de chrome possède le comportement le plus instable puisqu'il obtient en moyenne les changements les plus grands. Ce qui vient en accord avec l'affirmation de Lassalle et autres (1980) qui veut que les pigments d'oxydes de chromes soient moins stables que les autres types de pigments minéraux. Par contre, les fiches techniques produites par Bayer mentionnent que les pigments d'oxyde de chrome sont très stables, qu'ils sont insolubles à l'eau et qu'ils sont inertes chimiquement.

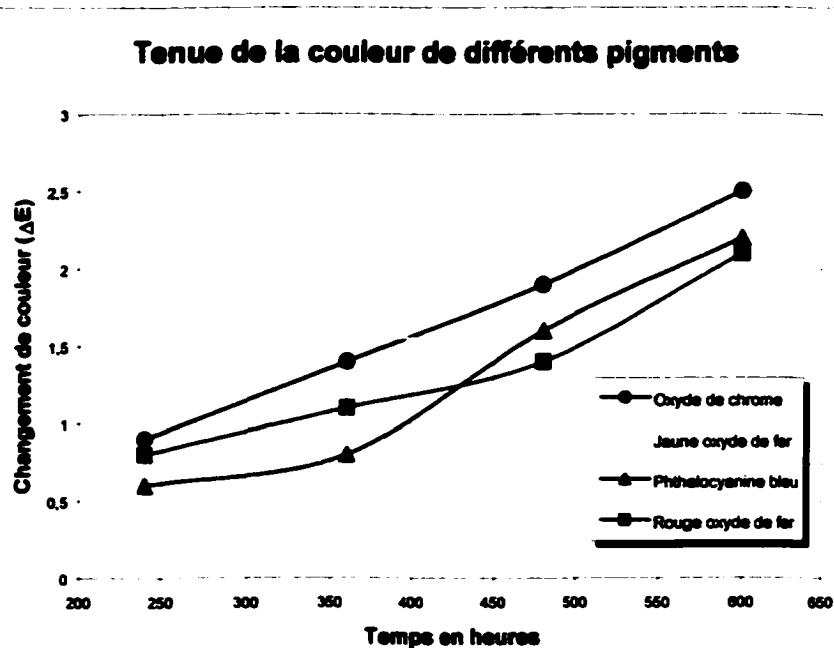


Figure 1.6 Tenue de la couleur de différents pigments

Source : adapté de Kang et autres, 1985

Il est possible de déterminer le vieillissement accéléré en laboratoire à l'aide de dispositifs permettant un vieillissement artificiel. Il s'agit du Weather-Ometer Atlas, du Weather-Ometer Atlas XW avec lampe à arc, du Weather-Ometer Atlas 600 XW avec lampe au xénon, du Xenotest Heraeus 150 S, du Xenotest Heraeus 450 S, du Xenotest Heraeus 1200, du Klimatron MPC, du WEISS UV 200 RB/10 DU et finalement du Q-U-V (Bayer, 1992).

Chez Bayer (1992), les pigments sont soumis au vieillissement naturel accéléré sous forme de peinture. Pour se faire, une planche expérimentale comportant 130 échantillons est orientée face au soleil et aux intempéries pour permettre d'obtenir un vieillissement rapide dû aux conditions climatiques. La station expérimentale est située à Krefeld-Uerdingen en Allemagne. La figure 1.7 montre la planche expérimentale en Allemagne.

D'autres fournisseurs de pigments colorent les routes : en Australie on retrouve Ability Building Chemicals et au Royaume Uni, Eco Color Ltd.



Figure 1.7 Planche expérimentale permettant de faire vieillir des échantillons
Source : Bayer, 1992

1.1.3.1 Taux de pigmentation

Pour l'emploi de pigments avec des bitumes standards, Bayer recommande d'utiliser de 3% à 4% de pigments d'oxyde de fer rouge. Il est noté que l'augmentation du pourcentage en pigments n'influence pas le degré de saturation de la couleur. Lorsque l'on utilise des pigments autres que le rouge pour colorer les bitumes standards, 4% n'est pas suffisant. L'utilisation, par ailleurs, de bitume clair permet de réduire la teneur en pigments à 1% ou 2%. Il est à noter que les pourcentages requis sont mesurés par rapport au mélange (Bayer, 1994).

Selon l'expérience de Shell, 1% de pigments rouges serait suffisant pour obtenir une couleur appréciable. De plus, en combinant le rouge avec 0,5% de pigments blancs (oxyde de titane), il serait possible d'obtenir une couleur plus éclatante (Le Coroller et Herment, 1989). Quelques années plus tard, Bayer (1994) y va de son expérience en affirmant aussi que les pigments blancs d'oxyde de titane permettent d'éclaircir les mélanges bitumineux. Par contre, l'oxyde de titane ne peut être utilisé en combinaison avec d'autres pigments colorés afin d'obtenir une couleur plus saturée. Il semblerait que l'utilisation du pigment blanc diminue le pouvoir éclaircissant de l'autre pigment de couleur.

Lorsqu'il faut préparer un EBC contenant de l'oxyde de fer à des températures plus élevées que 180°C, il est judicieux d'ajouter un pigment de ferrite de zinc permettant d'améliorer la stabilité à la chaleur au mélange (Bayer, 1994). Le tableau V montre le taux de pigmentation requis selon le type de liant et le type de pigment employés pour un EBC.

Il est à noter que Busschots (1999) mentionne que le taux de pigmentation requis lors de l'utilisation d'un bitume standard est de 6 à 8%. Ce qui est plus élevé que la plupart des recommandations des auteurs.

1.1.3.2 Dosage en pigments

Dans les enrobés coulés à froid, les pigments sont incorporés au mélange sous forme de filler ou de liquide. Potti (1997) mentionne qu'il est préférable d'utiliser les pigments liquides puisque le dosage s'effectue plus facilement. Par contre, une mise en garde s'applique : certains pigments sous forme liquide changent de couleur en fonction du pH, ce qui limite l'utilisation que l'on peut en faire.

Les pigments sous forme de filler se retrouvent sous deux formes distinctes, soit en sacs à insérer tels quels dans le mélange ou incorporé en tant que filler (Lassalle et autres, 1980). Une troisième méthode existe, les pigments liquides. En 1992, la compagnie Cochery, Bourdin, Chaussé a mis au point un composé pigmentaire sous forme de pâte qui rend plus facile l'incorporation des pigments dans les mélanges d'enrobés. La pâte est constituée de pigments baignant dans une huile compatible avec le liant de l'enrobé. De plus, la pâte est fabriquée dans un souci de qualité et d'homogénéité permettant d'obtenir exactement la même couleur de pigment, par exemple, un an après la fabrication d'un mélange (Deneriaz et Marchand, 1992).

La granulométrie des pigments varie selon le type employé (poudre ou granulé). Chez Bayer (1994), les pigments d'oxyde de fer ont une granulométrie variant entre 0,09 et 0,7 µm et les pigments d'oxyde de chrome possèdent une granulométrie d'environ 0,30 µm.

Une attention particulière au dosage des fines est requise lors de l'utilisation de pigments dans les enrobés colorés. En effet, puisque les pigments viennent s'ajouter au pourcentage de particules fines, il est habituellement approprié de procéder à un ajustement de la granulométrie (Bayer, 1994). Le dosage en pigment est de 30 à 40 % en poids par rapport au poids du liant et de 2% à 3% par rapport au poids des granulats secs. Selon Whiteoak (1991) toutefois, la quantité nécessaire de pigments afin de teinter le bitume noir est de l'ordre de 5% à 6% par rapport au mélange, ce qui augmente de façon significative le coût de l'enrobé (voir section 1.5).

Tableau V

Les types de pigments et taux de pigmentation recommandés pour colorer les enrobés à chaud selon le type de liant

Type de bitume	Couleur	Taux de pigmentation (%)
Bitume standard	Rouge	3 à 4
	Jaune	-
	Brun	-
	Vert	-
	Bleu	-
Liant synthétique	Rouge	1 à 2
	Jaune	1 à 2
	Brun	1 à 2
	Vert	1 à 2
	Bleu	1 à 2
	Blanc	1 à 2
	Gris	1 à 2

Source : adapté de Bayer, 1994

Il y a deux systèmes permettant de doser les pigments afin de les incorporer au mélange. Il s'agit des unités de dosage continue et discontinue telles que présentées à la figure 1.8.

Dans les installations discontinues, le pigment est habituellement ajouté à la main. Les pigments Bayferrox sont vendus en sacs de 20 ou 25 kg. Puisque les sacs sont en polyéthylène, ils fondent à la chaleur et l'introduction dans le mélange n'occasionne aucune poussière. Par contre, il est recommandé d'introduire les pigments avant le bitume pour éviter toute formation de grumeaux dans le mélange. De plus, un malaxage des pigments avec les granulats de 10 à 15 secondes avant l'introduction du bitume permet d'homogénéiser le pigment dans le mélange (Bayer, 1994).

Pour ce qui est des installations continues, il est difficile d'incorporer manuellement les pigments. En effet, l'ouverture de chargement est trop étroite pour le passage des sacs. Il faut donc prévoir une unité de dosage indépendante pour l'incorporation du pigment. Les pigments granulés sont alors une solution intéressante. Ils sont vendus en contenants souples et peuvent alors être dosés facilement (Bayer, 1994).

1.2 Formulation des enrobés colorés

Selon Lassalle et autres (1980), il n'est pas nécessaire d'utiliser des granulats clairs pour les granulats de diamètre inférieur à 2 mm. Ce sont plutôt les granulats grossiers (GG) qui donnent la couleur à l'enrobé. Il est possible d'obtenir des teintes intéressantes par divers moyens : par la teinte naturelle des granulats, en colorant dans la masse à l'aide de pigments et de bitume pigmentable, en appliquant des enduits colorés réalisés à l'aide de liants de synthèse et pour terminer, en incorporant à la masse de bitume chaude des gravillons colorés. Le tableau VI montre la formulation type d'un enrobé de couleur bleu, le tableau VII montre la composition d'un enrobé beige et le tableau VIII montre la composition d'un enrobé misant sur la couleur naturelle des granulats.

La composition totale en poids du mélange dans le cas exposé au tableau VI dépasse 100%. Ceci s'explique par le fait que le bitume ainsi que les pigments ont été calculés par rapport à la masse totale de granulats. La colonne des compositions ajustées permet une représentation de la composition du mélange mais cette fois en incluant dans le calcul la masse totale de granulats. Tous les composants étant inclus dans le calcul, le total passe donc à 100%.

Lors de l'utilisation d'un bitume autre que le standard, il faut s'assurer de respecter les températures d'enrobage et de compactage qui sont différentes de celles rencontrées pour une même valeur de pénétration. Généralement, l'ajout de résines et de polymères entraîne l'augmentation des températures requises pour une viscosité optimale lors du malaxage et du compactage. De plus, il ne faut pas chauffer les liants

synthétiques à plus de 180°C de façon à limiter leur oxydation et donc préserver la couleur recherchée (AIPCR, 1999).

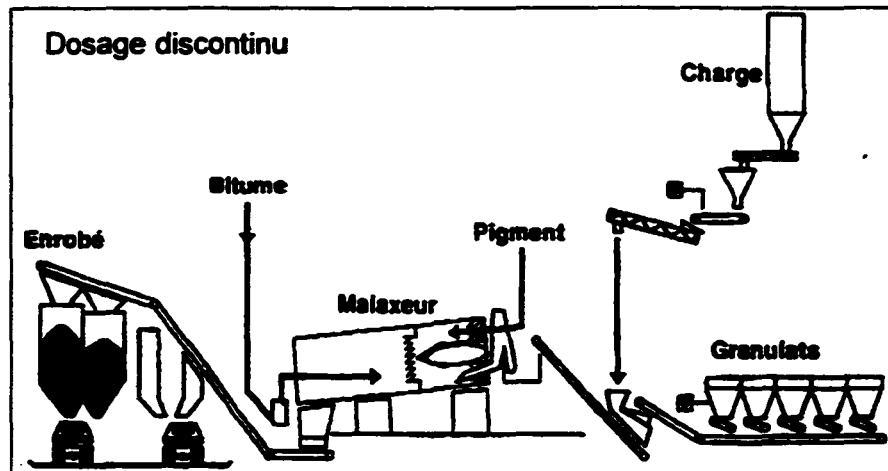
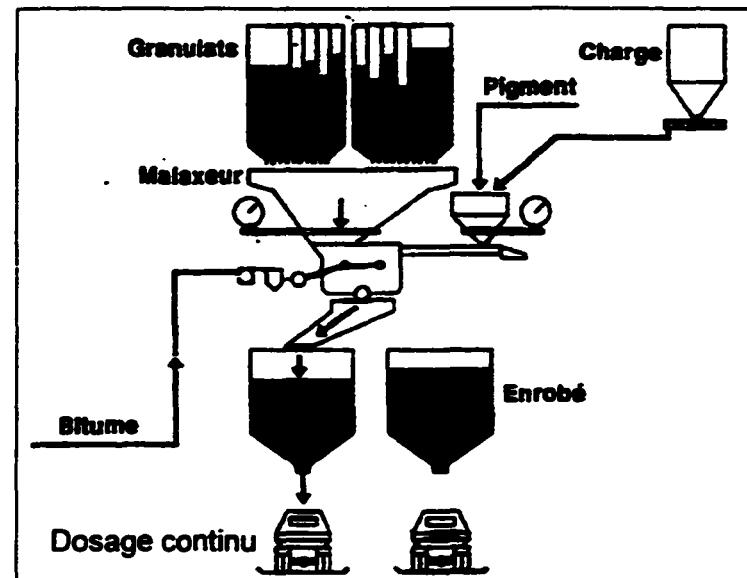


Figure 1.8 Unités de dosage en pigment continue et discontinue
Source : Bayer, 1994

Les critères à prendre en considération lors de la formulation d'un EBC sont le trafic, la région et l'épaisseur du revêtement (Grimaux et autres, 1989).

Tableau VI

Composition d'un enrobé bitumineux bleu

	Granulométrie (mm)	Composition en poids (%)	Composition ajustée (%)
Granulat dioritique	0-2	35	32,96
Granulat alluvionnaire	0-2	10	9,42
Granulat dioritique	6-10	55	51,79
Bitume de synthèse	-	0,8	0,75
Pigment bleu	-	5,4	5,08
	Total	106,2	100,0

Source : adapté de Thouret et autres, 1994

Tableau VII

Composition d'un enrobé bitumineux beige

	Granulométrie (mm)	Composition (%)
Granulats	2-6	27,4
Granulats	0,5	37,5
Bitume Colclair 20/30	-	7,6
Pigment blanc	-	1,5
Filler	-	26,0
	Total	100,0

Source : adapté de Le Coroller et Herment, 1989

Tableau VIII

Composition d'un enrobé sans pigment

	Granulométrie (mm)	Composition (%)	Composition ajustée (%)
Gravillons de calcaire beige	2-6	40	37,5
Sable calcaire beige	0-2	60	56,2
Bitume incolor BP de grade 70	-	6,7	6,3
	Total	106,7	100,0

Source : Pélon et Chiavassa, 1994.

1.3 Utilisation des enrobés colorés

Il est possible d'avoir recours aux enrobés colorés pour différents usages tels que les pistes cyclables, les couloirs de circulation, les aires de stationnement, les bandes d'arrêt d'urgence, les trottoirs, les îlots directionnels, les cours d'écoles, les allées de parcs et de jardins ainsi que pour les aires de jeux. Les figures 1.9 à 1.14 montrent des applications de revêtements colorés en milieu urbain. De plus, selon Robin (1996), il est préférable d'utiliser des bandes teintées en milieu urbain plutôt que du zébrage avec du marquage blanc.

Il est possible de souligner la forme circulaire d'un carrefour giratoire à l'aide d'un changement de matériau notamment avec l'utilisation d'un EBC. Toutefois, il est important que le revêtement ne soit pas glissant puisque les véhicules y circulent en rond et sont soumis à la force centrifuge (Gauvry, 1998). La figure 1.15 illustre l'utilisation de couleur pour souligner la forme du giratoire.



Figure 1.9 Enrobé vert sur un trottoir

Source : AIPCR, 1999



Figure 1.10 Voie médiane en revêtement ocre

Source : Screg-est, 2001.



Figure 1.11 Enduit clair pour des voies cyclables

Source : AICPR, 1999



Figure 1.12 Coulis acrylique rouge

Source : Screg-est, 2001.



Figure 1.13 Aménagement de piste cyclable dans le XIII^e arrondissement à Paris

Source : Pannetier, 1998



Figure 1.14 Place publique avec EBC
Source : AIPCR, 1999



Figure 1.15 Aménagement d'un carrefour giratoire à l'aide d'une bande rouge
Source : Gauvry, 1998

Généralement, pour une utilisation comme recouvrement de dalle dans un stationnement souterrain, les revêtements à base de résines époxydiques permettent d'allier les différents objectifs de sécurité, de rugosité, de durabilité et de résistance. Les souterrains paraissent souvent hostiles aux usagers de par leur couleur de revêtement sombre. Un choix de couleurs avisé permettra d'améliorer le sentiment de sécurité des usagers (Turmel et autres, 1995).

Les enrobés colorés ont aussi trouvé preneurs dans le domaine de l'hydrologie. En effet, à Sainte-Cécile d'Andorge en France se trouve un barrage en enrochement de 40 mètres de haut. Ce barrage construit entre 1964 et 1967 a été recouvert d'une couche bitumineuse semi-étanche et de deux couches bitumineuses étanches. Afin d'assurer la protection des couches aux rayons du soleil, une couche de mastic revêtu d'une peinture blanche a été posée sur les couches bitumineuses. Puisque la peinture, dès 1969, s'est fissurée, il a fallu recourir à des réparations légères et à du colmatage de fissures. En 1995, des travaux de rénovation du masque ont eu lieu et deux propositions ont été mises de l'avant. La première consistait à fixer une géomembrane de façon mécanique au masque et la seconde, l'application d'un enrobé bitumineux clair appliqué en couche de 5 cm d'épaisseur après fraisage de la première couche étanche dégradée (Herment et autres, 1997). C'est la deuxième solution qui a été retenue puisque les enrobés clairs (à base de Shell Mexphalte C P4) offrent une haute résistance aux impacts des corps flottants. L'utilisation des enrobés clairs pour cet usage fut une première mondiale (Moxon, 1997). Le masque d'étanchéité réalisé avec un enrobé clair à base de liant synthétique de type Mexphalte C assure à la fois l'étanchéité et la protection contre les ultraviolets du barrage et contribue à son intégration dans son environnement. De plus, une couche d'enrobé clair possède le même coût que deux couches d'enrobé noir utilisées pour le design de la réfection du barrage (Moxon, 1997).

Un autre projet utilisant les propriétés d'étanchéité aux rayons ultraviolets des revêtements clairs est situé à Lille en France. En effet, la réfection du pont des Flandres s'est effectuée avec un enrobé blanc formulé à l'aide du liant Shell Mexphalte C (Onfield, 1996).

Des précautions lors de l'utilisation des couleurs en aménagement routier doivent être prises afin de ne pas nuire aux signalisations déjà en place et reconnues par les usagers de la route. En effet, il est primordial de veiller à ce qu'un objet coloré ne dévalorise pas un autre objet de même nature mais non coloré. De plus, dans un même système, les objets identiques doivent être de la même couleur afin d'assurer la cohérence des signaux perçus par les usagers de la route. Par exemple, la couleur

désignée pour les voies cyclables en Europe est le vert et celle-ci n'est pas utilisée pour d'autres usages (Brailly et Rennesson, 1995). Le tableau VIII illustre bien les domaines d'emploi des couleurs utilisées en Europe. Un espace non circulé peut être par exemple une voie centrale ou un terre-plein. Quand il s'agit d'un « autre usage réservé », cela peut être des accotements de couleur différentes ou bien d'une voie réservée aux autobus.

La couleur est utilisée sur la route pour signifier un danger potentiel ou pour organiser l'espace viable. De plus, la couleur est reliée au support et à la forme pour prendre sa signification (Setra, 1998).

Il faut s'assurer que les espaces choisis pour être colorés doivent être des endroits habituellement non circulés par les véhicules. De cette manière, l'usager sera conscient que de circuler sur une surface colorée implique de recourir à une vigilance accrue. Les voies circulées comme les voies de virage à gauche ou à droite, ne doivent pas être réalisées en matière colorée. Par contre, les terre-pleins centraux, les voies centrales neutralisées, les accotements, les espaces de stationnement et les voies réservées peuvent être colorées. Les voies réservées le sont habituellement pour les transports en commun ou les vélos (Setra, 1998).

Un large éventail de couleur est permis sur tout réseau routier sauf le rouge vif. En effet, cette teinte est déjà utilisée pour signaler les lits d'arrêt d'urgence. De plus, puisque le vert est utilisé pour les cyclistes, son usage est défendu pour tout autre usage (Serres et autres, 1993).

Une étude préalable doit être effectuée afin de s'assurer que les couleurs employées pour le projet s'intègrent bien dans l'environnement urbain (Pannetier et Mariaud, 1994). De cette façon, un signal d'alerte doit être de couleur vive (sauf le rouge et le vert) et mis en amont du point à signaler (Setra, 1998).

L'utilisation de liants clairs dans les mélanges d'enrobés colorés permet de valoriser le patrimoine local par la valorisation des espaces urbains tels les places, les monuments

et parvis. En combinant l'utilisation de liants clairs avec des granulats locaux naturellement colorés, cela permet de valoriser le patrimoine naturel (Shell, 1999).

Tableau IX

Domaines d'emploi de la couleur en milieu urbain

Alerte (à l'amont de points dangereux ou critiques)	Affectation de l'espace			Valorisation de l'espace (traverses piétonnes, places)	Lit d'arrêt d'urgence
	Espaces non circulés	Espaces réservés aux cyclistes	Autres usages réservés		
Toutes les couleurs sauf le vert et le rouge	Couleurs atténuées	Vert	Couleurs atténuées	Couleurs atténuées	Rouge vif

Source : adapté de Renneson, 1996

Une étude a été réalisée en Europe visant à mesurer l'efficacité de l'utilisation des enrobés de couleur rose par rapport aux enrobés noirs. En effet, le rose offre une coupure avec l'enrobé noir qui le voisine et par le fait même, permet d'attirer l'attention des automobilistes. De plus, la luminosité du rose demeure relativement invariable même la nuit et par des conditions météorologiques défavorables. Le granulat utilisé pour ce projet était du grès arkosique rose et les résultats aux essais Los Angeles et Micro Deval ont donné respectivement des valeurs de 16 à 25 et de 9 à 17 (Besco et Le Mestre, 1994).

Selon un ingénieur de la Direction départementale de l'Équipement de l'Isère en France qui a fait près de 5 ans d'observations, l'utilisation des enrobés colorés (celui de son étude est le type Gerchrome) est à considérer dans le cadre d'un aménagement routier.

Il note une bonne perception des changements de couleur par les automobilistes, un effet sur le ralentissement. Aussi, selon Groz et Masson (1995), les piétons apprécient l'intégration à l'environnement que ces enrobés offrent. De plus, il ne faut pas négliger les voies réservées aux autobus et aux taxis (Petroplus, 2000).

1.4 Avantages des enrobés colorés

Plusieurs auteurs ont vanté les mérites de l'utilisation des enrobés colorés. Les études ont touché trois sujets d'importance, la résistance d'un enrobé à l'orniérage, l'économie d'éclairage potentielle effectuée dans les milieux urbains et les tunnels et l'accroissement de la sécurité.

1.4.1 Comportement à l'orniérage

L'orniérage est l'une des plus grandes préoccupations des intervenants routiers à travers le monde. L'emploi d'enrobés colorés permet de diminuer la température du revêtement exposé au soleil et de limiter les contraintes thermiques à la surface de l'ouvrage (Eurovia, 1999). L'utilisation de bitume à faible susceptibilité thermique et de granulats clairs a permis d'abaisser la température de 5 à 10°C des enrobés soumis au rayonnement solaire (Moxon, 1997). De cette façon, il a été possible de maîtriser la majeure partie du phénomène d'orniérage d'une chaussée à l'étude (Loustalot et autres, 1995). Des études visant à comparer le comportement à la température et à l'orniérage d'enrobés standards et clairs ont été réalisés. Ils ont utilisé une zone à liant noir et agrégats gris désignée par les lettres NN, une zone à liant noir et à agrégats quartziques clairs désignée par les lettres NQ et une dernière zone à liant et agrégats clairs désignée par les lettres CQ1. Des thermocouples ont été fixés à 1 cm et à 6 cm de profondeur dans les plaques d'enrobés. Ces thermocouples ainsi qu'une sonde météo sont reliées à une centrale de mesure permettant d'enregistrer les résultats. Les températures ont été recueillies durant une journée normale d'été de référence. Ensuite, les températures de surface maximales ont été déduites en simulation pour un été chaud et un été exceptionnel (Onfield, 1996). La figure 1.16 adaptée des résultats

tirés de l'article de Loustalot et autres (1995) montre les écarts de température entre les différents types d'enrobés étudiés.

La figure 1.17, tirée de Loustalot et autres (1995) montre les profondeurs d'ornières calculées sur les trois mêmes types de revêtements. Les résultats ont été obtenus à l'aide d'un logiciel de la compagnie Shell, le SPDM PC qui permet de dimensionner les chaussées. Les calculs pour l'ornierage sont appliqués aux 8 premiers centimètres de la chaussée et ont fait intervenir plusieurs paramètres tels que les conditions climatiques, le trafic enregistré pour la période d'essai, la caractérisation des liants et des enrobés et leur tenue au fluage. Dans le CQ1 il y a une baisse de l'échauffement ce qui contribue à renforcer la stabilité des enrobés dans les huit premiers centimètres de chaussée (Onfield, 1996). Encore une fois, les 3 étés d'intensités différentes ont été pris en compte. La figure 1.17 montre l'efficacité d'un éclaircissement de la chaussée sur la prévention des ornières. Il est à noter que la différence la plus marquée provient de la combinaison de liant et de granulats clairs.

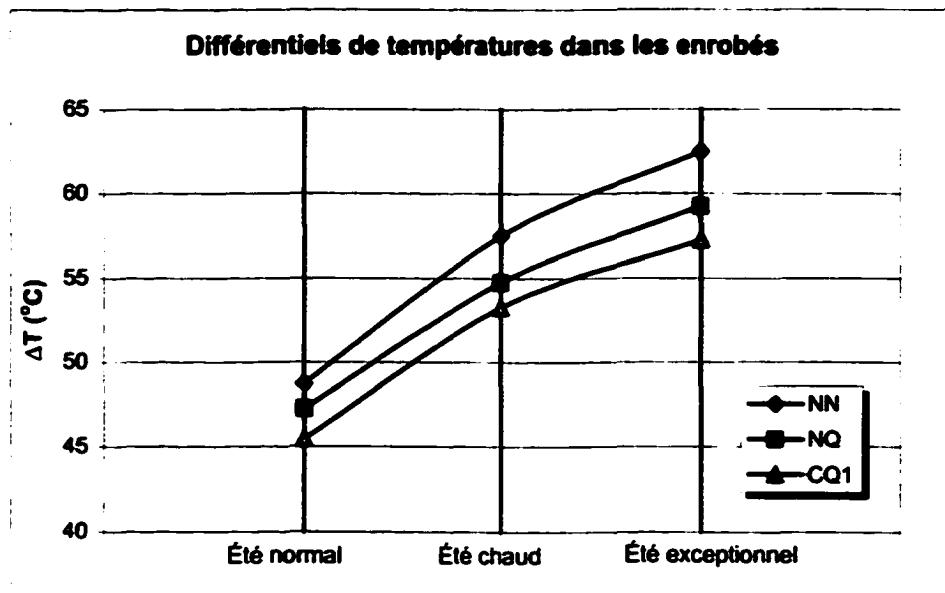


Figure 1.16 Différentiels de température à 1 et 6 cm de la surface

Source : adapté de Loustalot et autres, 1995

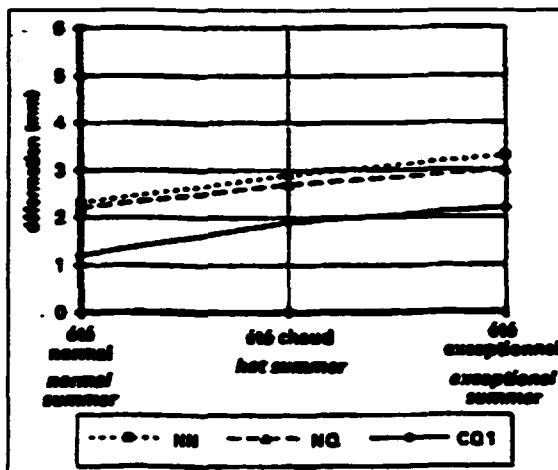


Figure 1.17 Profondeurs d'ornières

Source : Loustalot et autres, 1995

Un autre aspect du comportement des enrobés colorés est la résistance à la fatigue. En effet, une étude comparative effectuée entre un enrobé conventionnel et un EBC de type Colclair montre des similitudes en ce qui concerne la résistance à la fatigue (Cottot et Godard, 2000). Le tableau X montre les valeurs de la résistance à la fatigue des deux types d'enrobés.

Tableau X

Comparaison de la résistance à la fatigue de deux types d'enrobés bitumineux

		Enrobé standard	Enrobé Colclair
Module (MPa)	10°C 25 Hz	20 719	17 353
	15°C 10 Hz	14 660	12 448
Résistance à la fatigue	25 Hz	142×10^6	141×10^6

Source: Adapté de Cottot et Godard, 2000.

1.4.2 Économie d'éclairage

L'utilisation des enrobés colorés permet d'obtenir des économies sur les coûts en éclairage dans les tunnels puisque les coûts d'investissement et d'exploitation sont directement proportionnels au niveau d'éclairage effectué (Bérenguier, 1980). Pour distinguer un objet, il est essentiel de posséder des informations sur sa clarté et sa tonalité. C'est le facteur de luminance b qui mesure la clarté d'un objet tandis que l'éclairage moyen E_{moy} , mesure la réflexion de l'objet (Serres et autres, 1993). Le tableau XI présente la comparaison entre les facteurs de réflexion et de luminance entre différents matériaux routiers. D'autre part, pour augmenter la visibilité générale d'un objet, il est préférable de chercher à augmenter les contrastes plutôt que d'augmenter la puissance de l'éclairage (Monié et autres, 1984).

Un obstacle sombre sur une chaussée claire sera plus visible que sur une chaussée foncée puisque le contraste sera grand. L'utilisation de revêtements ayant une luminance et réflexion élevées permet d'économiser l'énergie d'éclairage dans les tunnels puisqu'il y a moins de lumière absorbée par le matériau. Cependant, quelques règles doivent être respectées quand vient le choix d'une couleur. Si une surface colorée est trop petite, l'œil du conducteur ne sera pas attiré par celle-ci. Le but visé ne sera donc pas atteint. De même, si une surface n'a pas un contraste élevé, elle devra être plus grande. En effet, pour qu'une traverse piétonne soit visible à 75 mètres, il faut qu'elle ait une longueur de 7,5 mètres. De la même façon, lorsque l'on veut que le marquage soit visible d'une distance de 150 mètres, il faut que celui-ci soit d'une longueur de 12 mètres (Serres et autres, 1993).

L'utilisation combinée de liants et granulats clairs dans les tunnels permettrait de répondre au besoin de sécurité qu'éprouvent les usagers de la route qui les empruntent. En effet, une étude menée auprès des usagers empruntant les tunnels constate à 18% qu'il y a un manque de lumière dans le tunnel. Par contre, une difficulté réside dans le fait que les réparations seront probablement réalisées en enrobés standards afin de minimiser les coûts, ce qui aura pour effet d'annuler l'effet lumineux recherché. Marec (1994) précise que l'utilisation de la combinaison de liants

noirs avec granulats clairs pourrait résoudre le problème monétaire tout en éclaircissant la surface de la chaussée. La figure 1.18 montre l'entrée d'un tunnel pavé avec un enrobé clair.

Tableau XI

**Comparaison des facteurs de réflexion et de luminance entre
différents matériaux routiers**

	Béton de ciment	Enrobé drainant clair neuf*	Enrobé clouté clair	Enrobé classique
Facteur de réflexion R	8-10	10-12	14-18	20
Facteur de luminance b	0,25-0,35	0,30	0,25-0,30	0,10-0,20
Classement	R1	R2	R1	R2-R3

*Chiffres indicatifs seulement car il y a encore trop peu de données disponibles

Source : Serres et autres, 1993

Selon le CETU, l'éclairage requis dans un tunnel est de l'ordre de 50 à 60 lux. Toutefois, cette valeur atteint 2 000 à 3 000 lux dans l'entrée du tunnel pour permettre à l'usager d'adapter sa vision au contraste entre l'extérieur et l'intérieur du tunnel et ainsi éliminer le « voile de Fry » ou effet d'éblouissement à l'entrée des tunnels. Toujours selon le CETU, l'économie réalisée en lux en utilisant une chaussée claire est de l'ordre de 1 000 lux. Quant au surcoût engendré par l'utilisation de liants clairs, il est évalué à 100 (100 FF/m² car 1 lux/m² = 1 FF) (Hans, 2001).

L'utilisation d'enrobé clair permet de réduire la consommation d'électricité nécessaire à l'éclairage de 30% (Gravet, 1996). La figure 1.19 représente schématiquement l'économie d'énergie à l'aide d'un enrobé bitumineux clair tandis que la figure 1.20 montre la différence de luminosité d'une chaussée avant et après grenaillage.



Figure 1.18 Enrobé clair dans un tunnel

Source : AIPCR, 1999

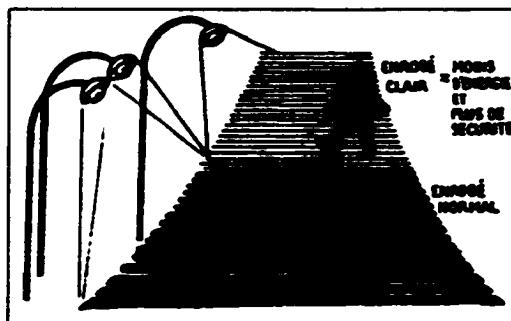


Figure 1.19 Diminution de l'intensité lumineuse d'un éclairage selon la couleur du revêtement

Source : Lassalle et autres, 1981



Figure 1.20 Couche de roulement avant et après grenaillage

Source : Hamon et Verhée, 1994

1.4.3 Amélioration de la sécurité

Les enrobés colorés favorisent l'amélioration de la sécurité par la différenciation des couloirs d'autobus, de voies piétonnes, des bandes d'arrêt d'urgence et des carrefours (Herment et Reymonet, 1989).

À Bouches-du-Rhône en France, entre Marseille et Cassis, un grave problème de sécurité attire l'attention. Entre 1990 et 1994, 9504 accidents sont enregistrés dont 366 impliquent des cyclistes (Shell, 1997). Pour contrer ce problème, des accotements différenciés cyclables latéraux de couleur beige sont réalisés en 1994. Après deux ans de circulation, une baisse de la vitesse est notée, sans pour autant que cela nuise à la fluidité du trafic, ainsi qu'une baisse des accidents de 25%.

Un autre secteur subit le même traitement: la RD 43 C en France. La voie est élargie pour permettre la réalisation de deux accotements. Les relevés effectués un an après la réalisation des travaux, soit en 1996, n'enregistrent aucun accident (Shell, 1997).

Dans les zones 30 (zones dans lesquelles les usagers doivent respecter une limite de 30 km/h), des dispositifs verticaux et horizontaux doivent être installés. Mandagaran (1992), montre le dispositif horizontal qui fait appel à des enrobés colorés de couleur verte et rouge. La figure 1.21 montre l'agencement du signal d'entrée en zone 30. Tel qu'indiqué sur la figure, les plages en bleu clair représentent l'enrobé vert tandis que les plages en bleu roi représentent l'enrobé rouge.

Une étude menée de concert entre l'University of North Carolina et la Federal Highway Administration en 2000 permet de déterminer l'effet de la couleur des bandes cyclables sur les conflits entre cyclistes et automobilistes. Durant une période d'environ 2 ans, ils ont étudié le comportement des deux types d'usagers à 10 différents sites après avoir appliqué de la peinture bleue sur le revêtement des bandes cyclables. L'étude met en évidence un faux sentiment de sécurité des cyclistes avec l'arrivée du revêtement bleu puisqu'ils regardent moins autour d'eux lorsqu'ils circulent sur les

surfaces colorées. Par ailleurs, le taux d'incidents entre cyclistes et automobilistes est passé de 0,95 à 0,59 et les automobilistes sont plus susceptibles de céder le passage aux cyclistes qu'avant l'usage de la couleur. C'est pourquoi l'étude mentionne que l'utilisation combinée d'un revêtement coloré avec une signalisation adéquate permet d'accroître l'attention des usagers qu'ils soient cyclistes ou conducteurs (Hunter et autres, 2000).

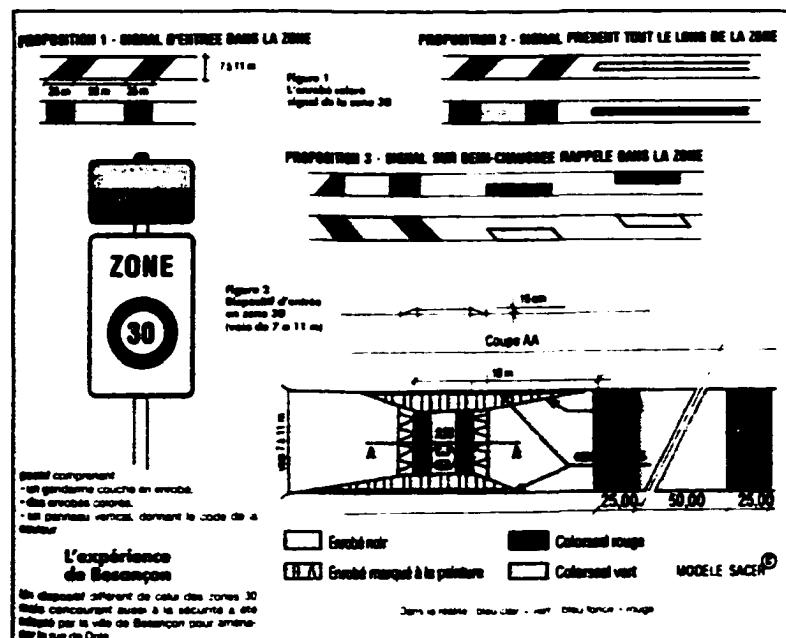


Figure 1.21 Agencement du signal d'entrée en zone 30

Source : Mangagaran, 1992

L'utilisation d'enrobés clairs en tunnels n'a pas que des effets bénéfiques sur la diminution d'éclairage requis, elle améliore aussi la sécurité. Depuis que le tunnel de Las Planas en France utilise les enrobés clairs, une diminution du nombre d'accidents à l'entrée du tunnel est observée. Cette diminution est imputable au fait que les enrobés clairs permettent de diminuer l'effet de trou noir à l'entrée du tunnel (Arnaudet et autres, 1999). De plus, la gravité des accidents a diminué (Sieys, 2001).

1.5 Coûts et mise en œuvre des enrobés colorés

Puisque les enrobés nécessitent l'utilisation de pigments ou de liants spéciaux, ils entraînent donc une certaine augmentation des coûts de mise en œuvre. De même, lors de la mise en œuvre de ces revêtements spéciaux, certaines précautions doivent être prises. Les prochains paragraphes feront la lumière sur les deux sujets énoncés ici.

Coût des enrobés - Laye et autres (1992) ont noté une augmentation de 10% des coûts lors de l'utilisation des enrobés colorés au lieu des enrobés noirs sur une portion du projet étudié. Busschots (1999) mentionne qu'un enrobé utilisant un liant pigmentable et des granulats colorés coûte quatre fois plus cher qu'un enrobé noir ordinaire. Cette information se base sur un enrobé de couleur composé de bitume pigmentable et de granulats colorés. Le coût de la méthode de coloration par épandage de grains d'acrylate sur un enrobé encore chaud est de l'ordre de 23,00\$ à 30,00\$ du mètre carré (basé sur la transformation du dollar belge en dollar canadien selon le taux du 18 janvier 2002 à 11h39, heure de Montréal). L'asphalte coulé coloré coûte entre 53,00\$ par m² et 71,00\$ par m² environ (Busschots, 1999).

Les revêtements bitumineux clairs se retrouvent dans la même gamme de prix que le pavage ou le béton coulé. Puisqu'il faut aussi prendre en considération la mise en œuvre, les revêtements bitumineux clairs se retrouvent en tête de liste. De cette façon, leur utilisation permet de réduire les nuisances aux riverains du chantier et d'économiser dans la durée du chantier par rapport au béton de ciment (Gravet, 1996). L'utilisation d'enrobés à froid posés en épaisseur faible, permet d'économiser sur les matériaux dispendieux comme les pigments et le liant synthétique (Actualités Transport, 1997).

Une étude réalisée en Floride sur Lakeshore Drive à Lake Country (Siegman et autres, 2001) permet d'évaluer à environ 6 600\$US le coût pour peindre en rouge les accotements de la route étudiée. Les usagers notent que le revêtement n'est pas plus glissant et que la couleur ne s'altère pas avec le temps. Les résidents d'autres

secteurs montrent même de l'impatience face à la possibilité de prolongation du projet dans leurs secteurs. La ville de Petaluma choisit quant à elle le StreetBond pour les bandes cyclables de la rue Lakeville Avenue. L'utilisation de cette technique, si elle est choisie, pour la Santa Cruz Avenue dans la ville de Menlo Park comporte des coûts d'environ 55 000\$US (Siegman et autres, 2001).

Coût des pigments - Selon les données obtenues par Bayer, les prix des pigments utilisés pour les revêtements routiers se retrouvent au tableau XII.

Tableau XII

Coût de différents pigments

Type de pigment	Prix approximatif par kilo
Oxyde de fer	2,20\$
Oxyde de chrome	9,00\$
Bleu de cobalt	63,00\$
Nickel titanium	12,00\$

Source : Hans, 2002

Coût des liants - Le coût des bitumes synthétiques est 10 fois plus élevé que pour un produit de distillation directe (Potti, 1997). Ce qui est confirmé par Bitumar (Duong, 2001).

Salissures - Lorsqu'un liant transparent est utilisé, les 12 premières heures sont les plus propices aux salissures occasionnées par la circulation. Par contre, Laye et autres (1992) notent qu'après un mois les traces de roues noires ont tendance à disparaître. De plus, le revêtement s'éclaircit et laisse place à la couleur du granulat. La figure 1.22 montre un revêtement coloré soumis à un fort trafic.

Fabrication et mise en place - La fabrication des enrobés colorés s'effectue comme pour les enrobés standards et ce, avec le même matériel. Quant à l'application, puisqu'ils sont souvent utilisés comme couche de roulement ou de surfaçage, leur épaisseur se situe entre 2 et 3 cm uniquement (Lassalle et autres, 1980).

Lors de travaux routiers en ville, il est important de prendre en considération certains facteurs tels que la présence de bordures de trottoirs et de réseaux sous-terrains, le respect des seuils d'habitation et de trottoirs, les décaissements, le compactage induisant des vibrations, les déviations de la circulation le cas échéant et les différentes nuisances telles que le bruit et la pollution pour la durée des travaux (Creton et Meunier, 1992).



Figure 1.22 Salissures sur EBC dues à un fort trafic

Source : AIPCR, 1999

Suivi du comportement - Des enrobés colorés sont utilisés dans les Jardins Wilson à Saint-Denis en France. Quelques années après la mise en service, il n'y a que les joints de dilatation et les raccordements avec le granite qui montrent une différence de teintes. Dans l'ensemble du projet, le vieillissement des teintes et du revêtement s'est effectué sans modification de couleur ponctuelle due au trafic et aux intempéries (Saillot et Cluzaud, 2000).

La ville de Choisy-le-Roi en France a aussi opté pour l'usage d'enrobés colorés afin de mettre en valeur le patrimoine sur l'esplanade de l'hôtel de ville. Bien que de

nombreuses réparations aient été effectuées sur le revêtement, la teinte originale du revêtement est demeurée intacte (Zündel, 1999).

Précautions quant au nettoyage de l'équipement – Lorsqu'une centrale décide de produire des enrobés colorés, l'alimentation en liant doit s'effectuer de façon distincte de l'apport en bitume standard. En procédant de la sorte, les risques d'altération de la couleur sont moindre. Il est recommandé avant de produire des enrobés colorés de malaxer quelques gâchées de granulats chauds et secs afin de nettoyer le malaxeur. Il en est de même pour le finisseur et toute machinerie entrant en contact avec l'EBC. Il est même recommandé que les équipes de travail soient munis d'outils neufs et de bottes de sécurité neuves (Journal Shell Bitume, 1998).

1.6 Expériences québécoises

Des enrobés colorés ont été réalisés à divers endroits sur le territoire de la Ville de Montréal. En effet, dans les années précédant l'Expo de 1967, des entreprises ont entrepris de faire paver des stationnements ou autres surfaces avec des enrobés de couleur. Par contre, de tous les enrobés posés dans ces années là, il ne reste rien pouvant prouver leur passage au Québec.

Un site est aménagé avec de la peinture bleu à la Ville de Montréal sur la rue de Lorimier près de la rue Notre-Dame. Comme le montre la figure 1.23, la traverse piétonne a mal réagi aux assauts de la nature.

Un autre site à Montréal possède des traverses piétonnes de couleur. Cette fois ci, la couleur est obtenue à l'aide d'enrobés colorés. Il s'agit de l'aménagement de la traverse piétonne située à l'intersection du boulevard Saint-Michel et de la rue Shaughnessy (au nord de Jean-Talon). Le projet, couvrant une superficie de 300 m² effectué en 1998, a fait l'objet d'un suivi durant 3 ans. La couleur employée est bordeaux et l'enrobé utilisé porte le nom d'Enrocolor. Il s'agit d'un enrobé EB-5 coloré dans la masse avec des pigments de couleur avec mise en place manuelle et compactage au rouleau. Des bandes thermoplastiques blanches complètent

l'aménagement et permettent d'améliorer l'étanchéité du joint entre l'enrobé existant et l'Enrocolor. De plus, ces bandes sont réalisées dans le but d'augmenter le contraste entre la traverse et l'enrobé existant. Les observations quant aux délais de réalisation montrent que la réalisation est moins longue et moins onéreuse que les traverses piétonnes réalisées en béton. Le contraste entre l'enrobé et l'Enrocolor est plus marqué lorsque la chaussée est mouillée. La figure 1.24 montre le site par temps sec (Ville de Montréal, 1998). La dernière photographie de la figure 1.24 montre la jonction entre l'enrobé noir conventionnel et l'enrobé Enrocolor.

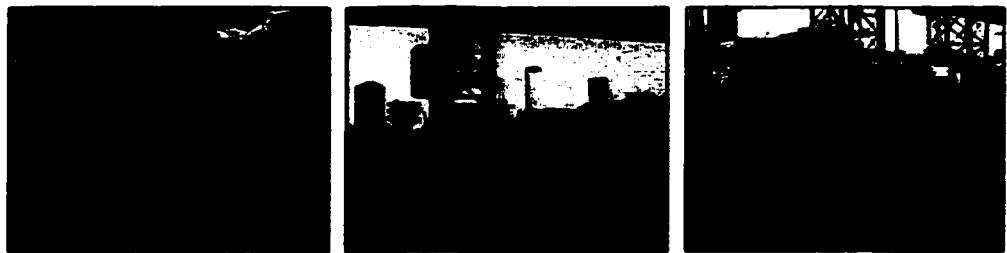


Figure 1.23 Zone piétonne et cyclable avec peinture bleue



Figure 1.24 Traverse piétonne avec l'enrobé Enrocolor par temps sec

Les prochains chapitres présentent les constituants disponibles au Québec ainsi que le programme expérimental de la présente étude. Les résultats et l'analyse se feront dans les derniers chapitres.

CHAPITRE 2

GRANULATS POUR LA FORMULATION D'ENROBÉS COLORÉS QUÉBÉCOIS

La couleur d'un revêtement bitumineux est imputable, entre autres, à la couleur des granulats qui le composent. C'est pourquoi il faut s'assurer que les granulats employés seront de la couleur souhaitée de l'enrobé. Une investigation est effectuée afin de déterminer quels sont les types de roches naturellement colorées au Québec. De plus, il est important de localiser géographiquement les carrières exploitant de tels types de matériaux afin de déterminer les besoins en approvisionnement. Dans ce chapitre, il sera question de la géologie et des sources de granulats colorés du Québec.

2.1 La géologie du Québec

Le type de roches et de minéraux qu'il est possible de retrouver dans certaines régions du Québec provient des dépôts amassés et des transformations subies au cours des années et qui forment l'écorce terrestre. Afin de mieux comprendre pourquoi un type de roche se retrouve en abondance dans une région plutôt qu'une autre, un bref aperçu de la géologie québécoise est présentée ici.

Le Canada est divisé en régions physiographiques : le Bouclier canadien et les régions en bordure du Bouclier (Douglas et Tremblay, 1979). Le Québec comprend la partie est du Bouclier canadien (datant du Précambrien), les Basses Terres du Saint-Laurent et les Appalaches (datant du Paléozoïque). Ces régions sont passées en revue dans les prochaines sections.

2.1.1 La géologie du Québec : Chronologie

Afin de situer dans le temps les événements et les différentes formations de roches, une synthèse du processus de formation des roches québécoises s'impose. Il y a 3 milliards d'années, une mince croûte se forme et marque le début de l'histoire géologique québécoise. C'est 300 000 ans plus tard que la région géologique du

Supérieur se forme une fois que des roches de nature diverse se soient soudées entre elles. Entre 1,97 et 1,82 milliard d'années, d'autres provinces comme celles de Hearne, de Rae et du Nain, entrent en collision avec celle du Supérieur permettant ainsi aux sédiments séparant les différentes provinces de se plisser et de former des chaînes de montagne. Environ 500 000 années plus tard, le continent se sectionne et un océan se forme au Sud-Est de celui-ci. La chaîne de montagne des Laurentides est créée grâce aux sédiments provenant de la fermeture de l'océan et qui se sont plissés. Cette formation s'étale de 1,25 milliard d'années jusqu'à 1 milliard d'année. Au départ, cette chaîne de montagne atteignait des hauteurs voisines de l'Himalaya. C'est l'érosion qui a grugé les montagnes et les Laurentides actuelles ne sont que la racine de la chaîne de montagne originale.

Dès 600 millions d'années, les continents se fracturent et se séparent pour former l'océan Lapetus. Les sédiments qui se déposent en faible profondeur sont à l'origine des roches sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les roches sédimentaires des Appalaches sont formées à partir des sédiments déposés en profondeur. C'est finalement entre 500 et 290 millions d'années que l'océan Lapetus se ferme et que les roches sédimentaires nouvellement formées se plissent et se métamorphisent pour former la chaîne de montagne des Appalaches (Hébert et Hébert, 1994).

2.1.2 La géologie du Bouclier canadien

La région du Bouclier canadien représente 92% du sous-sol québécois. Celle-ci est divisée en provinces tectoniques. Selon Landry et Mercier (1983), les provinces sont les suivantes : province du Lac-Supérieur, de Churchill, de Nain et de Grenville. La figure 2.1 montre les différentes provinces géologiques du Bouclier canadien.

Pour les besoins de la présente étude, seules les provinces du Lac Supérieur et de Grenville seront prises en compte puisque les granulats utilisés pour les enrobés bitumineux de cette étude doivent se limiter à la province de Québec. Il est à noter que

pour ce qui est des travaux situés dans la région de Montréal, il faut se limiter à la province de Grenville.



Figure 2.1 Provinces tectoniques du Bouclier canadien

Source : Bourque, 2002

2.1.2.1 La province du Lac Supérieur

La province du Lac-Supérieur ou plus communément appelée province du Supérieur, forme le cœur du Bouclier canadien avec une superficie de 600 000 km². Cette province est divisée en sous-provinces selon des considérations lithologiques,

métamorphiques, structurales et chronologiques. Il s'agit des provinces de Minto, d'Ashuanipi, de Bienville, d'Opinaca, de Némisscau, de Pontiac, de La Grande, d'Abitibi et d'Opatica. Les minéraux industriels comme le granit architectural et la silice proviennent en majorité des sous-provinces de Pontiac et de l'Abitibi (Simard, 2001). Les différents gisements de cette province sont des intrusions postorogéniques comprenant de la syénite et de la carbonatite, des dykes de diabase, des blocs de sédiments paléozoïques ainsi que des matériaux volcaniques permotriasiqes (Douglas et Tremblay, 1979).

Le Lac-Supérieur est composé de roches volcaniques, sédimentaires et d'étendues de roches granitiques et gneissiques. Au nord du 50° degré de latitude nord, les roches les plus abondantes sont des roches de gneiss granitique roses ou gris qui se transforment par endroits en gneiss rubanés et en paragneiss (Landry et Mercier, 1983).

2.1.2.2 *La province de Grenville*

La province de Grenville possède une superficie voisine de celle du Lac-Supérieur soit d'environ 600 000 km². Les couches géologiques de cette province ont été métamorphisées et il est possible de retrouver de grandes quantités d'anorthosites. Des métasédiments sont aussi présents comme les quartzites, les calcaires cristallins, les amphibolites et les paragneiss. Des métavolcaniques sont aussi présentes comme les anorthosites, les granites, les diorites, les syénites et les gabbros (Landry et Mercier, 1983).

Il y a présence de syénite à la limite sud-est, de dykes de diabase, roches non déformées du bassin du lac Melville, de la carbonatite, des amoncellements de roches de recouvrement du Paléozoïque ainsi que des matériaux volcaniques permotriasiqes (Douglas et Tremblay, 1979).

2.1.3 La géologie des Basses-Terres du St-Laurent

Les Basses Terres du Saint-Laurent sont caractérisées par une plaine interrompue par des cours d'eau et des collines montérégienennes. Celles-ci sont au nombre de cinq et sont formées de roches ignées intrusives. Il s'agit des collines suivantes : le mont Royal, le mont St-Bruno, le mont Johnson, le mont Saint-Hilaire et le mont Rougemont.

Les roches des Basses Terres du Saint-Laurent sont toutes d'origines sédimentaires sauf celles des collines montérégienennes, des dykes et des filons-couches. Elles sont formées de grès, de shales, de dolomies et de calcaires (Landry et Mercier, 1983).

Les Basses-Terres du Saint-Laurent ont été recouvertes par les glaciers du Pléistocène et la mer de Champlain, c'est pourquoi il y a présence de nombreux dépôts meubles. Ce territoire est regroupé en trois composantes, les Basses-Terres de l'ouest, de l'est et du centre. C'est dans les Basses-Terres du Centre que se retrouve la rivière Outaouais et le Fleuve Saint-Laurent (Douglas et Tremblay, 1979).

2.1.4 La géologie des Appalaches

Les Appalaches québécoises s'étendent des Cantons de l'Est jusqu'à la Gaspésie. Elles sont formées par des roches sédimentaires et volcaniques ayant subi un faible métamorphisme (Landry et Mercier, 1983). Elles sont composées d'un bon nombre de divisions physiographiques comprenant quatre basses-terres, 2 bas-plateaux et 3 hautes-terres (Douglas et Tremblay, 1979).

2.2 La production de granulats au Québec et au Canada

Chaque région géologique possède une gamme variée de ressources minérales fournissant la matière première pour 50% des objets utilisés couramment comme la brique, le verre, le ciment et le sel. Certaines carrières exploitent des métaux précieux comme l'or ou le cuivre et d'autres exploitent des matériaux de construction comme la

pierre architecturale et la pierre concassée. Ce sont les matériaux de construction qui attirent l'attention de la présente étude.

L'industrie minière au Québec occupe une place importante dans l'économie (en 1991, 2,9 milliards de dollars de production effectuée et 759 millions pour l'entretien des gîtes, les explorer et les mettre en valeur). La figure 2.2 présente la façon dont est répartie la production de pierres architecturales, ornementales et pour bâtiment au Canada.

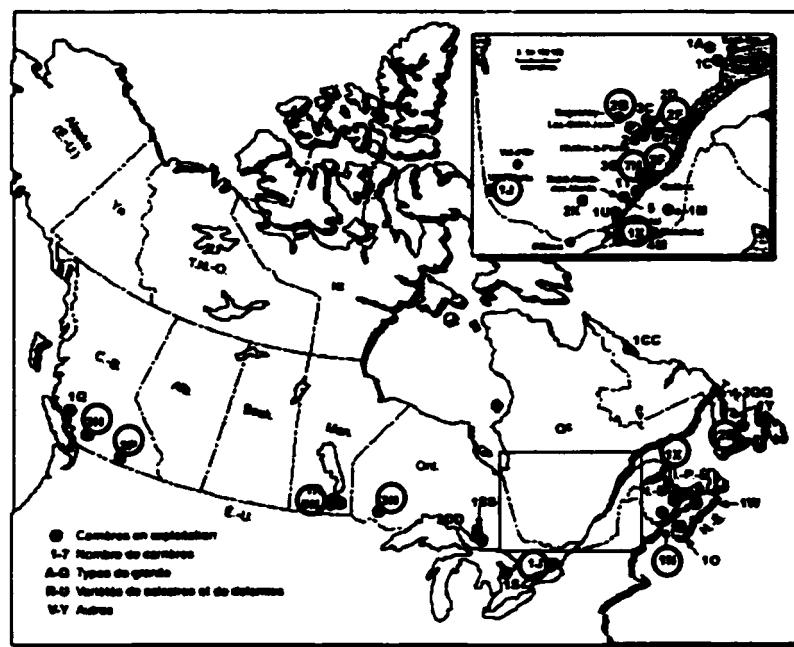


Figure 2.2 Production de pierres architecturales au Canada
Source : Adapté de Vagt, 1999a

Sur la figure 2.2 des cercles permettent de visualiser rapidement les endroits où l'exploitation de pierre architecturale de couleur s'effectue. La désignation des lettres est montrée au tableau XIII.

Au Canada, l'utilisation de la pierre concassée provenant du granite a subi des fluctuations appréciables durant les années 1997 et 1998 comme le démontre le tableau XIV.

La comparaison des résultats avec la production totale de pierre pour les mêmes utilisations et années montre l'importance de l'utilisation du granite. Le tableau XV permet d'apprécier l'importance de l'utilisation des granulats par rapport à l'utilisation totale de pierre au Canada pour les années 1997 et 1998.

Pour ce qui est de la production de granite et de grès en général au Canada, les chiffres de la figure 2.3 montrent une fluctuation selon les années. Il est même possible d'apprécier l'augmentation selon les années.

Tableau XIII

Signification des lettres concernant la production de pierre architecturale au Québec

Lettre	Désignation
B	Granite rose à grain moyen
F	Gneiss granitique rose à grain fin
H	Granite gris-rose ou gris-brun à grain grossier
J	Granite rouge à grain moyen
N	Granite rose, brun ou or à grain moyen
P	Granite rose corail à grain grossier
V	Grès olive à grain moyen
X	Grès blanc à chamois de grain fin à moyen

Source : Adapté de Vagt, 1999a

Tableau XIV

Utilisation du granite et du grès dans le domaine routier

	Utilisation du granite (en milliers de tonnes)		Utilisation du grès (en milliers de tonnes)	
	1997	1998	1997	1998
Granulats à asphalte	4 735	4 086	254	376
Revêtement des routes	4 893	6 102	968	1 218

Source : Adapté de Vagt, 1999b

Tableau XV

Utilisation du granite et du grès par rapport à l'utilisation de la pierre totale

	Utilisation de la pierre (en milliers de tonnes)		Proportion d'utilisation du granite (%)		Proportion d'utilisation du grès (%)	
	1997	1998	1997	1998	1997	1998
Granulats à asphalte	12 559	10 398	38	39	2	4
Revêtement des routes	35 137	31 135	14	20	3	4

Source : Adapté de Vagt, 1999b

2.3 Les propriétés des roches

Les roches considérées pour la présente étude doivent avoir une dureté d'au moins 5 et doivent comporter une couleur autre que gris ou noir. Il faut se fier aux classes de l'échelle relative de Mohs comme le montre le tableau XVI pour déterminer la dureté d'une roche. De plus, le ministère des Transports du Québec prescrit des normes permettant d'évaluer en laboratoire les caractéristiques et le comportement des roches (voir Chapitre 4).

2.3.1 La classification des roches

La surface de la Terre est composée de trois types de roches soit les roches ignées (ou magmatiques), les roches métamorphiques et les roches sédimentaires. Une roche se trouve dans l'une ou l'autre de ces catégories selon son mode de formation.

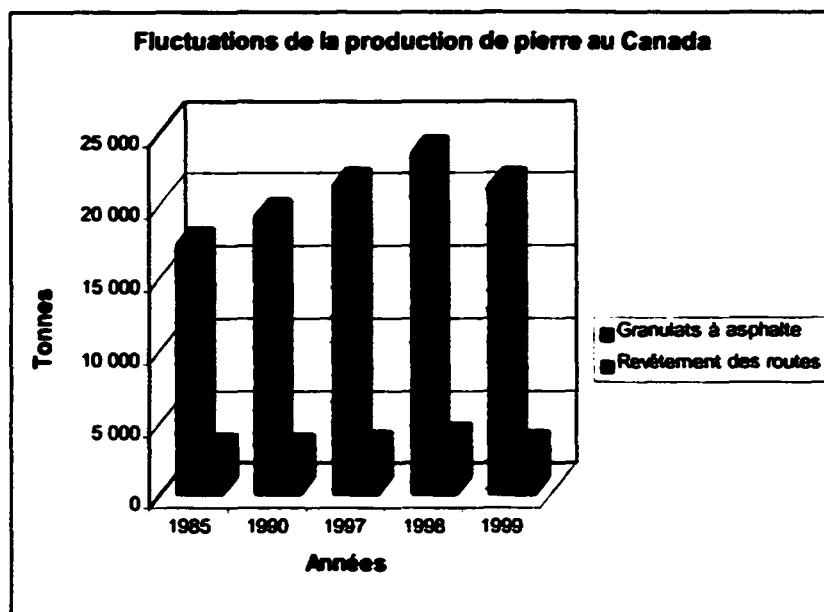


Figure 2.3 Fluctuations de la production de pierre au Canada

Source : Vagt, 1999a

2.3.1.1 Les roches ignées

Ces roches sont le résultat du refroidissement et de la solidification de matériaux fondus (magmas) en provenance de l'écorce ou du manteau terrestre. Le magma se compose généralement de silicates fondus transportant une certaine quantité de cristaux en suspension ainsi qu'une légère quantité de gaz (H_2O et CO_2). Puisque leur teneur en silice est très variable, elle donne lieu à de nombreuses variétés de roches ignées.

La solidification s'effectue soit à la surface de la terre (roches ignées extrusives ou effusives), soit à l'intérieur d'autres roches (roches ignées intrusives). Lorsqu'il est question de roches extrusives, on observe le phénomène de solidification lors d'éruptions volcaniques. En effet, la lave est projetée hors de la terre sous forme de fragments et ceux-ci se refroidissent très rapidement. Ces roches ainsi formées sont des roches volcaniques constituées de minéraux à grains fins et de quelques parcelles de verre. En ce qui concerne les roches intrusives, on observe deux types de refroidissement : lent et court. Lorsque le refroidissement s'effectue de façon lente, on appelle les roches ainsi formées plutoniques et sont grossièrement grenues. Lors d'un refroidissement lent, les roches sont appelées hypabyssales ou filoniennes. La dimension des grains de ses minéraux est plutôt fine. Toutefois, il est possible de retrouver des minéraux de tailles diverses dans une même roche (Hébert et Hébert, 1994).

Les roches ignées plutoniques sont classées selon le pourcentage relatif de minéraux qu'elles contiennent. Ces minéraux sont : le quartz, le feldspath alcalin, le feldspath calcosodique ou plagioclase, les feldspathoïdes, l'olivine, les pyroxènes et les amphiboles.

Les roches intrusives - Il est facile de déterminer si une roche est de type intrusive. En effet, il s'agit de déterminer la proportion de minéraux foncés par rapport aux minéraux clairs. L'indice de coloration ainsi obtenu permet de classifier la roche en

trois catégories : les felsiques (indice inférieur à 10), les mafiques (indice compris entre 10 et 90) et les ultramafiques (indice supérieur à 90). Le quartz, les feldspaths, les feldspathoïdes et la muscovite sont des minéraux clairs appelés felsiques (avec silicates de calcium, de sodium ou de potassium) tandis que l'olivine, les pyroxènes, les amphiboles, la biotite et les minéraux opaques sont des minéraux foncés ou colorés appelés mafiques (silicates et oxydes de magnésium ou de fer).

Tableau XVI

Échelle de dureté de Mohs

Duretés de Mohs			
Rayés par l'ongle	1	Talc	Très tendres
	2	Gypse	
Rayés par une pièce de monnaie de 1 cent	3	Calcite	Assez tendres
	4	Fluorite	
Rayés par une pointe de canif	5	Apatise	Assez durs
	6	Orthoclase	
Rayent le verre	7	Quartz	Très durs
	8	Topaze	
	9	Corindon	
	10	Diamant	

Source : Girault et Ledoux, 1994

Les roches intrusives sont des roches ignées qui ont été refroidies et ce à différents niveaux dans la croûte terrestre. Les plutons, masses importantes de roches

intrusives, ont une dimension moyenne de 300 km². Il y a plusieurs types de roches intrusives : les batholites, les stocks, les laccolites et les lopolites.

Tel que mentionné précédemment, les roches ignées sont issues du refroidissement de magmas résultant en une solidification des matériaux fondus. Or, lorsque la température du magma est légèrement inférieure à sa température de fusion, il y a cristallisation. Il y a deux types de roches alors produites : une roche complètement composée de cristaux ou bien des cristaux baignant dans un verre plus ou moins abondant lors d'un refroidissement rapide. La vitesse de refroidissement déterminera la grosseur des grains. De plus, cette vitesse ainsi que celle de refroidissement diminueront avec l'augmentation de la viscosité du magma.

Les roches ignées plutoniques possédant des cristaux visibles à l'œil nu ont une texture appelée phanéritique. Ces cristaux proviennent d'un refroidissement en profondeur du magma. Les roches cristallines sont soit à grains fins (de 0,2 à 1 mm), soit à grains moyens (de 1 à 5 mm) ou à grains grossiers (de 5 à 30 mm). Les grains plus gros de l'ordre de quelques centimètres à près d'un mètre possèdent une texture appelée pegmatitique. Les pegmatites, lorsqu'elles sont de composition granitique, se présentent en dykes ou en lentilles.

La viscosité du magma (ou de la lave) est responsable des caractéristiques des structures de roches volcaniques. La teneur en silice du liquide contribue à faire varier la viscosité, plus la teneur en silice est élevée et plus la viscosité est forte.

Les roches ignées qui possèdent des grains non visibles à l'œil nu (ni à la loupe d'ailleurs) possèdent une texture appelée aphanitique. Ceci survient lors d'un refroidissement rapide du magma.

Les roches extrusives - Les extrusives possédant une texture vitreuse ont plutôt l'aspect du verre. Lorsque les laves sont riches en silice et sont particulièrement vitreuses, elles peuvent posséder une texture sphérolitique composée de sphère

radiées (sphérolites). Ces sphères sont elles mêmes composées de minéraux en fibres tels les plagioclases, pyroxènes, calcites et quartz. Lorsque les laves sont plus pauvres en silice, des sphères radiées peuvent aussi être présentes ainsi que des varioles. Les varioles, quant à elles sont composées de plagioclase ou de pyroxène en fibres avec ou sans verre, le tout dans un fond sombre vitreux initialement. À ce moment là, on nomme cette texture variolitique.

Dans une roche, on retrouve souvent des minéraux de grosseurs différentes. Il est donc courant d'observer des minéraux grossiers (phénocristaux) entourés de minéraux fins. Cet agencement de minéraux fins s'appelle la matrice. Quand la matrice est composée de minéraux phanéritiques, on appelle la texture associée porphyritique. Quand la matrice est aphanitique, la texture est porphyrique. Parfois, les minéraux sont enchevêtrés et il y a des minéraux feldspathiques dans les minéraux mafiques, la texture est alors diabasique ou ophitique. Lorsque des intrusions de quartz dans de grands cristaux de feldspath alcalin formant des formes irrégulières, la texture est graphique. Enfin, une texture poecilitique est composée de gros cristaux contenant d'importantes inclusions de minéraux différents.

2.3.1.2 *Les roches sédimentaires*

Les roches sédimentaires couvrent plus de 65% de la surface de la terre bien qu'elles ne représentent qu'une faible portion de l'écorce terrestre (5%). Elles sont formées soit par érosion, sédimentation ou diagenèse.

Les sédiments sont un mélange de particules solides et de précipités chimiques. Ceux-ci sont de trois classes différentes : les sédiments terrigènes, allochimiques ou orthochimiques.

Les sédiments terrigènes – Ce type de sédiment est composé de sable, de cendres volcaniques ou de fragments provenant de la désagrégation de roches sous des actions mécaniques ou chimiques. Il existe quatre classes de granulométrie pour les

particules terrigènes : les lutites, les siltites, les arénites et les rutites. C'est le pourcentage des particules de quartz, feldspath et fragments de roches qui détermineront le nom de la roche étudiée.

Les sédiments allochimiques – Les roches allochimiques sont particulièrement composées de calcaires ou de roches carbonatées (contenant du calcite, de l'aragonite et de la dolomite). Ce sont des matériaux précipités à partir de solutions dans un bassin de sédimentation et qui sont transportés sur de courtes distances dans ce même bassin. Les dolomites et les calcaires sont classés par leur granulométrie comme pour les roches terrigènes. Les fragments sont, nommés par ordre croissant, les calcilutites et dololutites, les calcisiltites et dolosiltites, les calcarénites et dolarénites et les calciruditites et doloruditites. Les calcaires possèdent parfois une portion terrigène composée de quartz, feldspath, mica ou une portion orthochimique composée de dolomite, hématite ou autre. Les coquillages et fragments de coquillages composent aussi ce type de sédiments.

Les sédiments orthochimiques – Ce type de sédiments est produit par la précipitation chimique d'éléments divers comme le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium. Cette précipitation survient lorsque l'eau contient une teneur en éléments trop élevée ou que le niveau de l'eau a diminué à la suite d'une évaporation dans un bassin dont l'eau n'a pas de circulation forte. En d'autres termes, les sédiments orthochimiques ne subissent aucun transport. Leur composition chimique distingue six types de roches différentes : les roches carbonatées (constituées de calcaire ou de dolomie), les roches siliceuses (composées de chert), les roches phosphatées ou phosphorites (comprenant des phosphates), les roches évaporites (formées par évaporation et constituées de sels de sodium et de potassium comme la halite et la sylvite ou de gypse) et les roches ferrifères.

Pour classifier les roches sédimentaires, on se base sur la taille, la nature et la proportion des particules et de la matrice. Lorsqu'il est question de sédiments fins terrigènes, il est alors nécessaire de tenir compte de la structure de la roche.

2.3.1.3 Les roches métamorphiques

L'ensemble des transformations texturales et minéralogiques que subit une roche ignée, métamorphique et sédimentaire dues à des températures et pressions différentes de l'état original s'appelle le métamorphisme. La roche qui a subi les transformations s'appelle protolite ou roche mère. Durant le processus de métamorphisme, le protolite perd sa stabilité. Le phénomène s'étend sur une vaste plage de températures permettant les transformations comme la diagenèse et l'altération jusqu'à la fusion partielle ou même formation de magma (de 600°C à 750°C). Il y a toujours recristallisation (partielle ou totale) des minéraux de la protolite en nouveaux minéraux lors du métamorphisme. La recristallisation a lieu à l'état solide et se fait par le biais d'une phase fluide contenue dans les pores et interstices de la roche. Le fluide permet le transport de minéraux provenant eux aussi d'une roche mère et de créer, sous des conditions nouvelles de température et de pression, des nouveaux minéraux. Ces nouveaux assemblages portent le nom de paragenèses. Il existe plusieurs types de métamorphisme. Il s'agit du métamorphisme de contact, de pression et régional.

Le métamorphisme de contact - Le métamorphisme de contact, aussi appelé le métamorphisme thermique, est un phénomène se produisant dans les roches encaissantes au contact des intrusions de roches ignées. C'est le refroidissement qui est responsable du métamorphisme. Celui-ci demeure donc local et ne développe pas de structures directionnelles.

Le métamorphisme de pression - Le métamorphisme de pression aussi appelé dynamo-métamorphisme, est causé par la pression uniquement. Il y a deux classes dans ce type de métamorphisme : celui rencontré dans les zones de faille et celui de choc (aux emplacements des sites d'impact des météorites). Il est courant qu'une roche soit cisaillée et broyée sous l'effet de la pression ou du déplacement dans une zone de failles. Une brèche de faille est formée par de multiples fractures à faible profondeur près d'une faille. Cette brèche est alors composée de fragments anguleux

dans une matrice à grains fins. Les roches qui s'érodent facilement dans les zones de failles se distinguent souvent par des dénivellations ou des cours d'eau. Quand de grands déplacements ont lieu, le broyage s'effectue alors plus intensément et donne lieu parfois à de la recristallisation.

Le métamorphisme de choc survient lorsqu'un météorite frappe la Terre. En effet, le météorite atteint la Terre avec une énergie cinétique qui se transforme en chaleur et en ondes de chocs. La chaleur fait évaporer le météorite et occasionne la fusion des roches situées à proximité du point d'impact. Les ondes de choc quant à elles sont responsables des fractures s'éloignant du point de chute puisqu'elles induisent des pressions très élevées. Donc, autour du cratère formé, les roches forment une sorte d'auréole d'impact. À l'extérieur de l'auréole, les roches sont fracturées de façon conique (cônes de pression ou shattercones) et celles-ci sont souvent remplies de verre. Au fur et à mesure que l'on s'approche du centre du cratère, la concentration de verre augmente. Les fragments anguleux cimentés par du verre sont appelés suévites.

Le métamorphisme régional – Ce phénomène est formé par la pression et la température qui affectent de grandes étendues ayant des épaisseurs considérables. Il existe deux types de métamorphisme régional : le métamorphisme d'enfouissement et thermodynamique. Le métamorphisme d'enfouissement est à la base de séquences sédimentaires de plusieurs kilomètres d'épaisseurs ayant subi peu de déformations. Le second type, est directement relié à la formation des chaînes de montagnes. C'est le plus largement répandu. Pendant leur existence, les roches métamorphiques subiront plusieurs cycles de déformation et de recristallisation.

Pour classer les roches métamorphiques, il faut se baser sur les aspects suivants : l'intensité du métamorphisme, les structures observées ainsi que les paragenèses minéralogiques. L'intensité du métamorphisme augmente avec la température. Lorsque celle-ci augmente, le grade de métamorphisme varie de telle sorte qu'il passe du très faible à élevé en passant par le faible et le moyen. Les paragenèses observées

dépendent de la composition de la roche initiale et des conditions de température et de pression dans lesquelles se sont formées les roches métamorphiques. Lorsque des roches possèdent une composition semblable, soit par température ou pression, elles sont regroupées pour former des faciès métamorphiques (Hébert et Hébert, 1994).

Il y a deux types de structure pour les roches métamorphiques : les structures planaires (foliations) et les linéaires (linéations). On peut même retrouver ces deux structures dans une même roche. Dans les planaires, il y a le clivage, la schistosité et la gneissosité (rubanement métamorphique). Le clivage, c'est lorsqu'une roche a tendance à se fracturer le long de plans parallèles secondaires provenant d'une déformation. Lorsque ce clivage est en minces feuillets parallèles, on l'appelle clivage ardoisier. On remarque du clivage dans les roches dont on ne peut percevoir les grains à l'œil nu. La schistosité est plutôt formée lorsque des grains visibles à l'œil nu sont orientés de façon planaire. La gneissosité quant à elle, consiste en une disposition ou une ségrégation des minéraux contenus dans la roche et alternant avec des bandes de minéraux clairs (minéraux felsiques) et foncés (minéraux mafiques).

Faiblement métamorphisée, il est encore possible de reconnaître la roche originale. Souvent, il ne suffit que d'ajouter le préfixe méta au nom initial (métabasalte, métarénite). Lorsque la roche présente une schistosité, elle est appelée un schiste. Lorsque la roche possède un rubanement métamorphique, on l'appelle gneiss. Les gneiss dérivés de roches plutoniques sont des orthogneiss et les gneiss dérivés de roches sédimentaires, des paragneiss. Les schistes et les gneiss sont qualifiés des minéraux qui les caractérisent (schiste à chlorite, gneiss à biotite). De plus, ils tiennent compte de la taille moyenne des minéraux puisque ceux-ci augmentent avec l'intensité du métamorphisme (Hébert et Hébert, 1994).

Bien que les roches possèdent une formation différente de l'une à l'autre, un processus de formation est tout de même observable. C'est ce que la figure 2.4 tente de démontrer : le cycle des roches et leur processus de formation.

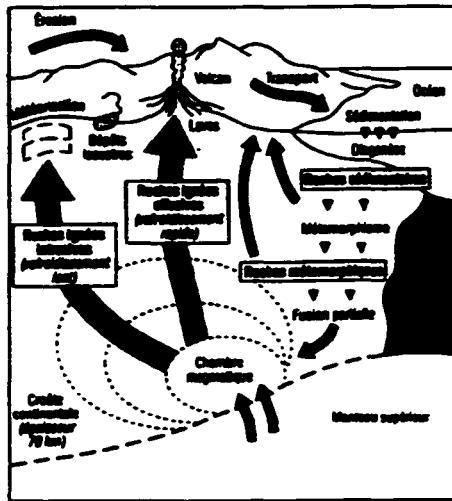


Figure 2.4 Le cycle des roches et leur processus de formation

Source : Hébert et Hébert, 1994

2.4 Les sources de granulats colorés au Québec

À la lueur des informations sur la géologie québécoise, un inventaire des roches de couleur a été effectué à partir d'un document publié en 2000 par Gaudreau et autres. Il s'agit des couleurs verte, rose et beige.

2.4.1 Les granulats de couleur verte

Il est possible de trouver de la roche de couleur verte dans des régions et compositions minérales différentes. Ainsi, il est possible de retrouver du quartzite à muscovite dans le Témiscamingue (Abitibi-Témiscamingue), de la farsundite porphyroïde et de la mangérite quartzifère à Rivière-à-Pierre (Québec), de la jotunite quartzifère au Mont-Apica (Saguenay-Lac-St-Jean), de la serpentine dans les régions de Black Lake et d'Asbestos (Cantons-de-l'Est), ainsi que de l'ortho-quartzite à Bernierville (Centre du Québec) (Gaudreau et autres, 2000).

2.4.2 Les granulats de couleur rose

En ce qui concerne les granulats rose brunâtres, il y a le gneiss granitique de Saint-Donat-de-Montcalm (Lanaudière); la mangérite quartzifère à Saint-Didace (Lanaudière); le fardundite porphyroïde à Rivière-à-Pierre (Québec) et la syénite à hypersthène de Magpie (Duplessis). Les roches de couleur rose et rougeâtres se retrouvent dans plusieurs régions. Il y a des monzogranites à Guénette (Laurentides); de la farsundite porphyroïde à Rousseau-Mills (Québec) et à Métabetchouan (Saguenay-Lac-St-Jean); de l'orthogneiss à Grandes-Bergeronnes (Manicouagan) et de la mangérite quartzifère et porphyroïde à Bégin (Saguenay-Lac-St-Jean) (Gaudreau et autres, 2000).

2.4.3 Les granulats de couleur beige

Les gisements de roches beiges sont beaucoup moins nombreux que ceux de couleur verte ou rose. Deux sites font l'exploitation de grès au Québec, soit un à Saint-Canut (Laurentides) et un à Havelock (Montérégie) (Gaudreau et autres, 2000).

2.5 Les pigments colorés

Il existe sur le marché plusieurs types de pigments colorés. Les couleurs peuvent être le jaune, le rouge, le brun, le vert, le bleu, le blanc et le gris ou des variations de celles-ci. Les pigments utilisés pour les revêtements routiers sont de type minéraux puisqu'ils sont stables à la lumière et aux intempéries. Au Québec, tous les types de pigments sont disponibles. Les prochaines sections font un survol des types de pigments disponibles sur le marché selon la couleur.

2.5.1 Les pigments bleus

Il existe essentiellement trois types de bleu : le bleu de cobalt, d'outremer et de Prusse. Le bleu de cobalt est un pigment à phase mixte. C'est en remplaçant le magnésium dans un réseau spinelle comme le $MgAl_2O_4$ par des ions de cobalt qu'il est possible

d'obtenir le bleu de cobalt. Selon Bayer (1992), il existe deux compositions chimiques pour le bleu de cobalt soit le CoAl_2O_4 ou le $\text{Co}(\text{AlCr})_2\text{O}_4$.

Le bleu d'outremer (ultramarine blue) est la reproduction synthétique de la pierre semi-précieuse Lapis Lazuli. Il est obtenu chimiquement depuis 1826 par calcination d'un mélange de Kaolin, de soufre, de carbonate de sodium et de charbon à une température plus élevée que 700°C pour ainsi former un complexe de sulfo-silicate de sodium et d'aluminium (ACIA, 2000).

Le bleu de Prusse (Prussian blue) est un composé de sodium ammonium ferro-ferricyanide ($\text{C}_{18}\text{Fe}_7\text{N}_{18}$) qui possède une densité de $1,8 \text{ g/cm}^3$. Il est lui aussi obtenu chimiquement.

2.5.2 Les pigments verts

Il est possible d'obtenir un pigment vert à phase mixte suivant le même principe que pour le bleu de cobalt. Il s'agit de remplacer le magnésium dans un réseau spinelle comme le MgAl_2O_4 par des ions de chrome pour former le vert de cobalt $(\text{CoNiZn})_2(\text{TiAl})\text{O}_4$ (Bayer, 1992). Les pigments d'oxyde de chrome Cr_2O_3 peuvent aussi être utilisés pour la coloration en vert. Ce type de pigment est obtenu par réduction de chromates alcalins en oxyde de chrome et possède une densité de 0,7 kg/l.

2.5.3 Les pigments rouges

C'est en rouge que les enrobés bitumineux sont le plus couramment colorés et selon la revue de la documentation, il s'agit de la première teinte utilisée pour les revêtements routiers. C'est l'oxyde de fer ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) qui permet la coloration. Il s'agit d'un pigment à pouvoir colorant élevé.

2.5.4 Les pigments bruns

Des enrobés bruns peuvent être obtenus à partir de pigments d'oxyde de fer (Fe_2O_3). Ces pigments possèdent une densité d'environ 4,4 kg/l. Des pigments bruns sont aussi obtenus à partir de dioxyde de titane TiO_2 .

2.5.5 Les pigments jaunes

Il est possible de colorer les enrobés en jaune à l'aide de différents types de pigments jaunes comme le jaune rutile de chrome $(\text{TiCrSb})\text{O}_2$, le jaune rutile de nickel $(\text{TiNiSb})\text{O}_2$ et l'oxyde de fer $\alpha\text{-FeOOH}$. Cependant, il ne faut pas dépasser des températures de 180°C avec les pigments jaunes basés sur de l'oxyde de fer puisqu'ils se transforment alors en oxyde de fer (Bayer, 1994).

2.5.6 Les pigments blancs

Le dioxyde de titane est le pigment blanc le plus couramment utilisé dans les enrobés routiers. Il est obtenu soit par un procédé au sulfate ou par un procédé au chlorure. Pour des raisons environnementales le procédé au sulfate est de plus en plus remplacé par le procédé au chlorure. En effet, en 1990, plus de la moitié de la production mondiale de dioxyde de titane utilisait le procédé au chlorure. Le minerai de titane est transformé en tétrachlorure de titane à l'aide de l'acide chlorhydrique à des températures variant entre 900 et 1000°C et en présence de cokes de pétrole. Le produit résultant du chauffage est par la suite épuré et oxydé pour former du dioxyde de titane pur. Le chlore gazeux résultant de la réaction chimique est récupéré et ré-utilisé.

En général, les pigments à phase mixte comme le jaune rutile de nickel et de chrome, le vert et le bleu de cobalt possèdent d'excellentes propriétés chimiques puisqu'ils sont inertes chimiquement. En effet, ils sont insolubles dans l'eau, les acides et les bases, ils résistent à des chaleurs atteignant les 1000°C et ont une grande résistance à la

lumière et aux intempéries (Bayer, 1992). La figure 2.5 montre l'éventail des pigments utilisables avec le liant synthétique de Shell.

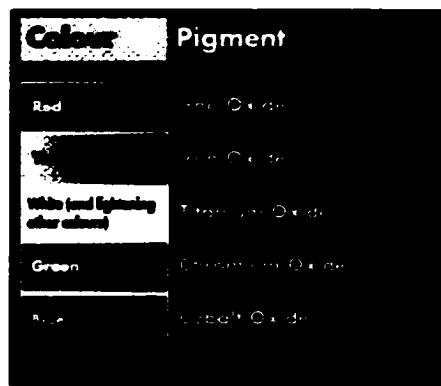


Figure 2.5 Couleur des pigments utilisables avec un bitume synthétique

Source : Shell Bitumen, Product Information Sheet, 2001

CHAPITRE 3

CHOIX DES CONSTITUANTS POUR LA FORMULATION D'ENROBÉS COLORÉS

Les constituants permettant la formulation d'enrobés bitumineux se doivent d'être choisis avec soin. Ceci est encore plus vrai lorsqu'il est question des enrobés colorés puisque le mélange final se doit d'être de la couleur établie.

3.1 Critères de conception

Les critères de conception d'un enrobé bitumineux quel qu'il soit varient en fonction de l'usage auquel il se destine. Les enrobés colorés sont conçus pour être posés dans des zones urbaines à forte circulation de véhicules lourds. Ils doivent donc être résistants à l'orniérage. De plus, une utilisation en zone urbaine requiert que l'enrobé soit plus fermé que pour une autoroute. En effet, les besoins des cyclistes et patineurs nécessitent que le revêtement ne soit pas trop grenu. C'est pourquoi le choix s'est arrêté sur un enrobé de type ESG-10 qui combinait ces deux critères. Un enrobé ESG-10 est un enrobé semi-grenu dont la grosseur maximale du granulat est de 10 mm. En effet, sa texture de surface fermée convient très bien à un usage urbain.

Il est possible de définir trois catégories de critères de conception d'un enrobé. Il s'agit des critères suivants : les critères d'ordre technique, d'ordre sécuritaire et d'ordre économique. Ces critères seront passés en revue dans les sections qui suivent.

Les critères d'ordre technique et de sécurité des enrobés colorés font appel plutôt à la performance du mélange et de ses composantes face aux différentes prescriptions du ministère des Transports du Québec (MTQ). En ce qui concerne les critères d'ordre économiques, il serait difficile de définir des balises permettant d'établir une comparaison juste avec des enrobés de type ESG-10 mais de couleur standard. C'est pourquoi cet aspect sera survolé mais devra faire l'objet d'une étude plus approfondie.

3.2.1 Aspects techniques

Dans le cadre de cette étude, l'usage des enrobés colorés a été fixé à celui d'une couche de roulement pour routes de trafic moyen à élevé. Plus précisément dans les villes (ou municipalités) ou les entrées de villes où il y a passage de véhicules lourds. Deux catégories de critères permettent de cibler les aspects techniques soit les critères de performance lors de la mise en œuvre et les critères de résistance.

Un enrobé bitumineux quel qu'il soit doit être maniable, c'est-à-dire qu'il doit être facilement mis en place. De plus, il doit présenter un tout homogène même une fois compacté.

3.2.2 Aspects sécuritaires

Il y a deux aspects à traiter pour le volet sécurité. Il s'agit de la texture (l'adhérence) et de la couleur. La texture permet de s'assurer que la surface de l'enrobé possède une rugosité suffisante pour assurer une bonne adhérence chaussée/pneu. Pour se faire, un examen visuel doit être effectué. Une planche d'essai devra être réalisée ainsi qu'une étude approfondie sur l'effet qu'a la couleur sur la sécurité des différents usagers de la route.

3.2.3 Aspects économiques

Les aspects économiques concernent les coûts d'entretien et de réparation des enrobés colorés par rapport aux autres matériaux. Il a aussi été question, dans la revue de la littérature, de l'augmentation des coûts due à l'utilisation de pigments ou de liants synthétiques. Toutefois, la présente étude ne tient pas compte de cet aspect. Tel que mentionné précédemment, une étude plus approfondie de la comparaison de l'utilisation d'enrobés bitumineux colorés par rapport à d'autres types de matériaux devra être effectuée ultérieurement.

3.3 Critères de sélection des constituants

La coloration d'un enrobé bitumineux repose sur un choix judicieux de ses constituants. C'est pourquoi une attention particulière a été portée pour cette étape lors du processus de formulation en laboratoire. Les constituants seront donc choisis de façon à respecter les prescriptions de la norme sur les enrobés semi-grenus de type ESG-10.

Lors de la confection d'un EBC, il est important de s'assurer que les matières premières soient appropriées pour l'usage escompté. Il faut apporter une attention toute particulière lors de la confection d'un EBC aux constituants afin d'obtenir la couleur recherchée. Bien que certains composés utilisés pour la formulation contribuent à l'augmentation du coût de l'enrobé, il sera important de s'assurer qu'ils sont utilisés avec prudence tout en ayant un résultat intéressant et significatif.

3.3.1 Choix des GG

Les granulats doivent satisfaire les exigences de la norme 2101 Granulats du MTQ. La catégorie des GG (granulats grossiers) et des GF (granulats fins) est déterminée à l'aide d'essais en laboratoire. Selon la norme 4202 Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées du MTQ, les caractéristiques intrinsèques des GG doivent mener aux catégories « 4, 3, 2 ou 1 » tandis que pour les caractéristiques de fabrication des GG doivent mener à une catégorie « d, c, b ou a ». De plus, selon les recommandations du MTQ, pour un enrobé destiné aux couches de roulement, il faut avoir les classes suivantes : pour une nationale située dans la zone 1, il est recommandé que des GG soient de classe 2b, 3b ou 3c selon le volume de circulation. La figure 3.1 montre le partage en zones du territoire québécois. La zone 1 regroupe des villes telles que Montréal, St-Jérôme et Granby. La zone 2 comprend des villes comme Mont-Laurier et Témiscamingue tandis que la zone 3 regroupe la région au nord de Rouyn Noranda et Chicoutimi.

Les prescriptions des normes 4202 et 2101 du MTQ doivent être respectées. La couleur du granulat étant l'élément clé dans le processus de formulation des enrobés colorés, il est important de choisir des granulats ayant une couleur distincte du gris ou noir utilisé dans les enrobés conventionnels. Il est souhaitable d'utiliser des granulats naturellement colorés. Il est à noter que même si le choix d'un granulat s'arrête sur un type en particulier, il faut s'assurer que celui-ci respecte les normes et essais prescrits par le ministère des Transports du Québec.

3.3.2 Choix des GF

Les GF doivent respecter la norme 4202 ainsi que la norme 2101 du MTQ. Leurs caractéristiques intrinsèques doivent mener aux catégories « 2 ou 1 ». Ce sont des essais en laboratoire qui permettront de déterminer la classe des GF utilisés. Les recommandations du MTQ pour un enrobé destiné aux couches de roulement, requiert pour les GF les classes suivantes : pour une nationale située dans la zone 2, des granulats de la classe 1 ou 2 selon le volume de circulation.

3.3.3 Choix des pigments

En ce qui concerne les pigments utilisés dans les enrobés bitumineux, aucune norme n'a à ce jour défini une politique quant à leur utilisation. Par contre, les fabricants de pigments comme Bayer Inc. possèdent des notices techniques permettant de bénéficier d'un certain savoir-faire en la matière.

3.3.4 Choix du liant

Le liant est une part importante dans la formulation d'un enrobé. Puisqu'il est question d'enrobés bitumineux de couleur, le liant revêt une importance moindre que les granulats dans la coloration finale du mélange sauf lorsqu'il est question de pigmentation. Le choix devra s'effectuer selon les caractéristiques de chaussées comme la circulation et le besoin de résistance particulier à l'orniérage. De plus, les

solicitations climatiques de la chaussée doivent être prises en considération et influenceront le choix du grade de bitume. Il est souhaitable d'utiliser des grades de bitume PG 58-34 ou PG 64-34 selon le volume de circulation pour une construction dans la zone 2 selon les recommandations du MTQ.



Figure 3.1 Zones permettant le choix du type de liant

Source : Ministère des Transports, 2000

CHAPITRE 4

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Le programme expérimental présenté dans ce chapitre permet d'étudier l'influence des différents paramètres de formulation initiale sur les propriétés recherchées, d'ajuster le dosage initial afin de proposer une formulation optimale, puis de vérifier la performance et l'applicabilité de cette formulation optimale. Ceci dans le but de déterminer si le comportement des composants choisis respecte les normes et de permettre de confirmer s'il est possible d'effectuer des enrobés de couleur au Québec.

Dans le programme expérimental, il est prévu d'effectuer les essais selon trois parties distinctes. La première consiste à vérifier si les granulats sélectionnés sont conformes aux normes du ministère des Transports du Québec pour un usage dans un enrobé bitumineux semi-grenu de type ESG-10. La seconde partie consiste à effectuer des essais sur le liant synthétique qui est utilisé pour la formulation de l'enrobé bitumineux vert puisque les caractéristiques du matériau n'ont pas été fournies en même temps que l'échantillon. La troisième partie consiste à effectuer la formulation de quatre types d'enrobés bitumineux ESG-10, de vérifier la couleur obtenue et de s'assurer que les résultats sont en conformité avec les normes. De plus, dans la troisième partie, un essai permettant d'évaluer la couleur de l'enrobé une fois oxydé sera effectué.

4.1 Étapes de réalisation

Bien que le programme expérimental comporte les mêmes essais que pour les enrobés bitumineux standards, le but est d'optimiser les mélanges afin d'obtenir des enrobés d'une couleur offrant une différence appréciable avec les enrobés standards. Les étapes de réalisation sont présentées sur les figures 4.1 à 4.4.

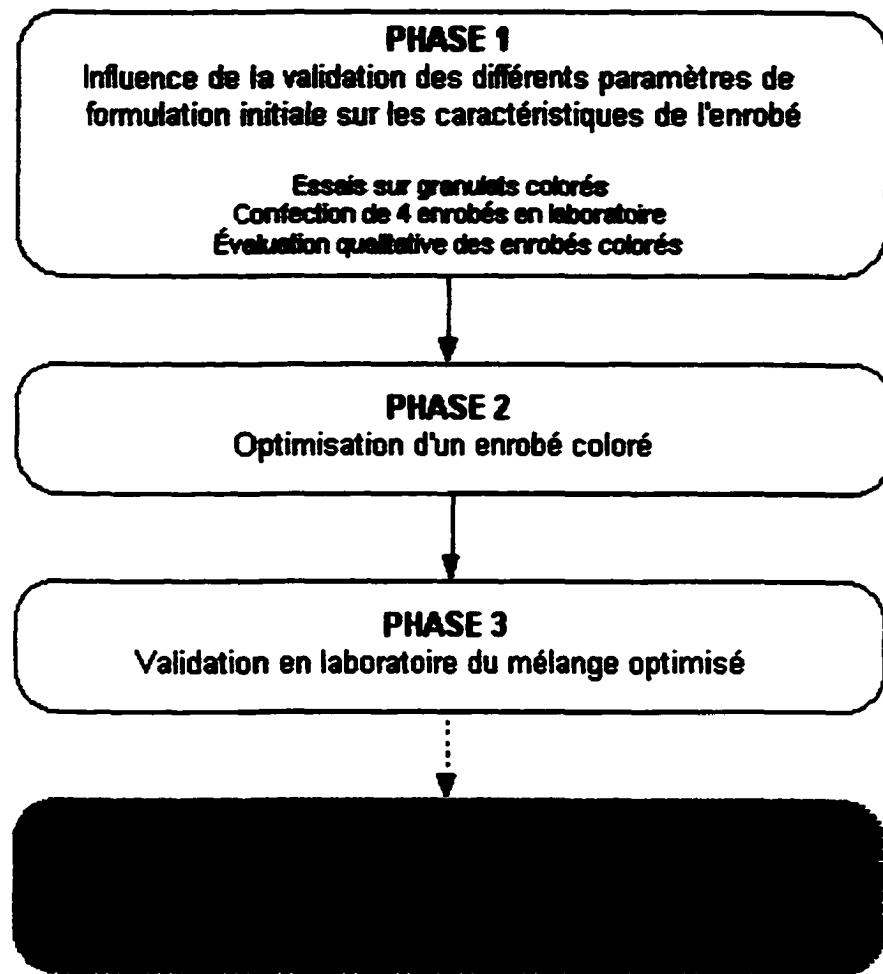


Figure 4.1 Synthèse du programme expérimental

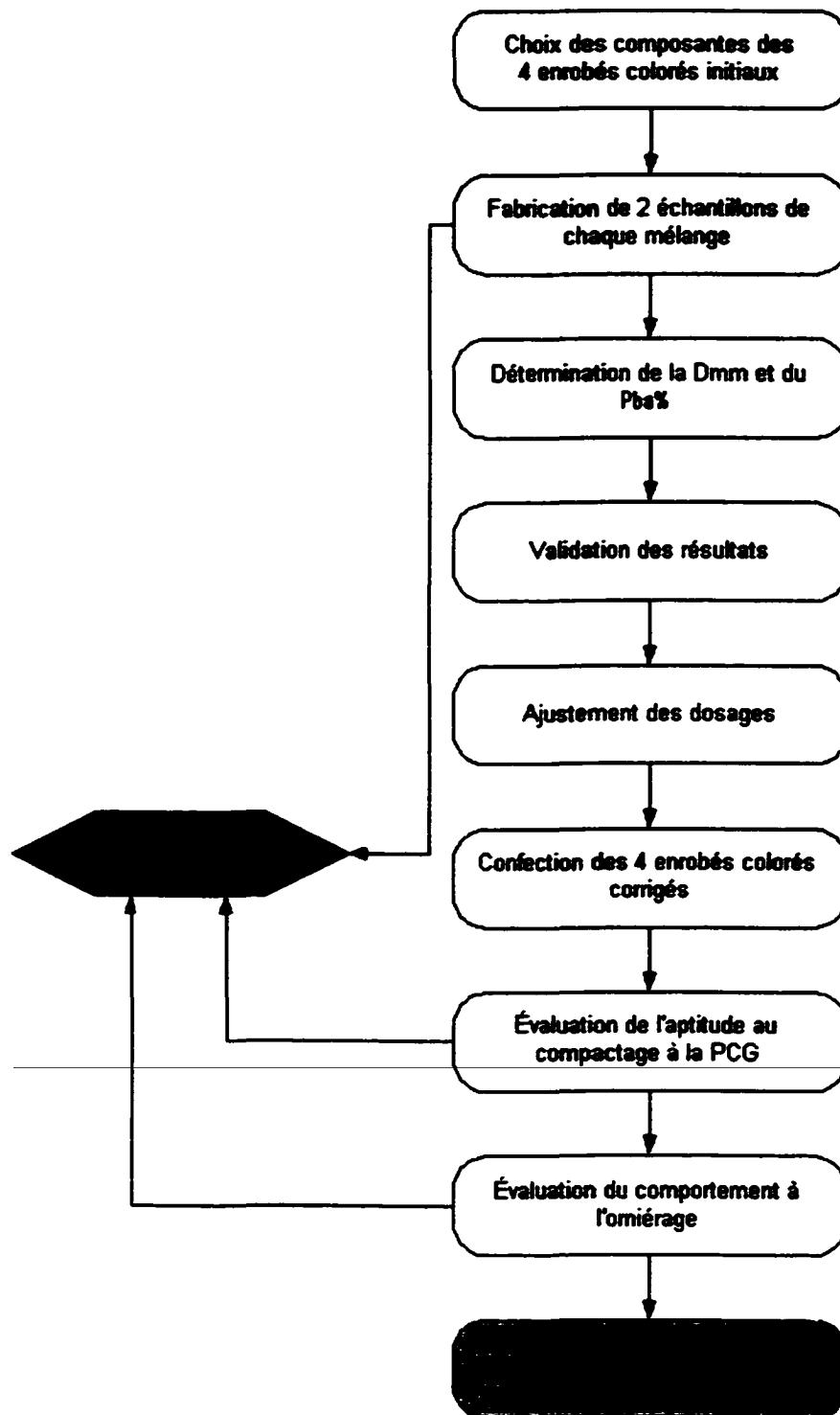


Figure 4.2 Synthèse des étapes de la phase 1 du programme expérimental

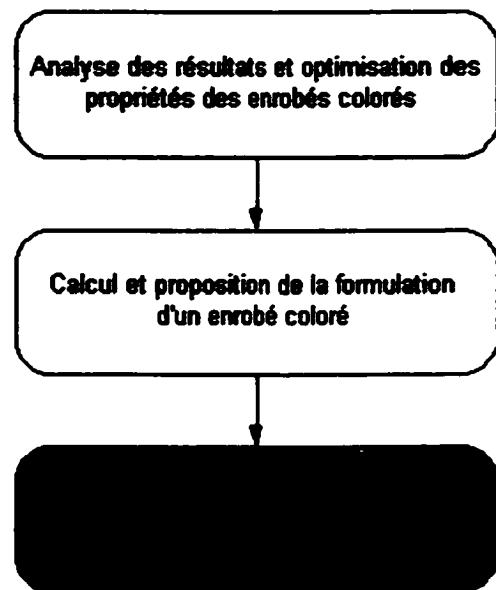


Figure 4.3 Synthèse des étapes de la phase 2 du programme expérimental

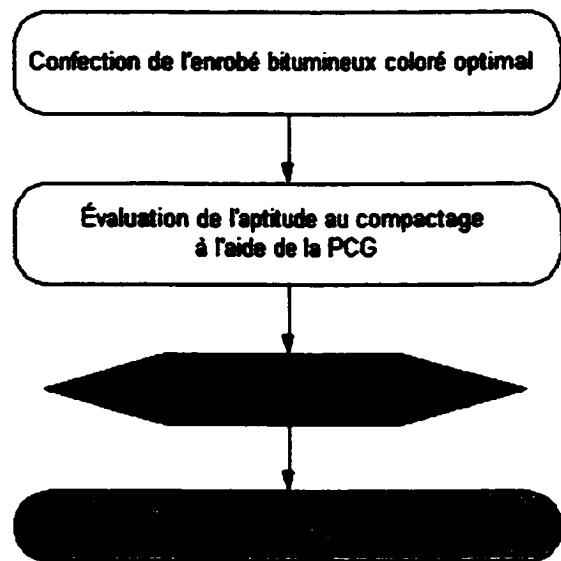


Figure 4.4 Synthèse des étapes lors la phase 3 du programme expérimental

4.2 Paramètres étudiés

Les enrobés bitumineux doivent supporter les charges induites par le trafic, offrir un bon confort de roulement tout en étant sécuritaires. De plus, ils doivent protéger des intempéries et des fluctuations de température les couches de fondation. C'est pourquoi au Québec les enrobés bitumineux sont formulés selon la méthode du Laboratoire des chaussées (méthode LC) du MTQ pour permettre de rencontrer ces exigences. De même, les granulats doivent se soumettre aux exigences des normes du MTQ.

Les qualités de maniabilité, de résistance au désenrobage et à l'arrachement ainsi que la résistance à l'orniérage font partie des paramètres mesurés pour chacun des mélanges de l'étude. Les résultats d'essais sont synthétisés dans le chapitre 5. Le tableau XVII montre les paramètres utilisés pour chacun des mélanges à optimiser.

Il est nécessaire d'établir au préalable un plan d'essais permettant de cibler les paramètres jugés importants pour la formulation d'un EBC ainsi que de déterminer qu'elles seront les limites acceptables pour la variation des paramètres. La revue de la documentation donne un indice des dosages à respecter pour la formulation d'enrobés colorés ainsi que les paramètres qui sont importants à prendre en considération.

Dans un premier temps, une étude a porté sur la détermination des caractéristiques des granulats qui sont utilisés pour la formulation. De cette façon, il est possible de définir s'ils sont propres à l'utilisation prévue.

4.3 Matériaux utilisés

La coloration d'un enrobé bitumineux repose sur un choix judicieux de ses constituants. C'est pourquoi une attention particulière a été portée à cette étape lors du processus de formulation en laboratoire. Le type d'enrobé bitumineux est un enrobé pour couche de surface semi-grenu de type ESG-10 tel que mentionné au point 3.1 du Chapitre 3.

Tableau XVII

Paramètres initiaux de formulation des EBC

		Type d'EBC			
		MEL-1	MEL-2	MEL-3	MEL-4
Couleur visée de l'enrobé		Vert	Rouge	Rouge	Vert
GG (5-10 mm)	Type	Ortho-quartzite	Granite	Granite	Ortho-quartzite
	Dosage (%)	47,22	42,46	40,40	60,03
GF (0-5 mm)	Type	Ortho-quartzite	Ortho-quartzite	Ortho-quartzite	Ortho-quartzite
	Dosage (%)	47,22	51,90	49,38	31,67
Pigment	Type	Aucun	Aucun	Oxyde de fer	Oxyde de chrome
	Dosage (%)	0,00	0,00	4,72	2,84
Liant	Grade	PG 58-28	PG 58-28	PG 58-28	PG 64-L
	Dosage (%)	5,56	5,64	5,50	5,46
Volume de bitume effectif (V_{be} %)		Fixé à 12,2 % pour tous les mélanges			

4.3.1 Granulats

Selon l'inventaire des roches québécoises de Hébert et Hébert (1994), ce sont les granulats verts et roses qui se retrouvent de façon plus abondante au Québec dépendamment de leur usage. De plus, sur 76 carrières de pierre et de minéraux

exploitées au Québec en 2000, 26 exploitaient des matériaux colorés tels le quartzite et le granite (Gaudreau et autres, 2000).

Les granulats utilisés pour l'étude proviennent de Les carrières St-Ferdinand Inc. à Bernierville dans la région du Centre-du-Québec. De plus, selon la norme 4202 du MTQ, un minimum de deux classes granulaires sont exigées pour la fabrication d'un enrobé à chaud.

Tableau XVIII

Caractéristiques des granulats choisis

Propriétés	Granite	Ortho-Quartzite
Couleur	Rose	Gris verdâtre
Granulométrie	Moyenne ou grossière	Grossière
Composition	En majorité de quartz et de feldspaths alcalins. Aussi du plagioclase calco-alcalin, de la biotite, de la muscovite ou hornblende verte, apatite, sphène, zircon et magnétite accessoires.	Essentiellement du quartz avec un peu de mica, feldspath, kaolin, minéraux opaques
Dureté (échelle de Mohs)	5,0 à 6,0	9,0
Classe	Roche ignée, intrusive, plutonique	Roche métamorphique, non schisteuse, massive

Source : Adapté de Hébert et Hébert, 1994

Deux types de pierre concassée sont utilisés pour la fraction grossière (5-10 mm) : le granite de couleur rose et l'ortho-quartzite de couleur verte. La fraction fine (0-5 mm) est composée uniquement de pierre d'ortho-quartzite. La pierre d'ortho-quartzite en fraction 0-5 mm est de couleur blanche, ce qui permet de l'utiliser autant avec le granulat rose qu'avec le vert. Le blanc étant une couleur neutre, il ne viendra pas altérer les couleurs souhaitées (CERTU, 1997). Le tableau XVIII montre les caractéristiques des granulats choisis.

4.3.2 Bitumes

Le type de liant utilisé a une influence moindre que le type de granulats sur la coloration finale de l'EBC puisque le liant est usé par le passage des véhicules et laisse apparaître la couleur naturelle des granulats (Domecq et Sicard, 1995). Le choix du liant est tout de même important. Deux types de liants ont été utilisés lors de l'étude, soit un bitume de grade PG 58-28 standard provenant de Les produits Shell Canada à Montréal et ayant une densité de 1,0079, et un bitume synthétique de couleur claire en film mince de grade PG 64-L provenant de Bitumar Inc. à Montréal et ayant une densité de 1,014.

4.3.3 Pigments

Le choix du colorant utilisé pour les mélanges expérimentaux s'est arrêté sur deux types de pigments minéraux. Des pigments rouges et des pigments verts. Les pigments utilisés pour colorer l'enrobé en rouge sont de l'oxyde de fer synthétique (le Bayferrox 130C) et ceux utilisés pour l'enrobé en vert sont de l'oxyde de chrome synthétique GN. Les deux types de pigments proviennent de la compagnie Bayer Inc. à Montréal. Les pigments rouges, d'appellation chimique $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, sont utilisés sous forme de granulés de masse volumique variable (entre 1,0 et 1,4 kg/l) qui permettent une bonne manipulation et un dégagement de poussière faible. Les pigments verts, d'appellation chimique Cr_2O_3 , sont utilisés sous forme de poudre de masse volumique

de 0,7 kg/l, ce qui nécessitera une prudence d'utilisation additionnelle quant au dégagement de poussière.

Tel que mentionné dans la revue de la documentation, la coloration du bitume standard nécessite une grande quantité de pigments d'oxyde de chrome (plus de 4%) tout en n'atteignant pas un degré de coloration satisfaisant. C'est pourquoi dans cette étude, un bitume synthétique est utilisé afin de diminuer la quantité de pigments utilisés. Les fiches techniques des pigments utilisés se retrouvent à l'annexe 1. Le tableau XIX montre un résumé des caractéristiques des différents pigments choisis.

4.4 Formulations réalisées

À partir des propriétés des matériaux obtenues, soit par le fabricant ou par les résultats aux essais de laboratoire, quatre formulations sont prévues. Il s'agit dans tous les cas d'enrobés bitumineux de type ESG-10 pour un usage en couche de surface.

Le premier mélange (MEL-1) est composé de bitume standard noir et de GF et GG de type ortho-quartzite. Le second mélange (MEL-2) est composé de bitume standard noir, de GF de type ortho-quartzite et de GG de type granite. La coloration des enrobés MEL-1 et MEL-2 réside dans l'utilisation de granulats naturellement colorés. Ce sont les granulats qui donneront la coloration finale de ces enrobés une fois le film de bitume usé. Le troisième mélange (MEL-3) est composé de bitume standard noir, de pigments d'oxyde de fer, de GF d'ortho-quartzite et de GG de granite. En ce qui concerne ce mélange, la coloration de l'enrobé sera, d'une part, due à la couleur naturelle des granulats et, d'autre part, due au mélange coloré à l'aide des pigments d'oxyde de fer. Le dernier mélange (MEL-4) est composé de liant synthétique, de pigments d'oxyde de chrome et de GF et GG d'ortho-quartzite. La coloration du MEL-4 provient du liant synthétique qui permet dès le malaxage de voir la couleur naturelle des granulats. De plus, l'usage de pigments d'oxyde de chrome permet une coloration verte plus franche de cet enrobé.

Le plan d'expérimentation utilisé pour cette étude est simple, permettant une évaluation visuelle des résultats. En effet, les deux mélanges utilisant le liant noir sans pigments permettront de différencier les mélanges avec pigments minéraux. Il est à noter que puisque le GF de type ortho-quartzite est blanchâtre, il sera utilisé dans les mélanges utilisant des granulats de couleur verte autant que ceux de couleur rose.

Tableau XIX

Caractéristiques des pigments choisis

Type	Oxyde de chrome GN	Oxyde de fer Bayferrox 130C
Couleur du pigment	Vert	Rouge
Désignation chimique	Cr_2O_3	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Pouvoir colorant relatif (%)	Min. : 95 Max. : 105	Min. : 95 Max. : 105
Densité (g/ml)	5,2	5,0
Absorption en eau (%)	n/d	25

4.5 Essais en laboratoire

Plusieurs essais de laboratoire sont prévus que ce soit pour les GG, les GF ou le bitume. Le chapitre 5 présente les résultats des essais tandis que les prochaines sections font la description de chacun de ces essais. Les échantillons de granulats utilisés pour les divers essais en laboratoire sont préalablement échantillonnés et réduits selon les normes LC 21-010 et LC 21-015.

4.5.1 Essais sur GG

Les essais sur GG permettront de déterminer leurs caractéristiques intrinsèques et de fabrication. Ceci dans le but de classer les granulats selon les prescriptions de la norme 4202 du ministère des Transports du Québec. De plus, il sera possible de déterminer si les granulats peuvent être utilisés pour un enrobé semi-grenu ESG-10 pour couche de roulement.

4.5.1.1 Analyse granulométrique par tamisage

La granulométrie est l'essai le plus important concernant les granulats. C'est à l'aide de la granulométrie qu'il sera possible de déterminer quelles combinaisons granulaires sont requises afin de respecter les normes et l'usage auxquels la chaussée est destinée. Il s'agit de mettre une certaine masse de granulats dans un tamiseur de type Gilson afin de séparer en différentes fractions l'échantillon prélevé. Les manipulations doivent se faire selon les prescriptions de la norme LC 21-040.

4.5.1.2 Détermination de la densité et de l'absorptivité du GG

L'essai (LC 21-067) permet de déterminer les densités brutes et apparentes ainsi que le pourcentage d'absorption à l'eau d'un granulat spécifique. L'absorption en eau du granulat permettra d'estimer la teneur initiale en bitume absorbée par les granulats. En effet, la teneur en bitume initiale est estimée à la moitié de l'absorption en eau des granulats. Il s'agit de prélever un échantillon de masse connue et de le peser à l'état sec, à l'état saturé superficiellement sec et plongé dans l'eau pour pouvoir effectuer les différents calculs de densité.

Les granulats sont lavés à l'aide du tamis de 2,5 mm afin d'enlever toute saleté et impureté. Les deux échantillons ont été immersés dans l'eau pour une durée de 24 heures selon les prescriptions de la norme LC 21-067. La norme prescrivant une période de 24 heures \pm 4 heures.

4.5.1.3 Détermination du coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil micro-Deval

L'essai (norme LC 21-070) permet d'évaluer la dégradation du matériau et son aptitude à produire des particules fines lors de la fabrication, du transport, de l'entreposage et de la mise en œuvre. C'est un essai d'usure par attrition qui consiste à mettre dans des jarres cylindriques remplies d'eau une prise d'essai de masse connue et une certaine quantité de billes d'acier de dureté définie. La jarre est placée dans un système rotatif pendant 15 minutes.

La prise d'essais consiste à séparer, laver et sécher à l'étuve les granulats requis. Initialement, 500,2 g sont mis dans la jarre numéro 1 et 500,4 g sont mis dans la jarre numéro 2. Les granulats trempent dans 250 ml d'eau, dans leur jarre respective, durant environ 22 heures.

4.5.1.4 Détermination du pourcentage de particules plates et de particules allongées

Pour qu'un enrobé bitumineux soit résistant à l'omiérage et tout de même maniable, il est nécessaire d'utiliser des granulats anguleux ne comportant pas trop de particules plates et allongées. En effet, les particules plates et allongées ont tendance à se fracturer sous impact.

L'essai (norme LC 21-265) consiste à déterminer la proportion de particules plates et allongées contenues dans les GG d'un échantillon de masse connue de granulats. Une mesure précise des dimensions de chaque particule de l'échantillon est prise en note afin de déterminer les proportions de particules plates et allongées contenues dans l'ensemble des granulats utilisés. La norme LC 21-265 prévoit l'utilisation de gabarits ayant des ouvertures de taille normalisée permettant la mesure des dimensions des particules rapidement. Le laboratoire n'étant pas équipé de ces gabarits, les dimensions de chacune des particules a été effectuée à l'aide d'un vernier.

4.5.1.5 Détermination des particules fines du tamisat de 80 µm

Cet essai (norme CSA-A23.2-5A) permet de déterminer le pourcentage de particules passant le tamis de 80 µm dans le GG.

4.5.1.6 Particules concassées

Tout comme pour les particules plates et allongées, il est nécessaire pour la stabilité d'un enrobé bitumineux que les particules des granulats sélectionnés soient concassées. L'essai (norme LC 21-100) consiste à déterminer le pourcentage, en poids, de particules ayant au moins une face fracturée dans un matériau granulaire de masse connue après concassage.

4.5.1.7 Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles

Puisque les enrobés bitumineux sont soumis à des charges induites par le trafic, que les granulats ne sont pas manipulés avec soin et qu'ils sont soumis à des efforts lors du compactage, il est nécessaire d'utiliser des granulats qui résisteront à la fragmentation.

L'essai Los Angeles (norme LC 21-400) permet de déterminer cette caractéristique des granulats. Un échantillon de masse connue est placé dans un broyeur à boulets qui est par la suite mis en rotation. Lors de la rotation du broyeur, les boulets sont soulevés et retombent sur les granulats en leur induisant des chocs sévères. Il s'agit de déterminer quel pourcentage de granulats passent le tamis de 1,70 mm en notant la masse d'un échantillon avant et après l'essai. Le broyeur doit effectuer 500 tours à raison de 30 à 33 tours/minute.

4.5.1.8 Adhésivité passive des liants anhydres en présence d'eau

Le désenrobage est un phénomène à éviter pour des questions de sécurité et de durabilité du revêtement. L'essai français XP T66-043 :1998 (voir Annexe 2) permet

d'évaluer l'adhésivité qui existe entre liant et granulats. Il s'agit d'immerger dans l'eau durant 16 heures des granulats préalablement enrobés d'un liant anhydre et de vérifier, par la suite, le pourcentage de surface granulaire recouverte d'un film de liant.

Trois essais sont effectués pour mesurer l'adhésivité des liants sur les granulats. Le premier comporte 100 g de granulats d'ortho-quartzite et 5 g de bitume de grade PG 58-28, le deuxième comporte 100 g de granulats de granite et 5 g de bitume de grade PG 58-28 et le dernier comporte 100 g de granulats d'ortho-quartzite et 5 g de bitume synthétique de grade PG 64-L.

4.5.2 Essais sur GF

Les essais sur GF permettront de déterminer leurs caractéristiques intrinsèques et de fabrication. Ceci dans le but de les classer et de s'assurer, comme pour les GG, qu'ils rencontrent les exigences de la norme 4202 du MTQ.

4.5.2.1 Analyse granulométrique des sols inorganiques

Cet essai (norme NQ 2501-025) permet de déterminer la granulométrie des particules inférieures à 80 µm d'un échantillon de granulat. Il s'agit de mettre une masse connue de granulats passant le tamis de 80 µm dans une solution dispersante et de déterminer par sédimetrométrie leur granulométrie.

4.5.2.2 Détermination de la densité et de l'absorptivité du GF

Cet essai (norme LC 21-065) consiste à déterminer quelles sont les densités brutes et apparentes ainsi que le pourcentage d'absorption d'un GF spécifique. L'absorption en eau des GF possède la même importance que celle des GG pour la détermination de la teneur en bitume absorbée lors de la formulation d'enrobés bitumineux.

4.5.2.3 Détermination du coefficient d'écoulement des GF

Cet essai (norme LC 21-075) consiste à déterminer le coefficient d'écoulement des GF. La mesure de l'écoulement donne un indice de l'angularité du matériau à l'étude. L'angularité des granulats employés est importante lorsque l'on désire obtenir des enrobés bitumineux stables et résistants.

Deux échantillons sont préparés selon les exigences de la norme LC 21-075. L'échantillon 1 a une masse de 1113,4 g et l'échantillon 2 possède une masse de 933,6 g une fois lavé et séché à l'étuve.

4.5.2.4 Détermination du coefficient de friabilité des GF

Cet essai (norme LC 21-080) consiste à déterminer la résistance à l'écrasement des GF. Une charge abrasive fixée selon la norme, une masse de granulats connue et de l'eau sont introduits dans une jarre et mis en mouvement rotatif pour une période de 15 minutes à un taux de 100 tours par minute \pm 5 tours par minute.

Il s'agit de déterminer la différence entre la masse initiale et la masse finale d'un échantillon retenue sur un tamis de 80 μm . Une charge abrasive de 2502,1 g, une masse connue de granulats et d'eau sont introduits dans une jarre et mis en mouvement rotatif pour une période de 15 minutes à un taux de 100 tours par minute \pm 5 tours par minute.

4.5.2.5 Détermination du coefficient d'usure par attrition du GF à l'aide de l'appareil micro-Deval

Cet essai (norme LC 21-101) consiste à provoquer, dans un broyeur contenant des granulats de grosseur et de masse déterminée, une attrition en milieu humide par des frottements des granulats entre eux sous une charge abrasive constituée de billes d'acier. Il permet de déterminer la masse perdue à la suite de l'attrition.

Deux jarres sont utilisées pour l'essai. Les granulats ont préalablement subi la préparation requise avant l'essai comme stipulé dans la norme LC 21-101. La charge utilisée est composée de billes d'acier de 9,0 mm \pm 0,5 mm de diamètre pour une charge totale de 1250,9 g.

4.5.3 Essais sur bitume

Les propriétés du bitume de grade PG 58-28 sont connues (voir annexe 3). En ce qui concerne le bitume synthétique, aucune information n'a été fournie avec l'échantillon. C'est pourquoi il est important de procéder à certains essais en laboratoire permettant de déterminer les caractéristiques du matériau requises pour la formulation d'enrobé bitumineux.

Dans la documentation scientifique, il est noté que les bitumes synthétiques possèdent le même principe d'équivalence temps/température que les bitumes standards. C'est pourquoi il est possible d'effectuer les mêmes essais que sur les bitumes standards avec des résultats significatifs. Pour la formulation de l'enrobé, les informations requises sur le bitume sont la température haute et basse de caractérisation ainsi que la densité.

4.5.3.1 Viscosité Brookfield

L'essai (norme AASHTO TP48-97) permet de déterminer la fluidité du bitume étudié à une température donnée à l'aide d'un viscosimètre de type Brookfield. La température de malaxage doit être ajustée de façon à ce que la viscosité du bitume permette un enrobage adéquat des granulats tout en évitant de trop le chauffer.

Selon le MTQ, c'est une viscosité de 0,17 Pa.s \pm 0,02 Pa.s qui permet de satisfaire ces conditions. En ce qui concerne la température de compactage, le principe est le même que pour le malaxage mais cette fois la viscosité est de 0,28 Pa.s \pm 0,03 Pa.s.

4.5.3.2 Dynamic Shear Rheometer

L'essai (norme AASHTO TP5-98) permet de déterminer la température élevée de caractérisation (T_e). Cette température est obtenue à l'aide de l'appareil DSR qui permet de vérifier qu'à la température T_e , le paramètre $G^*/\sin\delta$ est supérieur ou égal à 1 kPa. Des essais sont réalisés à des températures différentes permettant d'obtenir une valeur de $G^*/\sin\delta$ supérieure et de $G^*/\sin\delta$ inférieure à 1 kPa.

L'intervalle pour la température est défini par le MTQ par une limite inférieure égale à H et une limite supérieure égale à $H + 5,9$. Le tableau XX montre les valeurs qu'il est possible d'utiliser pour la température élevée de caractérisation selon la définition du MTQ. Donc, pour une plage de températures obtenues par le biais de l'essai DSR variant entre 46°C et 76°C, les valeurs de H utilisées varieront entre 46°C et 70°C.

Tableau XX

Température limite H selon la température élevée de caractérisation T_e

Si le T_e se retrouve entre	Alors le H sera de
$46 \leq T_e < 52$	46
$52 \leq T_e < 58$	52
$58 \leq T_e < 64$	58
$64 \leq T_e < 70$	64
$70 \leq T_e < 76$	70

Source: MTQ, 2001.

4.5.3.3 Essai de densité

L'essai (ASTM D70-82) permet de déterminer la densité d'un bitume par la méthode volumétrique. La densité du bitume entre dans les premières étapes de la formulation d'un enrobé bitumineux, c'est pourquoi il est important d'obtenir sa valeur.

4.5.4 Essais sur enrobés bitumineux

Outre les essais requis pour la formulation des enrobés bitumineux, permettant de mesurer les caractéristiques des enrobés et de s'assurer de leur conformité aux normes établies par le MTQ, une caractéristique spéciale pour les enrobés colorés devra être mesurée. Il s'agit du degré d'oxydation et du changement de couleur que subit un enrobé bitumineux. Il est à noter que la densité brute ainsi que la masse volumique des enrobés confectionnés s'effectuent selon la norme LC 26-040.

4.5.4.1 Résistance à l'oxydation

Afin de déterminer la couleur des enrobés confectionnés après avoir subi de l'oxydation, un essai-maison doit être effectué. Il s'agit de soumettre une tranche d'enrobé à une température constante de 60°C dans une étuve ventilée pendant 24 heures. Une tranche du même enrobé est conservée à température ambiante afin de servir de couleur-témoin. La différence entre les deux tranches déterminera si la tenue de la couleur est stable à l'oxydation.

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Le programme expérimental a permis d'établir quels étaient les paramètres étudiés et les différents essais employés afin de caractériser les matériaux choisis. Le présent chapitre montre la synthèse des résultats obtenus aux différents essais prévus au programme expérimental.

La structure du présent chapitre comporte quatre sections : les résultats d'essais sur granulats, sur bitumes, de formulation ainsi que de résistance à l'oxydation sur enrobés préparés en laboratoire.

5.1 Résultats des essais sur les granulats

Selon la norme 4202 du MTQ, il est obligatoire d'utiliser au minimum 2 classes granulaires différentes pour un ESG-10. Puisque deux matériaux différents ont été utilisés, les résultats seront divisés en essais sur GG et essais sur GF. De plus, les essais se réfèrent à la norme 2101 du MTQ.

5.1.1 Essais sur GG

Tel que mentionné au chapitre précédent, la norme 2101 du MTQ permet de fixer les exigences quant à la granulométrie des matériaux employés pour des usages dans le domaine du génie civil. De plus, la norme 4202 émet des contraintes quant aux caractéristiques intrinsèques et de fabrication des GG pour enrobés à chaud.

5.1.1.1 Analyse granulométrique par tamisage

Pour la confection des enrobés à chaud, les granularités individuelles doivent respecter les classes granulaires définies à la norme 2101 « Granulats » et être conformes aux exigences énumérées dans la norme 4202. Une analyse granulométrique par

tamisage, conformément aux exigences de la norme LC 21-040, a d'abord été réalisée à l'aide de l'appareil Gilson. La figure 5.1 montre l'échantillon de granulats d'ortho-quartzite après l'essai tamisage. Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés au tableau XXI. Il est à noter que la zone de restriction du tableau XXI ne s'applique qu'à la granulométrie combinée.

Tableau XXI

Résultats de l'analyse granulométrique des trois types de granulats

Tamis	% Passant		
	* Zone de restriction recommandée pour le combiné (Il faut se trouver à l'extérieur de ces limites)		
	Classe granulaire 0-5 mm (ortho-quartzite)	Classe granulaire 5-10 mm (ortho-quartzite)	Classe granulaire 5-10 mm (granite)
14 mm	100	100	100
10 mm	100	88	100
5 mm	95	25	21
2,5 mm *	74	5	1
1,25 mm *	54	4	1
615 µm *	37	4	1
315 µm *	22	4	1
160 µm	14	4	0,4
80 µm	8,2	3,2	0,3



Figure 5.1 Analyse granulométrique de l'échantillon d'ortho-quartzite

5.1.1.2 Détermination de la densité et de l'absorptivité du GG

Les manipulations (le lavage, séchage et les pesées) sont effectuées conformément à la norme LC 21-067. La figure 5.2 montre les granulats étendus sur une serviette afin de les emmener à l'état saturé superficiellement sec (SSS).



Figure 5.2 Séchage à la serviette des granulats pour obtenir l'état SSS

La figure 5.3 montre les granulats submergés dans l'eau dans le but de mesurer leur masse sous l'effet de la poussée d'Archimède. La température de l'eau du bassin est de 23°C.



Figure 5.3 Granulats dans le bassin d'eau soumis à la poussée d'Archimède

Le tableau XXII montre la synthèse des résultats obtenus ainsi que les écarts rencontrés entre deux essais effectués sur un même échantillon.

Tableau XXII

Résultats et indices de fidélité concernant le GG

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
2,63	2,61	2,58	2,57	
0,017			0,004	
2,65	2,64	2,60	2,60	
0,018			0,004	
2,70	2,67	2,63	2,63	
0,021			0,001	
0,91	0,87	0,82	0,87	
0,040			0,05	

5.1.1.3 Détermination du coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil micro-Deval

L'essai est réalisé selon les directives de la norme LC 21-070. Les résultats concernant les deux types de granulats se retrouvent dans le tableau XXIII. La figure 5.4 montre l'appareil et les jarres.

Tableau XXIII

Résultats de l'essai micro-Deval sur les granulats

	500,2	500,4	500,0
	425,9	428,1	422,0
	14,9	14,4	15,6
	0,4		1,0



Figure 5.4 Appareil micro-Deval durant l'essai de friabilité

5.1.1.4 Détermination du pourcentage de particules plates et de particules allongées

Selon la note 2 de la norme 4201 du MTQ, les exigences concernant l'essai sur les particules plates et allongées ne sont pas requises lorsque le GG est inclus dans la classe 1 ou 2 en ce qui concerne les caractéristiques intrinsèques. Or, la catégorie du GG de type ortho-quartzite utilisé pour les essais est de catégorie 2. C'est pourquoi il n'est pas requis de faire l'essai pour le granulat de ce type. Le tableau XXIV montre la synthèse des résultats de l'essai pour un échantillon de 101 particules.

Tableau XXIV

Résultats obtenus à l'essai sur particules plates et allongées du granite

	Particules plates	Particules allongées	Particules plates et allongées
Nombre	26	26	0
Proportion (%)	25,7	25,7	0,0

5.1.1.5 Détermination des particules fines du tamisat de 80 µm

Selon la norme LC 21-350, puisque la grosseur nominale des granulats à analyser est de 10 mm, l'essai doit se faire sur un échantillon représentatif de 1 kg. La prise d'échantillons secs ainsi que la pesée initiale sont effectuées selon les prescriptions de la norme. Les échantillons lavés sont mis à l'étuve à une température de 230°F (110°C). Le tableau XXV montre la synthèse des résultats obtenus ainsi que la différence obtenue entre deux essais sur le même type de granulat. La figure 5.5 quant à elle montre la procédure de lavage des granulats.

Tableau XXV

Résultats à l'essai sur particules fines de la norme CSA

	1000,3	1001,8
	999,1	1000,7
% des particules passant le tamis de 80 µm	0,12	0,11



Figure 5.5 Procédure de lavage au tamis de 80 µm

5.1.1.6 Particules concassées

Puisque la grosseur nominale du granulat à l'essai est de 10 mm ou moins, la masse initiale requise pour la prise d'essai est de 200 g. La figure 5.6 montre un échantillon de granulats utilisés pour l'essai. Le tableau XXVI permet de faire la synthèse des résultats obtenus. Les manipulations ont été effectuées selon les prescriptions de la norme LC 21-100.



Figure 5.6 Échantillon pour l'essai de particules concassées

Tableau XXVI

Synthèse des résultats concernant les particules fracturées

200,0	200,4	200,0	200,0	
100	100	100	100	

5.1.1.7 Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles

La figure 5.7 montre l'appareil Los Angeles et le dispositif permettant d'ajuster le nombre de tours à 500. Les granulats utilisés pour l'essai sont préparés selon la norme LC 21-400. Le tableau XXVII fait la synthèse des résultats obtenus pour l'essai.



Figure 5.7 Appareil Los Angeles

Tableau XXVII

Synthèse des résultats de l'essai Los Angeles

		5000,6	5000,6	5003,0	5004,0
		3459,0	3482,4	2549,0	2553,0
		3350,7	3350,7	3351,0	3351,0
		30,83	30,36	49,05	48,98
		0,47		0,07	

5.1.1.8 Essai d'adhésivité passive des liants anhydres en présence d'eau

Les procédures ont été réalisées conformément aux prescriptions de la norme (voir norme XP T66-043 : 1998 en annexe). Par contre, une assiette en aluminium a été utilisée comme couvercle au lieu d'une plaque de verre. La figure 5.8 montre les

échantillons après la trempage de 16 heures \pm 30 minutes à l'étuve à 60°C tandis que le tableau XXIII fait la synthèse des résultats des trois essais.



Figure 5.8 Échantillons après l'essai d'adhésivité

Tableau XXVIIio

Synthèse des résultats d'adhésivité liants/granulats

Matériau utilisé	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Type de granulat	Granite	Ortho-quartzite	Ortho-quartzite
Type de liant	PG 58-28	PG 58-28	PG 64-L
Résultat (%)	95	75	75

5.1.2 Essais sur GF

Puisque le GF de type ortho-quartzite est plutôt de couleur blanchâtre, c'est celui là qui est utilisé pour toutes les formulations. Il est utilisé en combinaison avec le GG de type granite autant qu'avec celui de type ortho-quartzite.

5.1.2.1 Analyse granulométrique des sols inorganiques

L'essai s'effectue uniquement avec les particules retenues sur le tamis de 1,70 mm. Un échantillon de 200 g est utilisé pour procéder à l'essai. La figure 5.9 montre la synthèse des résultats obtenus.

5.1.2.2 Détermination de la densité et de l'absorptivité du GF

Puisque l'échantillon de roche ortho-quartzite utilisé comporte 46 % et 63 % de particules retenues sur les tamis de 1,25 et de 2,50 mm respectivement, la fraction passant le tamis de 5 mm a été séparée en deux parties. La première, comportant les particules retenues au tamis de 2,5 mm, a été effectuée par le séchage à la serviette comme pour le GG (norme LC 21-067). La deuxième, comportant les particules passant le tamis de 2,5 mm est rendue à l'état SSS par la méthode du cône telle que décrite dans la norme NQ 2560-065. La figure 5.10 montre le montage pour la densité du granulat passant le tamis de 2,5 mm tandis que le tableau XXIX montre la synthèse des résultats obtenus.

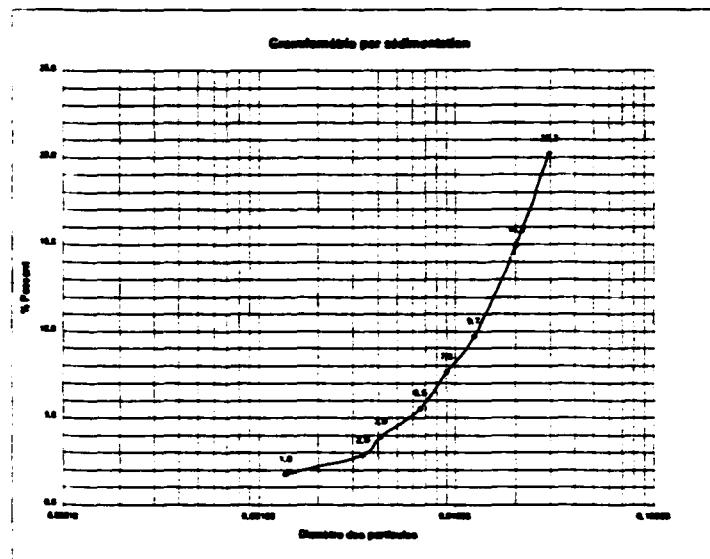


Figure 5.9 Analyse granulométrique par sédimentation



Figure 5.10 Matériel pour l'essai d'absorptivité sur GF
Tableau XXIX

**Synthèse des résultats d'absorptivité et densité des GF
de type ortho-quartzite**

Valeurs de densité	
Densité brute	2,59
Densité brute (sss)	2,62
Densité apparente	2,69
% d'absorption	6,40

5.1.2.3 Détermination du coefficient d'écoulement des GF

La figure 5.11 montre le montage utilisé ainsi que les manipulations pour l'essai d'écoulement du GF. Les essais chronométrés donnent les résultats inscrits dans le tableau XXX.

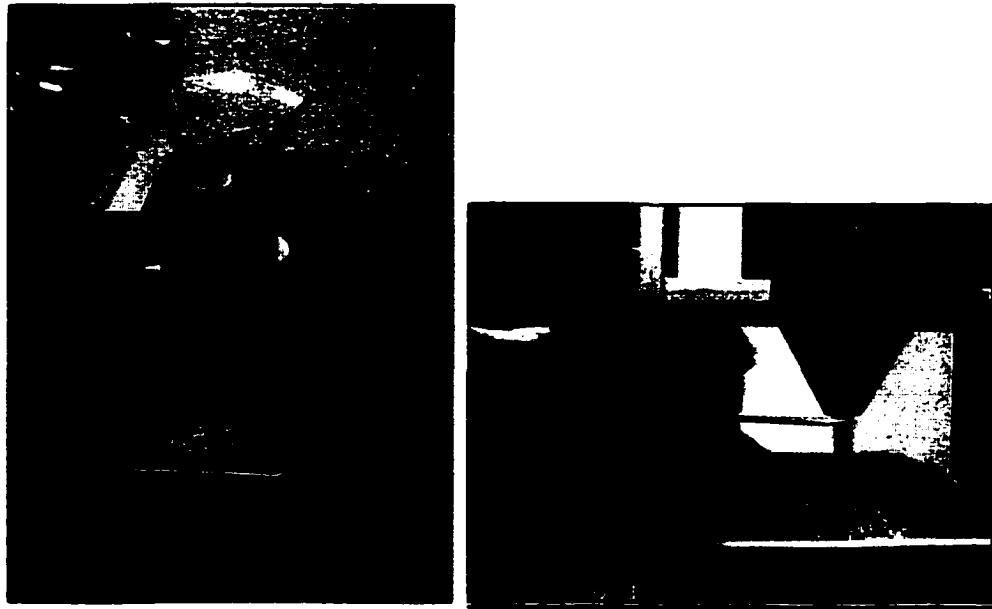


Figure 5.11 Montage pour l'essai d'écoulement

Tableau XXX

Résultats de l'essai d'écoulement des GF

	Essai 1	Essai 2
Coefficient d'écoulement	103	85
Δ coefficient d'écoulement		8

5.1.2.4 Détermination du coefficient de friabilité des GF

La figure 5.12 montre la masse de la charge abrasive utilisée pour l'essai. Le tableau XXXI montre la synthèse des résultats d'essai. Il est à noter que le coefficient de friabilité doit être arrondi à l'entier le plus près.



Figure 5.12 Charge abrasive pour l'essai de friabilité des GF

5.1.2.5 Détermination du coefficient d'usure par attrition du GF à l'aide de l'appareil micro-Deval

La figure 5.13 montre l'appareil micro-Deval et le chronomètre permettant d'effectuer l'essai durant 15 minutes. Le tableau XXXII montre les résultats obtenus à la suite de l'essai.

Tableau XXXI

Synthèse des résultats d'essai de friabilité des GF

	Essai 1	Essai 2
Coefficient de friabilité	38	35
Δ coefficient de friabilité	3	



Figure 5.13 Appareil micro-Deval et chronomètre ajusté à 15 minutes

Tableau XXXII

Synthèse des résultats obtenus à l'essai d'usure par attrition

	Essai 1	Essai 2
Coefficient d'usure par attrition (%)	22,16	18,34
Δ coefficient d'usure		3,82

5.1.3 Synthèse des résultats des essais sur granulats

Le tableau XXXIII présente la synthèse des résultats obtenus aux différents essais de laboratoire sur GF et GG.

Tableau XXXIII

Synthèse des caractéristiques des granulats étudiés

Propriété	Nom	5-10 mm Granite	5-10 mm Ortho.	0-5 mm Ortho.
Densité relative brute (D_{br})	LC 21-065 LC 21-067	2,580	2,630	2,590
Absorption en eau (%)	LC 21-065 LC 21-067	0,81	0,89	6,40
Adhérence (mangranulat) (%)	XP T 66-043	90	75	n/a
Friabilité (%)	LC 21-080	n/a	n/a	37
Fragmentation (%)	LC 21-100	100	100	n/a
Particules plates (%)	LC 21-265	25,74	n/a	n/a
Particules allongées (%)	LC 21-265	25,74	n/a	n/a
Coefficient d'écoulement (C_e)	LC 21-075	n/a	n/a	94
Résistance à la fragmentation Los Angeles (%)	LC 21-400	49,02	30,60	n/a
Résistance à l'usure micro-Deval (%)	LC 21-070 LC 21-101	16,10	14,65	20,25
Granulométrie (tamisats %)	14,0 mm	100	100	100
	10,0 mm	100	88	100
	5,0 mm	21	25	95
	2,5 mm	1	5	74
	1,25 mm	1	4	54
	630 µm	1	4	37
	315 µm	1	4	22
	160 µm	0,4	4	14
	80 µm	0,3	3,2	8,2
	LC 21-040			

5.2 Essais sur le bitume

La norme 4101 du MTQ permet de déterminer à l'aide d'essais en laboratoire les caractéristiques et critères d'évaluation des bitumes standards utilisés pour les enrobés bitumineux. Toutefois, en ce qui concerne le bitume synthétique utilisé pour la formulation de l'enrobé de couleur verte, aucune norme québécoise n'est directement applicable. Dans la littérature, le bitume synthétique possède le même principe d'équivalence temps/température que les bitumes standards (AIPCR, 1999). En effet, le comportement du bitume à haute température pendant une courte période de temps équivaut à une température plus basse mais pour une plus longue durée, ce qui lui associe un comportement viscoélastique linéaire (MTQ, 2001). Il est donc possible d'effectuer les mêmes essais sur le bitume synthétique que sur le bitume standard puisqu'ils possèdent tous deux le même comportement.

Les essais suivants sont réalisés sur le liant synthétique afin d'obtenir les informations requises pour la formulation du mélange MEL-4. Il s'agit de la viscosité Brookfield (figure 5.14), de l'essai au rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) et de la densité du bitume.



Figure 5.14 Viscosimètre Brookfield

5.2.1 Viscosité Brookfield

Trois échantillons du même liant sont utilisés pour procéder à l'essai. La figure 5.14 montre l'appareil de viscosité Brookfield tandis que le tableau XXXIV montre la synthèse des résultats de l'essai.

Tableau XXXIV

Synthèse des résultats des essais de viscosité Brookfield

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Moyenne
Temp. °C	135	165	135	165	135	165	n/a
Viscosité moyenne (Pa.s)	1,263	0,5	1,245	0,485	1,226	0,478	n/a
Temp. malaxage °C	210		208		207		208
Temp. compactage °C	165		165		165		165

5.2.2 Dynamic Shear Rheometer

Le résultat de l'essai donne une température de 66°C, ce qui permet de déterminer le grade du liant utilisé à PG 64-L selon les recommandations du MTQ. L'échantillon de liant synthétique disponible étant limité, l'essai permettant de déterminer la température basse de caractérisation n'a pas été effectué dans le cadre de la présente étude. La figure 5.15 montre la courbe qui a permis de déterminer la température associée à un $G^*/\sin\delta$ de 1 kPa.

5.2.3 Essai de densité

L'essai est réalisé selon les prescriptions de la norme ASTM D70-82 pour un des deux échantillons. L'autre échantillon ne possède pas la masse de 10 g requise par la

norme mais est néanmoins testé afin d'obtenir un ordre de grandeur pour les différents résultats. Le tableau XXXV montre les résultats obtenus. L'eau utilisée pour l'essai est tempérée à 25°C. Ce qui induit que, pour les calculs, une valeur de 0,9971 g/cm³ est utilisée pour la valeur de la densité de l'eau.

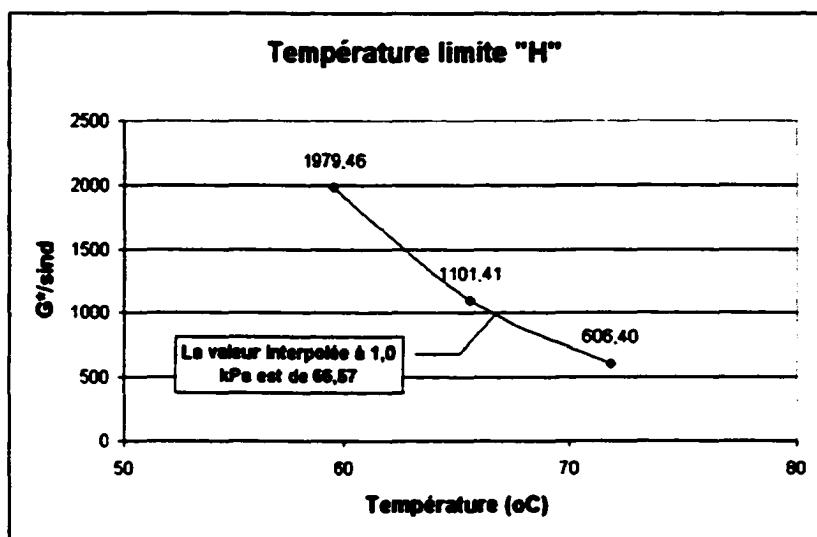


Figure 5.15 Courbe de températures

Tableau XXXV

Résultats de l'essai de densité

	Échantillon 1	Échantillon 2
Gravité spécifique	1,0187	1,0148
Densité	1,0157	1,0118
\bar{X} Densité		1,0138
Δ Densité		0,0028

5.2.4 Synthèse des résultats des essais sur bitume

Le tableau XXXVI présente la synthèse des résultats obtenus lors des différents essais de laboratoire sur le bitume synthétique.

Tableau XXXVI

Synthèse des caractéristiques du bitume synthétique

Propriété	Norme	Liant synthétique
Densité	ASTM D70-82	1,0138
Viscosité Brookfield (°C)	AASHTO TP48-97 LC 25-007	Compactage: 165 Malaxage : 208
Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) (°C)	AASHTO TP5-98	66

5.3 Formulation

Les mélanges sont conçus en fixant le volume de bitume effectif à 12,2% tel que prescrit par la norme 4202 du MTQ pour les enrobés de type ESG-10. Par la suite, les granulométries de chacun des types d'enrobés ont été ajustées afin de répondre aux exigences du fuseau granulométrique et des restrictions imposées par la méthode LC. Lors des expérimentations et du processus de formulation, les essais effectués à l'aide de la presse à cisaillement giratoire montrent une trop grande aptitude au compactage des enrobés. La modification de la granulométrie a donc été obligatoire pour chacun des mélanges. Les courbes présentées aux figures 5.16 à 5.19 sont les courbes des mélanges optimisés utilisées.

Lorsqu'un mélange d'enrobé bitumineux montre une grande aptitude au compactage, des modifications à la granulométrie s'imposent. Habituellement un mélange composé

d'une granulométrie plus grenue se compactera moins bien qu'un mélange homogène. Les courbes de granulométrie des mélanges optimisés sont éloignées de la courbe de masse volumique maximale permettant d'obtenir un mélange assez grenu avec un VAM élevé.

Quatre formulations différentes sont effectuées à l'aide des granulats de couleur. Deux de celles-là utilisent un bitume standard de grade PG 58-28 sans ajout de pigments. Le premier mélange comporte uniquement du granulat vert (ortho-quartzite) que ce soit pour la classe 0-5 mm ou la classe 5-10 mm. Le deuxième mélange utilise du bitume standard avec des GG de type granite (rouge) et du GF de type ortho-quartzite. Le troisième mélange utilise toujours le bitume standard mais cette fois ci avec ajout de pigments d'oxyde de fer, du granulat rouge (granite) pour le GG et de l'ortho-quartzite pour le GF. Le dernier mélange utilise un liant synthétique, à l'aspect caramel, translucide en couche mince, des pigments d'oxyde de chrome ainsi que des granulats d'ortho-quartzite (vert) autant pour la fraction fine que pour la fraction grossière.

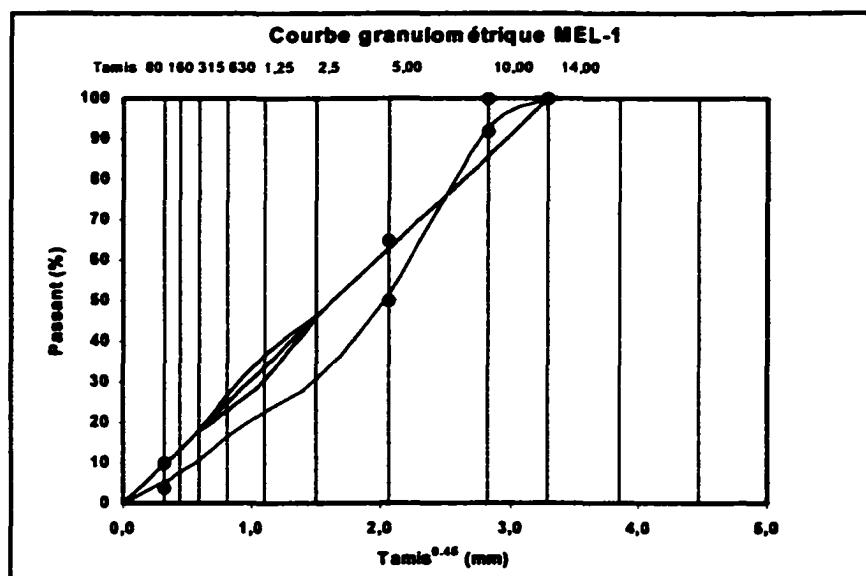


Figure 5.16 Courbe granulométrique du Mélange 1

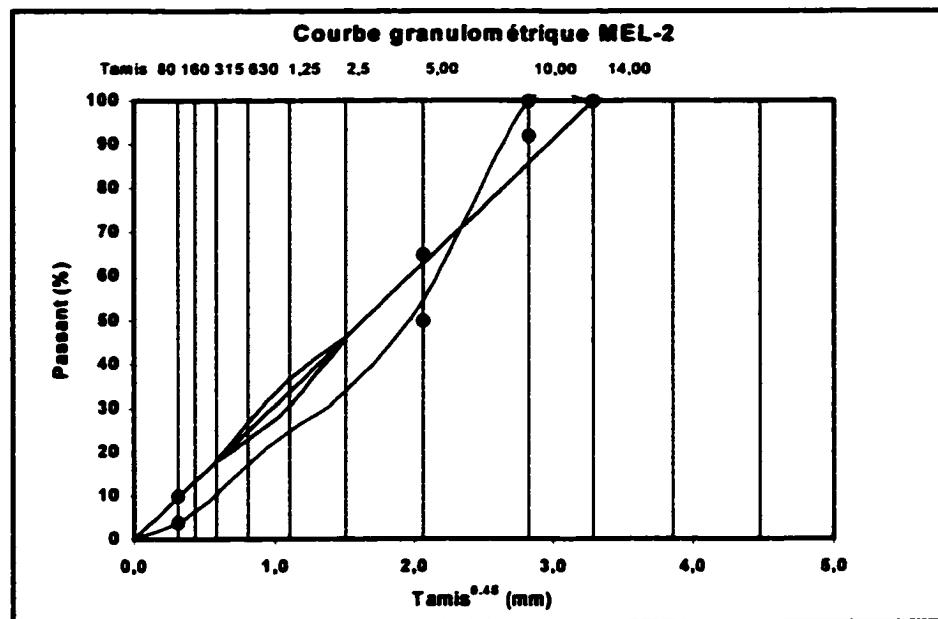


Figure 5.17 Courbe granulométrique du Mélange 2

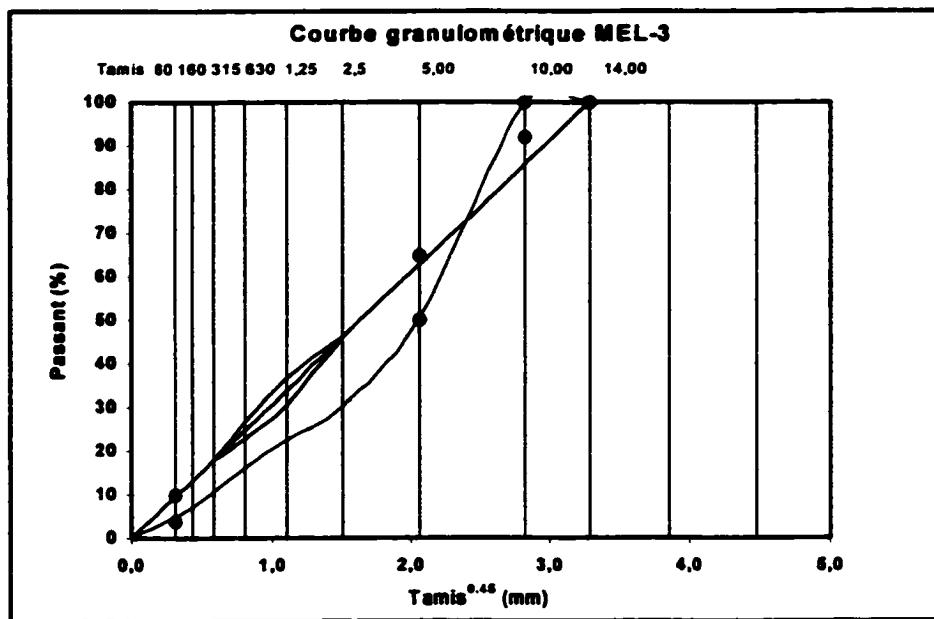


Figure 5.18 Courbe granulométrique du Mélange 3

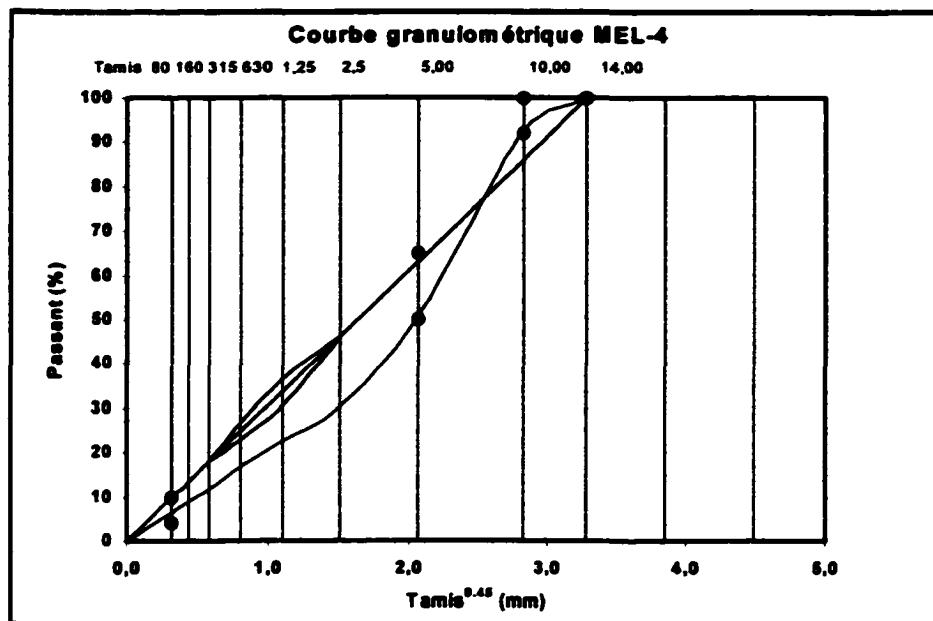


Figure 5.19 Courbe granulométrique du Mélange 4

Les essais sur EBC sont réalisés selon la méthode d'essai LC 26-004 du MTQ. Les caractéristiques pour un enrobé bitumineux ESG-10 à respecter lors de la formulation sont prescrites à la norme 4202 du MTQ. Il s'agit de la quantité de vides à respecter, de la résistance à l'orniérage ainsi que de la tenue à l'eau. Ces exigences sont montrées au tableau XXXVII.

5.3.1 Mesure de la D_{mm} et du $P_{bs} \%$

La première étape lors de la formulation d'un enrobé consiste à estimer la valeur du pourcentage de bitume absorbé ($P_{bs,est.}$) à partir de l'absorption en eau des granulats utilisés. En règle générale, le P_{bs} est approximativement égal à la moitié de l'absorption en eau. Ce sont les valeurs obtenues à l'aide de l'essai de densité maximale (D_{mm}) qui indiquent quel est le véritable P_{bs} . Afin de déterminer les quantités requises pour l'essai de densité maximale, il faut connaître la densité brute du granulat combiné (D_{gb}) et la densité effective du granulat (D_{ge}) et des pigments le cas échéant.

Après cela, il est possible de déterminer les valeurs estimées du P_{be} et du P_{bi} avec les valeurs du volume de bitume effectif (V_{be}) fixé dans la norme à 12,2% et la densité du bitume (D_b) déterminés en laboratoire ou fourni par le fournisseur de bitume. Le tableau XXXVIII montre la synthèse des résultats obtenus pour les valeurs de D_{mm} , P_{be} et P_{bi} de chacun des mélanges étudiés.

Les mélanges d'enrobés effectués en laboratoire pour les essais de densité maximale ont été effectués séparément. C'est-à-dire que, pour chaque mélange, deux échantillons de densité maximale ont été préparés. Pour se faire, les quantités utilisées pour chaque mélange ont été prévues afin de permettre l'obtention, à l'aide du séparateur, de deux échantillons de masse égale selon la norme LC 26-010. Ces échantillons ont subi une cure dans des contenants séparés selon les prescriptions de la norme LC 26-045.

Tableau XXXVII

Exigences pour un enrobé bitumineux de type ESG-10

Critères à respecter		ESG-10 – Couche de surface
Presse à cisaillement giratoire	Vides à 10 girations (%)	$\geq 11,0$
	Vides à 100 girations (%)	4,0 – 7,0
	Vides à 200 girations (%)	$\leq 2,0$
	Compacité (% minimum)	92,0
Résistance à l'ornièreage (plaqué de 50 mm)	1000 cycles (%)	10
	3000 cycles (%)	20
Essai de tenue à l'eau (% minimum)		70

Tableau XXXVIII

Synthèse des résultats obtenus pour les D_{mm} , P_{bs} et P_{bi}

		MEL-1	MEL-2	MEL-3	MEL-4
Valeurs théoriques	D_b	1,0079	1,0079	1,0079	1,0138
	D_{bs}	2,615	2,584	2,622	2,656
	D_{bs} théorique	2,718	2,700	2,724	2,755
	P_{bs} est. (%)	1,46	1,66	1,44	1,38
	P_{bi} est. (%)	6,38	6,61	6,35	6,27
	D_{mm} théorique	2,453	2,430	2,458	2,488
Valeurs en labo.	D_{mm} Essai 1	2,435	2,412	2,451	n/d
	D_{mm} Essai 2	2,440	2,412	2,454	n/d
	\bar{D}_{mm} des essais	2,437	2,412	2,453	n/d
	Δ entre essais	0,005	0,0002	0,002	n/d
	D_{bs}	2,698	2,676	2,717	n/d
	P_{bs} (%)	1,19	1,34	1,35	n/d
	Δ avec P_{bs} est.	0,27	0,32	0,05	n/d
	P_{bi} (%)	6,14	6,33	6,27	n/d
	Δ avec P_{bi} est.	0,24	0,28	0,08	n/d

5.3.2 Remarques concernant les résultats de D_{max} , de $P_{bs} \%$ et de $P_{bi} \%$

Concernant les valeurs de P_{bs} , il existe une différence entre les valeurs estimées et les valeurs obtenues après l'essai de densité maximale. En effet, les écarts varient entre 0,05 et 0,32 dépendamment du type de mélange. Le mélange 3 présente les écarts les plus élevés.

En ce qui concerne les valeurs de P_{bi} , il existe des variances dans les résultats selon les types de mélange. Les écarts entre les valeurs théoriques et mesurées en laboratoire varient entre 0,08 et 0,28 selon le type de mélange. Il est à noter que cette fois c'est le Mélange 2 qui possède le plus grand écart. Toutefois, ces écarts sont négligeables.

Deux essais de densité maximale sont effectués pour chacun des mélanges dans un souci de respect des normes. Pour se faire, un échantillon d'enrobés est divisé en deux parts égales afin d'obtenir les masses requises pour l'essai de densité maximale (norme LC 26-010). En effet, en effectuant deux essais sur le même échantillon, il est possible de valider auprès de la norme LC 26-045 « Détermination de la densité maximale » si l'écart obtenu entre les deux résultats est acceptable. De cette façon, l'écart permis entre deux échantillons pour un même opérateur est de 0,0040, ce qui permet de s'assurer que les résultats obtenus sont acceptables. Les écarts obtenus entre deux essais varient de 0,0002 à 0,005, ce qui respecte les écarts maximaux de la norme.

5.3.3 Aptitude au compactage des enrobés confectionnés

L'aptitude au compactage d'un enrobé bitumineux quel qu'il soit s'effectue à l'aide de la presse à cisaillement giratoire (PCG) de la méthode LC. Le tableau XXXIX montre les dosages réels utilisés dans les mélanges confectionnés. Ces dosages ont été optimisés à partir de modifications à la granulométrie des mélanges. La figure 5.20

montre les briquettes obtenues à la suite des essais à la PCG pour chacun des mélanges.

Tableau XXXIX

Dosages réels des enrobés colorés confectionnés en laboratoire après ajustements

		Type d'EBC			
		MEL-1	MEL-2	MEL-3	MEL-4
Couleur visée de l'enrobé		Vert	Rouge	Rouge	Vert
GG (5-10 mm)	Type	Ortho-quartzite	Granite	Granite	Ortho-quartzite
	Dosage	58,98 %	51,52 %	55,72 %	60,03 %
GF (0-5 mm)	Type	Ortho-quartzite	Ortho-quartzite	Ortho-quartzite	Ortho-quartzite
	Dosage	34,64 %	42,15 %	35,12 %	31,67 %
Pigment	Type	Aucun	Aucun	Oxyde de fer	Oxyde de chrome
	Dosage	0,00 %	0,00 %	2,81 %	2,84 %
Bitume	Grade	PG 58-28	PG 58-28	PG 58-28	PG 64-L
	Dosage	6,38 %	6,33 %	6,35 %	5,46 %
Volume de bitume effectif (V_{be} %)		Fixé à 12,2 % pour tous les mélanges			



Figure 5.20 Résultats de l'essai à la PCG pour chacun des mélanges utilisés

Pour chacun des trois premiers enrobés étudiés, deux mélanges distincts ont été effectués. Les mélanges ont subi une cure directement dans les cylindres de moulage tout en s'assurant que celle-ci ne dépasse pas 2 heures. Les teneurs en vides des éprouvettes compactées à la PCG ont été calculées à 10, 80 et 200 girations. Le tableau XXXX de la section 5.3.7 montre les résultats pour chacun des mélanges. Les figures 5.21 à 5.24 montrent l'évolution des vides dans les différentes formulations étudiées. Il est à noter que pour le Mélange 4, un seul essai à la PCG a été effectué. C'est pourquoi le graphique ne comporte qu'une seule courbe d'évolution des vides.

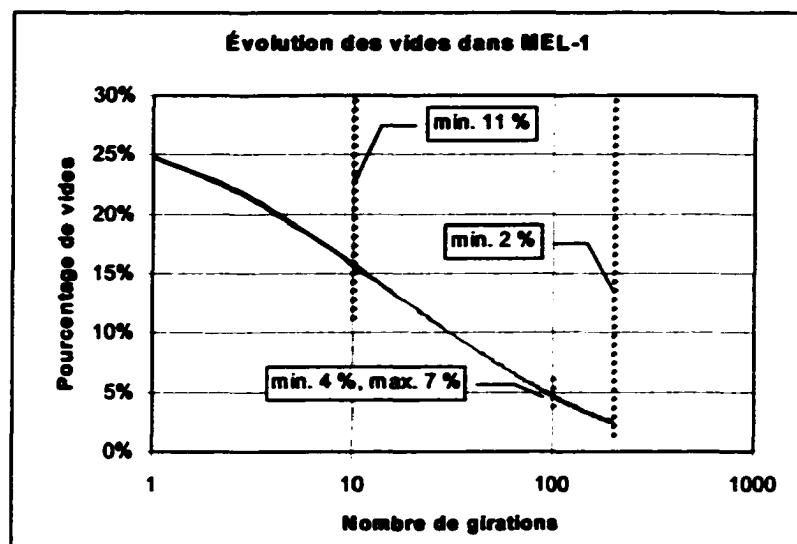


Figure 5.21 Évolution des vides dans le Mélange 1

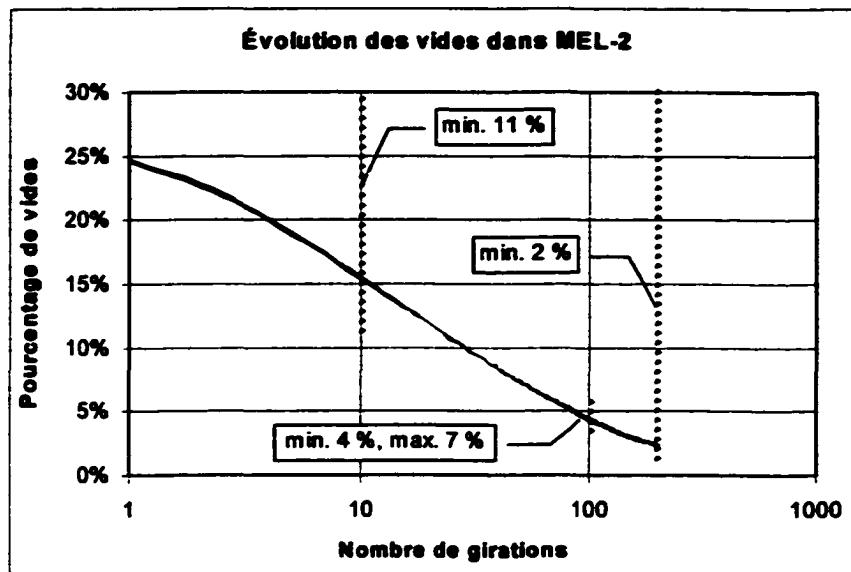


Figure 5.22 Évolution des vides dans le Mélange 2

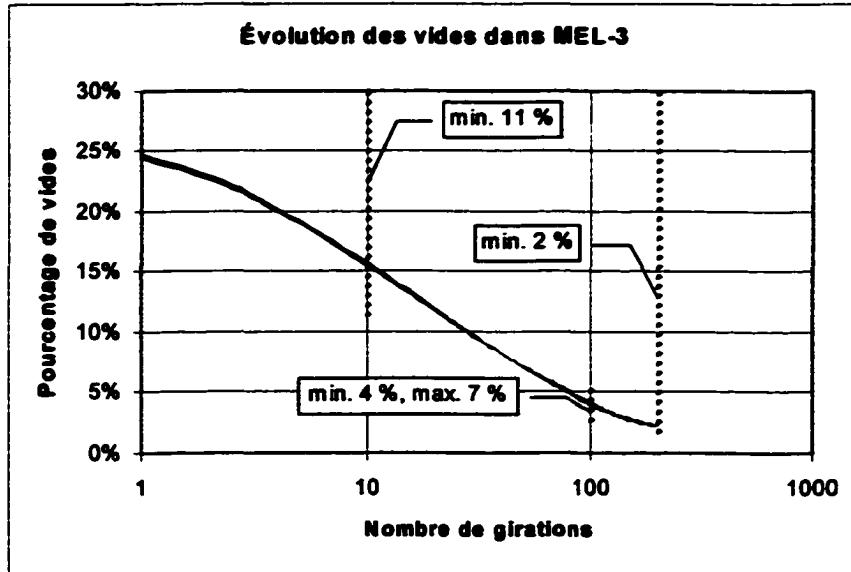


Figure 5.23 Évolution des vides dans le Mélange 3

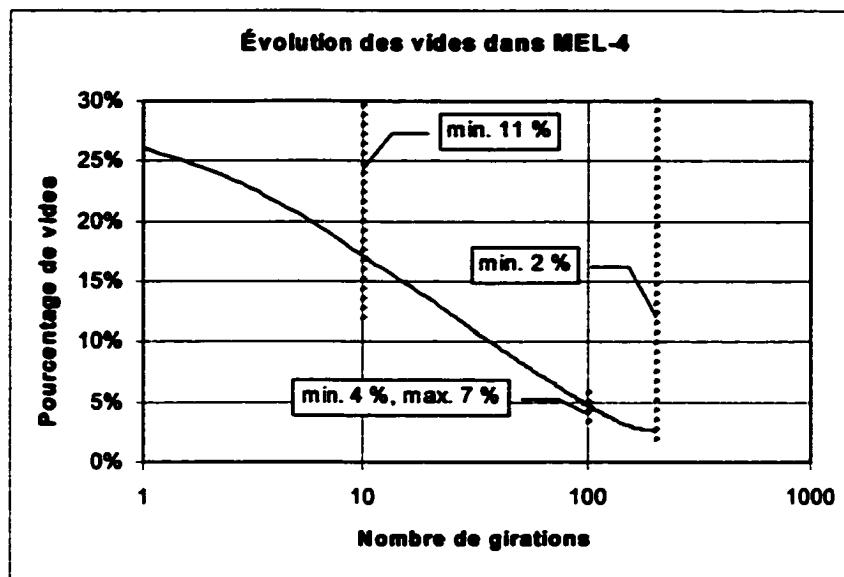


Figure 5.24 Évolution des vides dans le Mélange 4

5.3.4 Remarques concernant l'aptitude au compactage des enrobés confectionnés

Bien que les mélanges d'enrobés colorés soient de composition différente, ils montrent un comportement semblable quant à l'aptitude à la compaction. Seul le Mélange 3 se démarque globalement des autres par une présence plus grande de vides pour le même nombre de girations. Les Mélanges 1 et 2 sont pratiquement semblables. Le Mélange 4, sauf pour ce qui est de la teneur en vides à 10 girations, s'apparente plutôt aux Mélanges 1 et 2 (voir tableau XXXX).

5.3.5 Remarques concernant la résistance à l'orniérage des enrobés confectionnés

Pour chacun des enrobés étudiés, deux plaques sont compactées dans le but de mesurer leur résistance à l'orniérage. Les plaques subissent un compactage fort selon les prescriptions de la norme LC 26-0XX.

5.3.6 Résistance à l'omiérage des enrobés confectionnés

La mesure de la résistance à l'omiérage s'est effectuée selon les normes françaises et québécoises NF P 98-253-1 et LC 26-0XX. Les figures 5.25 à 5.28 montrent les plaques d'enrobés bitumineux qui ont été soumises à 3 000 cycles d'omiéreur à la température de 60°C. La teneur en vides des enrobés compactés à l'aide du compacteur de plaques est mesurée à l'aide de l'équation énoncée dans la norme LC 26-0XX.

$$\% \text{ Cr} = \frac{m_r}{V \times D_{mm}} \times 100 \quad (5.1)$$

où :

% Cr est le pourcentage de compacité réelle

m_r est la masse réelle d'enrobé dans le moule

V est le volume du moule

D_{mm} est la densité maximale de l'enrobé



Figure 5.25 Omières dans le Mélange 1 à 3 000 cycles



Figure 5.26 Ornières dans le Mélange 2 à 3 000 cycles

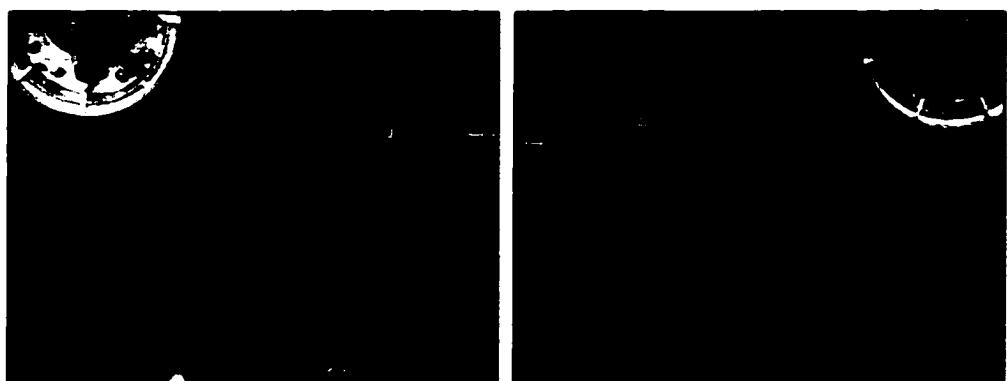


Figure 5.27 Ornières dans le Mélange 3 à 3 000 cycles

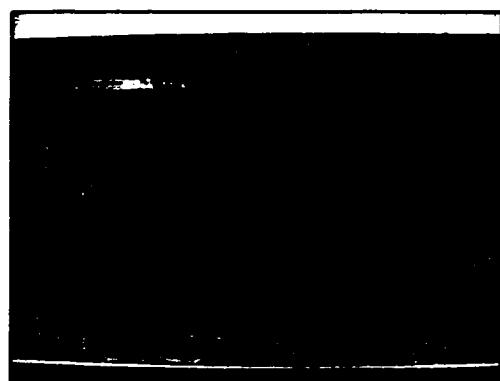


Figure 5.28 Ornières dans le Mélange 3 à 10 000 cycles

5.3.7 Synthèse des résultats d'essais sur EBC

Le tableau XXXX résume les différentes caractéristiques des EBC.

Tableau XXXX

Caractéristiques des EBC¹

Propriétés	Norme	MEL-1	MEL-2	MEL-3	MEL-4
Densité maximale (Dmax)	LC 26-045	2,437	2,412	2,453	2,488 ²
Vides à 10 girations (%)	LC 26-003	15,8	15,4	17,9	17,2
Vides à 100 girations (%)		4,6	5,2	5,8	4,7
Vides à 200 girations (%)		2,4	2,3	3,0	2,5
Compacité (%)		95,4	94,7	95,6	n/a
Résistance à l'omiérage à 1000 cycles (%)	NF P 98-253-1	4,34	4,15	5,21	n/a
Résistance à l'omiérage à 3000 cycles (%)	LC 26-0XX	6,23	6,79	5,51	n/a

5.4 Résistance à l'oxydation

Inspiré de l'essai américain « Accelerated Weathering Test » (voir section 1.1.3), un essai « maison » a été réalisé afin d'obtenir une approximation de la couleur de l'enrobé une fois soumis au vent et à la chaleur. Pour se faire, une tranche d'une

¹ Les valeurs inscrites dans le tableau sont les valeurs moyennes de deux échantillons pour le même essai.

² Cette valeur de densité maximale est une valeur calculée théoriquement.

briquette provenant de l'essai PCG de chaque mélange a été soumise en même temps aux températures de 60°C pendant 24 heures et ce, dans la même étuve ventilée. Ceci dans le but d'homogénéiser les conditions d'essai et de permettre une comparaison valable des résultats. La figure 5.29 montre la différence de teinte entre deux échantillons d'un même enrobé avant et après oxydation. Ce sont les quatre tranches de gauche qui ont été soumises à 24 heures d'oxydation.

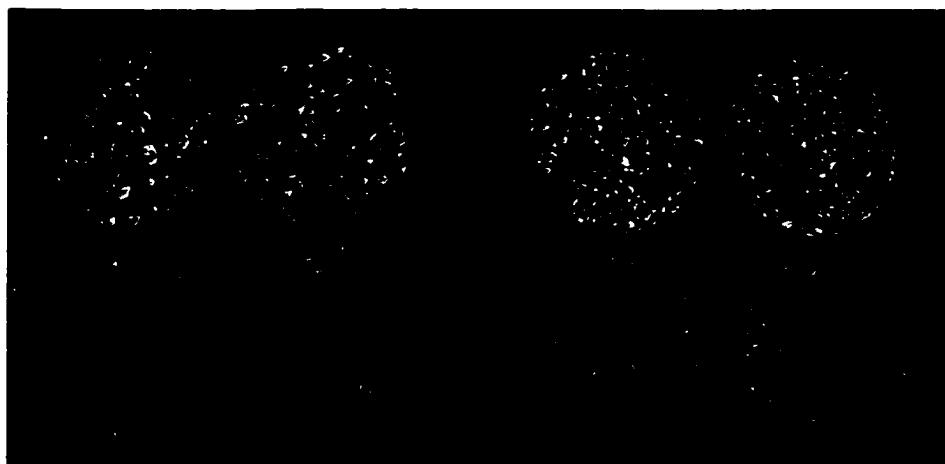


Figure 5.29 Variation de couleur avant et après oxydation (24 heures)

Les mêmes échantillons ont été par la suite soumis pendant 48 heures à une température de 30°C dans une étuve ventilée. La figure 5.30 montre les différences de couleur obtenues après 72 heures.

L'essai « maison » tente de montrer que la couleur du liant est plus prononcée après avoir été exposé à la chaleur et à la ventilation. De plus, il semble que l'ajout de pigments d'oxyde de fer (pigments rouges) ne permet pas d'obtenir une couleur très différente de celle obtenue avec les mêmes granulats sans ajout de pigments rouges.



Figure 5.30 Variation de couleur avant et après oxydation (72 heures)

CHAPITRE 6

DISCUSSION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Puisque l'étude a porté sur quatre volets différents, l'analyse des résultats est présentée selon cette division. Une partie de la discussion s'effectue sur les résultats d'essais sur granulats, une autre sur les résultats sur liant synthétique puis une partie concernant la formulation des enrobés colorés. Le tout basé sur la revue de la documentation.

6.1 Comportement des granulats étudiés

Dans le Chapitre 2 de la présente étude, il était question de géologie et des sources de granulats colorés au Québec. Plusieurs types de granulats naturellement colorés sont disponibles dans les environs de la région métropolitaine. En effet, des pierres vertes se retrouvent dans les Cantons de l'est et dans le Centre du Québec, des pierres roses se retrouvent dans les Laurentides, dans la région de Lanaudière et à Québec et des pierres beige dans les Laurentides et en Montérégie. Les granulats étudiés, soit le granite et l'ortho-quartzite, proviennent de la région du Centre du Québec.

Les essais effectués dans la première phase du programme expérimental permettent de déterminer les catégories de granulats étudiés. Le tableau XXXVI du Chapitre 5 montre la synthèse des résultats obtenus en laboratoire.

En ce qui concerne les caractéristiques intrinsèques du GG, le granite se retrouve dans la catégorie « 3 » tandis que l'ortho-quartzite se retrouve dans la catégorie « 2 ». Concernant les caractéristiques de fabrication du GG, le granite se retrouve dans la catégorie « d » tandis que l'ortho-quartzite se retrouve dans la catégorie « a ». Il est à noter que les granulats d'ortho-quartzite ne sont pas soumis à l'essai sur particules plates et allongées puisqu'ils se retrouvent dans la catégorie « 2 » de granulats selon la norme 4202 du MTQ. La catégorie de GF de type ortho-quartzite selon les caractéristiques intrinsèques est « 1 ». La catégorie globale des granulats utilisés est

donc « 3-a-1 » pour la combinaison granulaire ortho-quartzite-ortho-quartzite et de « 2-d-1 » pour la combinaison granulaire granite-ortho-quartzite.

Selon les recommandations du MTQ (MTQ, 2000), les granulats utilisés pour couche de roulement dans les enrobés de type ESG-10 doivent être de catégorie « 2-b-1 » pour une nationale possédant un DJMA plus grand que 20 000, de catégorie « 3-b-2 » pour un DJMA inférieur à 20 000 mais supérieur à 5 000 et de catégorie « 3-c-2 » pour un DJMA inférieur à 5 000. Selon ces recommandations, la combinaison granulaire ortho-quartzite-ortho-quartzite rencontre les exigences fixées pour un DJMA supérieur à 20 000 tandis que la combinaison granulaire granite-ortho-quartzite ne les rencontre pas.

Toutefois, ce ne sont que des recommandations. Ce qui nuit au granulat de type granite, c'est sa proportion de particules plates et allongées. Pour être dans la catégorie « a » il faudrait que l'échantillon compte moins de 25% particules plates et allongées et il en compte 25,74%. En dépit de la performance du granulat de granite, l'utilisation de la combinaison granulaire granite-ortho-quartzite obtient un bon comportement dans l'enrobé étudié en laboratoire, il est fort probable qu'ils obtiendront un comportement satisfaisant sous circulation.

Lors de l'essai d'adhésivité, les résultats des essais utilisant les granulats d'ortho-quartzite obtiennent les mêmes résultats indépendamment du type de liant utilisé. Par contre, puisque l'essai s'effectue à une température de 60°C, le liant synthétique est plutôt sous une forme caramélisée, ce qui rend difficile la manipulation de l'échantillon : le tout est très collant.

6.2 Caractérisation des bitumes

Les essais sur bitume synthétique réalisés lors de la phase 1 du programme expérimental permettent de déterminer sa classe de performance ainsi que les

températures cibles de malaxage et compactage. Le tableau XXXVI du Chapitre 5 montre la synthèse des résultats obtenus en laboratoire.

Les recommandations du MTQ pour un projet situé dans la zone 1 (voir figure 3.1 pour la répartition des zones) sont un bitume de grade PG 64-34 pour une route nationale possédant un DJMA de plus de 5 000 et un grade PG 58-34 pour un DJMA inférieur à 20 000. La classe de performance du bitume synthétique est PG 64-L tandis que celle du bitume standard est PG 58-28.

En ce qui concerne le bitume synthétique, il respecte les recommandations et pourra être utilisé même sur des autoroutes. Le bitume standard de l'étude, quant à lui, n'est recommandé par le MTQ que pour les routes régionales et collectrices mais continue d'être utilisé couramment en milieu urbain puisqu'il comporte des coûts moindres.

Les températures de malaxage et de compactage obtenues à l'aide du viscosimètre Brookfield pour le bitume synthétique dépassent les températures fixées dans la norme. C'est pourquoi la température de malaxage est fixée à 168°C et que celle pour le compactage est aussi fixée à 168°C comme mentionné aux notes 2 et 3 de la norme LC 26-003 édition du 15 décembre 2001.

6.3 Étude du comportement des EBC

L'étude du comportement des 4 mélanges confectionnés en laboratoire s'effectue sous trois différents aspects. Il s'agit de l'aptitude au compactage, de la résistance à l'ométiérage et de la résistance à l'oxydation. L'analyse s'effectue à partir des résultats synthétisés au tableau XXXX du Chapitre 5.

6.3.1 Étude de l'aptitude au compactage des EBC

Les quatre mélanges étudiés rencontrent les exigences de la norme 4202 du MTQ. De plus, les courbes des mélanges sont semblables et ce indépendamment du type de

combinaison granulaire employée. La figure 6.1 montre sur un même graphique les quatre courbes de volume des vides en fonction du nombre de girations. Seul le Mélange 4 se démarque par une concentration de vides plus élevée. Par contre, une fois les 200 girations effectuées, ce mélange obtient un volume de vides comparable aux autres mélanges avec une valeur de 2,5% (la moyenne des quatre valeurs étant de 2,55%).

Puisque les mélanges MEL-1 et MEL-4 possèdent le même squelette granulaire de départ, le changement de comportement du Mélange 4 semble attribuable à l'utilisation d'un liant différent. La viscosité du bitume synthétique est plus élevée que celle du bitume standard utilisé pour les autres mélanges donc la température de compactage doit être plus élevée. En ayant une température plus élevée pour le mélange et le moule utilisés pour la compaction, le contact avec l'air ambiant provoquera une plus grande perte de chaleur que pour un enrobé utilisant un bitume standard. Cette perte de chaleur induira une perte partielle de fluidité expliquant l'écart entre le Mélange 4 et les autres mélanges.

Par ailleurs, l'ajout de pigments dans le Mélange 4 n'offre pratiquement pas de changements à la courbe de densité maximale par rapport à celle du Mélange 1.

6.3.1.1 Aspect visuel des EBC compactés à la PCG

Lors de la compaction de tous les types de mélanges, du ressuage a été noté sur la surface de l'enrobé. Particulièrement pour le Mélange 4 où du bitume sortait du couvercle du moule de PCG.

Lors du malaxage, des granulats de type ortho-quartzite sont portés à se fracturer. Pour éviter ce phénomène qui contribue à changer la granularité de l'enrobé, la vitesse du malaxeur a été réglée à 1.

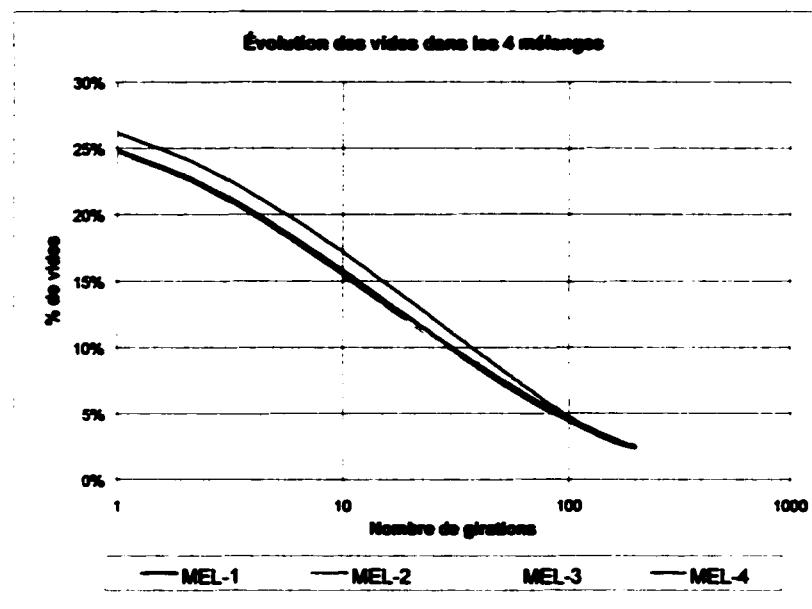


Figure 6.1 Volume des vides selon le type de mélange utilisé

6.3.2 Étude de la résistance à l'ornièrage des EBC

Lors du compactage des plaques du Mélange 3, il a été difficile de respecter les hauteurs de table requises pour l'essai. Le mélange semblait trop mou et n'arrivait pas à se compacter facilement. Ce n'est qu'aux dernières passes que les hauteurs se sont rétablies.

Dans le cas de tous les mélanges, les résultats d'ornièrage rencontrent les normes pour 1 000 et 3 000 cycles. Par contre, au delà de 3 000 cycles, les plaques d'enrobé des Mélanges 1 et 2 montraient une déformation telle qu'il était impossible de prendre les mesures de profondeur d'ornières. En ce qui concerne le Mélange 3, il a fallu attendre après 10 000 cycles pour obtenir une déformation comparable mais pour une seule plaque, soit la plaque A3. La plaque A4 a obtenu un pourcentage d'ornières de 4,57 à 3 000 cycles, ce qui est comparable aux résultats obtenus à 1 000 cycles pour

les autres mélanges. Il est à noter que les termes A3 et A4 s'appliquent à la numérotation des moules employés pour la compaction des plaques d'enrobé.

Il est à noter que lors de l'essai d'omiérage sur les plaques d'enrobé du Mélange 3, une trace de roue noire a été remarquée à l'endroit où le pneu passait et ce, même si le pneu a été préalablement nettoyé. D'où l'importance de bien nettoyer l'équipement au préalable.

6.3.3 Étude de la résistance à l'oxydation des EBC

Après 24 heures à 60°C dans une étuve ventilée, les tranches d'enrobés ont une couleur plus lumineuse que les tranches d'enrobé témoin. Le même phénomène a été noté après 48 heures de plus dans l'étuve ventilée mais à une température d'environ 30°C.

Bien que l'essai se voulait une manière permettant d'évaluer l'évolution de la couleur après avoir subi une certaine oxydation, les résultats demeurent approximatifs.

La couleur rouge du Mélange 3 est demeurée la même. Cela montre qu'à court terme, l'oxydation de l'enrobé n'a aucune influence sur la couleur des pigments utilisés.

De façon générale, l'ajout de 3% de pigments d'oxyde de fer dans le Mélange 3 ne semble pas influencer de façon significative la couleur finale de l'enrobé. En effet, une différence de couleur minime existe entre le Mélange 2 et le Mélange 3. Ce sont plutôt les granulats qui offrent la couleur rosée à l'enrobé.

CONCLUSION

Les essais en laboratoire prévus dans le programme expérimental ont permis de déterminer les caractéristiques des enrobés bitumineux colorés. Ils ont de même permis de s'assurer qu'il était possible d'effectuer des enrobés colorés au Québec avec les matières premières locales.

Les recherches pour trouver des produits locaux permettant de donner une coloration aux enrobés ont porté fruits. Il a été possible de trouver des granulats ayant de bonnes propriétés mécaniques et physiques tout en alliant la caractéristique la plus importante : la couleur. Des pigments minéraux sont aussi disponibles sous une large palette de couleurs. Un bitume synthétique de formulation québécoise est disponible. Par contre, cette formule est encore à l'état de développement chez Bitumar Inc.

Lors des essais en laboratoire sur les caractéristiques des granulats employés, il a été possible de s'assurer que ceux-ci rencontraient les exigences du MTQ. Par contre, en ce qui concerne le granite, il contient un peu trop de particules plates et allongées, ce qui nuit à sa classification pour les usages classés par le MTQ. Il faudrait alors choisir d'autres granulats roses ou rouges ayant de bonnes caractéristiques mécaniques pour remplacer le granite.

Les quatre formulations d'enrobé effectuées en laboratoire montrent d'excellentes propriétés mécaniques autant au point de vue de la maniabilité que du comportement à l'orniérage. Quant au changement de couleur avec l'oxydation du bitume, « l'essai maison » proposé ne permet pas de déterminer avec des résultats concluants si la couleur de l'enrobé changera de façon significative avec le temps.

L'utilisation de pigments rouges d'oxyde de fer à raison d'un taux de 3% dans le mélange ne permet pas d'obtenir une différence de couleur significative par rapport au mélange comportant les mêmes composantes mais sans pigments. De plus, après avoir été oxydé, la différence de couleur entre les mélanges utilisant du bitume noir et

celui avec ajout de pigments colorés devient de moins en moins évidente (voir figures 5.29 et 5.30).

Lors de la présente étude, certaines observations ont été faites concernant l'utilisation des matériaux non usuels en formulation d'enrobés comme les pigments et le liant synthétique. En effet, l'ajout de pigments implique une augmentation de la teneur en liant requis puisque les pigments minéraux possèdent une très grande surface spécifique, ce qui entraîne une augmentation des coûts de l'enrobé.

RECOMMANDATIONS

Afin de s'assurer que l'étude effectuée dans le cadre de ce projet de maîtrise soit complète, certains essais seraient à envisager. Il s'agit de la résistance au polissage des granulats (Norme LC 21-102) et de la tenue à l'eau des enrobés par trempage (Norme LC 26-001). De plus, d'autres essais sur le Mélange 4 sont à prévoir afin de compléter la formulation : un essai de densité maximale, un minimum de 2 autres briquettes PCG afin de confirmer les résultats déjà obtenus, ainsi qu'un essai de résistance à l'omiérage.

Lors des essais en laboratoire, certaines particularités ont été rencontrées et doivent être prises en compte pour quiconque voudrait effectuer des enrobés colorés à l'avenir. Il s'agit de :

- S'assurer de malaxer l'enrobé à vitesse minimale (vitesse 1) lors de l'utilisation de granulats de type ortho-quartzite;
- S'assurer que tout le matériel entrant en contact avec un EBC (avec utilisation de pigments de couleur) soit nettoyé à fond avant utilisation pour éviter la contamination des couleurs;
- S'assurer que tout le matériel qui a été utilisé pour la confection d'EBC soit nettoyé afin de ne pas contaminer les enrobés noirs qui seraient effectués par la suite;
- S'assurer de prendre en considération la grande surface spécifique des pigments minéraux et d'ajuster en conséquence la masse de bitume requise pour l'enrobé.

ANNEXE 1

Fiches techniques des pigments employés

Pigments d'oxyde de fer et pigments d'oxyde de chrome

Bayferrox® 130 C

Édition du : 2000-10-24
Remplace l'édition du :

Type	Pigment rouge pour la coloration des matériaux de construction				
Forme de livraison	Pigment compact				
Désignation chimique	Oxyde de fer synthétique $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$				
Nr. CAS	1309-37-1				
Le Bayferrox 130 C remplit les exigences de la DIN V 53 237 (béton non armé)*					
Valeurs spécifiques	Pigment de référence	Bayferrox 130			
Bayferrox® 130 C		Poudre étalon 1997			
Constance du coloris	S 1,5	Fonction de coloration : 100 Rendement d'application : 100			
Ecart ΔE_{ab}^* dans du mortier de ciment					
Méthode de contrôle Nr. 015 ^a					
Pouvoir colorant relatif dans du mortier de ciment	min. 95 %	max. 105 %			
Type	En référence à la DIN V 53 237				
Le Bayferrox 130 C est régulièrement contrôlé par un organisme indépendant suivant DIN V 53 237					
Désignation chimique	• Remplit également les exigences BS 1014 • Disponibilité éprouvée de Bayer AG, LS-Technik 2, FEO Labor u. Produktionskontrolle. Fax 021-91-99-99-28				
Nr. CAS	1309-37-1				
Le Bayferrox 130 C remplit les exigences de la DIN V 53 237 (béton non armé)*					
Valeurs spécifiques	Pigment de référence	Bayferrox 130			
Bayferrox® 130 C		Poudre étalon 1997			
Constance du coloris	S 1,5	Fonction de coloration : 100 Rendement d'application : 100			
Ecart ΔE_{ab}^* dans du mortier de ciment					
Méthode de contrôle Nr. 015 ^a					
Pouvoir colorant relatif dans du mortier de ciment	min. 95 %	max. 105 %			
Type	En référence à la DIN V 53 237				
Le Bayferrox 130 C est régulièrement contrôlé par un organisme indépendant suivant DIN V 53 237					
Désignation chimique	• Remplit également les exigences BS 1014 • Disponibilité éprouvée de Bayer AG, LS-Technik 2, FEO Labor u. Produktionskontrolle. Fax 021-91-99-99-28				
Nr. CAS	1309-37-1				

Bayer 

Bayferrox® 130 C

Édition du : 2000-10-24
Remplace l'édition du :

Caractéristiques techniques informatives (valeurs indicatives)

a) pour le pigment

Fe_2O_3	min. 92 %
Méthode de contrôle suivant DIN 55 913 page 2 (1972)	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$	max. 4 %
Méthode de contrôle suivant DIN 55 913 page 2 (1972)	
Parties solubles dans l'eau	max. 3,5 %
Méthode de contrôle suivant DIN EN ISO 787 Partie 3 (1995)	
Densité apparente	min. 1,0 g/ml max. 1,4 g/ml
Méthode de contrôle suivant DIN EN ISO 787 Partie 11 (1995) ²⁸	
Prise d'eau	env. 25 g/100 g
Méthode de contrôle suivant DIN EN ISO 787 Partie 5 (1995) ²⁹	
pH	5 ± 2
Méthode de contrôle suivant DIN EN ISO 787 Partie 9 (1995)	
Taux d'humidité (départ usine)	max. 1,0 %
Méthode de contrôle DIN EN ISO 787 Partie 2 (1995)	
Densité	env. 5,0 g/ml
Méthode de contrôle suivant DIN EN ISO 787 Partie 10 (1995)	

b) pour le béton

Influence sur le durcissement	± 60 min.
Ecart limite entre le débit de durcissement du produit pigment/avec pigment	AIR. 100 g/ml MAX. 1,5 g/ml
En référence à la DIN EN 196-3	
Influence sur la résistance à la compression	max. 5 %
Diminution de la résistance par rapport au mélange non pigmenté.	env. 1,5 %
En référence à la DIN EN 196-1	

²⁸ Méthode de contrôle Nr. 010⁴⁸

²⁹ Méthode de contrôle Nr. 011⁴¹

⁴¹ Disponible auprès de Bayer AG, LS-Technik 2, FEO Labor u. Produktionskontrolle
Fax 0 21 51 - 88 33 28



Bayferrox® 130 C

Édition du : 2000-10-24
Remplace l'édition du :

Conditionnement	Emballage standard Sac papier de 25-kg Big Bag de 1-tonne
Transport et stockage	Protéger des influences atmosphériques : stocker dans un endroit sec, éviter les fluctuations extrêmes de températures. Instructions spécifiques pour les emballages entamés : bien refermer les sacs entamés pour éviter toute absorption d'humidité ainsi que les souillures.
Sécurité	Le produit n'est pas soumis à étiquetage. Il n'est pas dangereux pour le transport. Il importe de consulter la fiche de données de sécurité qui contient, entre autres, des informations concernant la manipulation du produit, les mesures de précaution à prendre ainsi que les facteurs d'ordre écologique.

Fiche de Données de Sécurité Nr. 762761

Produit et fabricant	Produit : Bayferrox® 130 C Fabricant : BAYER S.A. Liants, Matières colorantes et Domaines spéciaux 49-51, quai De Dion Bouton 92815 Puteaux Cedex
Informations générales	Produit : Bayferrox® 130 C est un additif pour la fabrication de peintures et revêtements. Il est destiné à assurer la stabilité et la durabilité des couleurs dans les peintures et revêtements. Il est également utilisé dans les domaines de la plasturgie et de la chimie.
Composition	Produit : Bayferrox® 130 C est une combinaison d'oxydants et d'agents stabilisateurs. Il contient des oxydants tels que l'acide citrique et l'acide malique, et des agents stabilisateurs tels que l'acrylate de sodium et l'acrylate de potassium.
Utilisation	Produit : Bayferrox® 130 C est utilisé dans la fabrication de peintures et revêtements. Il est ajouté au mélange de pigments et de liants, et il est actif dans la phase de séchage et de durcissement de la peinture.

BAYER S.A.
Liants, Matières colorantes et Domaines spéciaux
49-51, quai De Dion Bouton
92815 Puteaux Cedex

Les présentes informations et les conseils qui vous sont donnés visent uniquement au pur usage dans le cadre de leurs applications techniques ou d'usages pratiques, vous nous communiquons en vertu de nos connaissances et s'engagent pas notre responsabilité, même en ce qui concerne d'éventuels droits de tiers ou risques de propriété intellectuelle. Ils ne vous dispensent pas de la nécessité de vérifier par elles-mêmes si les connaissances techniques ou les produits fournis correspondent aux possibilités et applications que vous envisagez. L'utilisation, la mise en œuvre et la transformation des produits fournis et de ceux que vous élisez pour vos propres usages sont de votre responsabilité. Nous déclinons toute responsabilité pour tout dommage résultant de l'utilisation de nos produits. Le usage de nos produits délivrés en vertu de nos conditions générales de vente et de livraison. Nos recommandations en matière de sécurité ne vous dispensent pas de l'obligation de déterminer les mesures de sécurité adaptées à vos conditions d'application, que nous ne pouvons prévoir, et de veiller notamment à la qualification professionnelle et à l'information des personnes apposées à utiliser, manipuler ou être en contact avec les produits.

Bayer 

Oxyde de Chrome GN

Édition du : 2000-05-15
Remplace édition du :

Type	Pigment vert
Forme de livraison	Poudre
Désignation chimique	Oxyde de chrome Cr ₂ O ₃
Colour Index	Pigment green 17 (77288)
Nr. CAS	1308-38-9

Spécification	Valeurs chromatiques et pouvoir colorant		
	Pigment de référence	Oxyde de Chrome GN Standard : Partie 0455/99	
Liant	Pâte à base de Sacolyd® L 640 ¹		
Ton plein ΔL*	min. -0,5	max. 0,5	
Δa*	min. -0,6	max. 0,6	
Δb*	min. -0,6	max. 0,6	
ΔE _{ab} *		max. 1,0	
Méthode de contrôle Nr. 001 du 1995-04-28 ²			
Ton dégradé avec du dioxyde de titane (1 : 5)	TRONOX® R-KB-2		
après ajoutement de la valeur nominale Y, c.i.d. ΔL* = 0			
Δa*	min. -0,6	max. 0,6	
Δb*	min. -0,6	max. 0,6	
ΔE _{ab} *		max. 1,0	
Méthode de contrôle Nr. 001 du 1995-04-28 ²			
Pouvoir colorant relatif	min. 95 %	max. 105 %	

Méthode de contrôle Nr. 001 du 1995-04-28²

¹ voir document séparé "pâtes pigmentaires pour caisses"²

² disponible auprès de Bayer AG, Abt. LS-TZ, FEO Labor & Produktionskontrolle,
Fax (00 49) 21 51-68 33 28



Oxyde de Chrome GN

Édition du : 2000-05-15
Remplace édition de :

Spécification (suite)	Caractéristiques techniques		
Parties solubles		max. 0,3 %	
Emiss selon DIN EN ISO 787, Partie 3 (1995)			
Résidu sur tamis (tamis 0,045-mm)		max. 0,02 %	
Emiss selon DIN 53 195 (1990)			
pH	min. 5	max. 7	
Emiss selon DIN EN ISO 787, Partie 9 (1995)			
Perte à la calcination 1000 °C, ½ h		max. 0,4 %	
Emiss selon DIN ISO 4 621 (1995)			
Densité du pigment tassé	min. 1,0 g/ml	max. 1,3 g/ml	
Emiss selon DIN EN ISO 787, Partie 11(1995)			
Caractéristiques techniques informatives (valeurs indicatives)			
Teneur en Cr ₂ O ₃	min. 98,5 %	max. 99,5 %	
Emiss selon DIN ISO 4621 (1995)			
Teneur en SiO ₂ + Al ₂ O ₃		env. 0,1 %	
Méthode de contrôle : fluorescence de rayons X			
Forme des particules	sphérique		
Grosseur prédominante des particules		env. 0,3 µm	
Microscope électronique			
Prise d'huile		env. 11 g/100 g	
Emiss selon DIN EN ISO 787, Partie 5 (1995)			
Densité		env. 5,2 g/ml	
Emiss selon DIN EN ISO 787, Partie 10 (1995)			
Stabilité thermique		env. 1000°C	



Oxyde de Chrome GN

Édition du : 2000-05-15
Révision 24/06/01

**10\$ /kilo
(SEPT. 2001)**

Conditionnement	Emballage standard sacs de 25 kg Big Bag de 1 tonne
Transport et stockage	Protéger des influences atmosphériques : stocker dans un endroit sec, éviter les fluctuations extrêmes de température. Instructions spécifiques pour les emballages entamés : Bien refermer les emballages entamés pour éviter toute absorption d'humidité ainsi que les semailles.
Sécurité	Il importe de consulter la fiche de données de sécurité qui contient, entre autres, des informations concernant la manipulation du produit, les mesures de précaution à prendre ainsi que les facteurs d'ordre écologique. Fiche de données de sécurité n° 002570. Le produit n'est pas soumis à étiquetage. Il n'est pas dangereux pour le transport.

Conditionnement	Emballage standard sacs de 25 kg Big Bag de 1 tonne
Transport et stockage	Protéger des influences atmosphériques : stocker dans un endroit sec, éviter les fluctuations extrêmes de température. Instructions spécifiques pour les emballages entamés : Bien refermer les emballages entamés pour éviter toute absorption d'humidité ainsi que les semailles.
Sécurité	Il importe de consulter la fiche de données de sécurité qui contient, entre autres, des informations concernant la manipulation du produit, les mesures de précaution à prendre ainsi que les facteurs d'ordre écologique. Fiche de données de sécurité n° 002570. Le produit n'est pas soumis à étiquetage. Il n'est pas dangereux pour le transport.

BAYER S.A.
Listes, Matières colorantes et Domaines spéciaux
49-51, quai De Dion Bouton
92815 Puteaux Cedex

Les personnes à l'origine et les conseils, qui vous sont donnés volontairement ou par écrit dans le cadre d'une relation professionnelle ou d'amitié personnelle, vous sont communiqués au niveau de nos connaissances et compétences possédées par nous en ce qui concerne d'ores et déjà de tous ce matière de propriété industrielle. Ils ne vous dispensent pas de la nécessité de vérifier sur place si les conseils techniques et les produits fournis correspondent aux procédés et applications que vous envisagez. L'application, la mise en œuvre et le fonctionnement des produits fournis et de ceux que vous fabriquez ou produisez de notre connaissance technique, dépendent à notre connaissance et exclusivement de votre responsabilité. La vente de nos produits n'offre en vertu de nos conditions générales de vente et de livraison.
Nos recommandations en matière de sécurité ne vous dispensent pas de l'obligation de déterminer les mesures de sécurité adaptées à vos conditions d'utilisation, que nous ne pouvons prévoir, et de veiller notamment à la qualité professionnelle et à l'adéquation des personnes appelées à utiliser, manipuler ou faire ou travailler avec les produits.



ANNEXE 2

Normalisation française

Essai d'adhérité passif des liants anhydres en présence d'eau (XP T66-043)

norme française

P. Biffré

XPT 66-043

Indice de classement : T 66-043

ICS : 75.140

T1 Liants hydrocarbonés

T2 ~~Test method for passive adhesiveness of water-free binders in the presence of water~~

T3

E: Hydrocarbon binders - Passive adhesiveness test method of water-free binders in the presence of water

D:

20/07/1998

XPT66-043.DOC

Norme française expérimentale par décision du Directeur Général de l'AFNOR le pour prendre effet le .

norme française

XPT 66-043

correspondance : T 66-043

ICS : 75.140

A la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux internationaux traitant du même sujet. Il existe par ailleurs un sujet de travail traité par le CEN/TC 19/SC 1 et le présent document constitue une contribution à la normalisation dans ce contexte.

T3

analyse: hydrocarbon binders - Passive adhesiveness test method of water-free binders in the presence of water

Le présent document permet de déterminer l'adhéritivité passive entre les liants et les granulats en présence d'eau.

descripteurs: ~~norme française expérimentale par décision du Directeur Général de l'AFNOR le pour prendre effet le .~~

Thesaurus International Technique :

modifications

CRO

A la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux internationaux traitant corrections: ~~du même sujet. Il existe par ailleurs un sujet de travail traité par le CEN/TC 19/SC 1 et le présent document constitue une contribution à la normalisation dans ce contexte.~~

analyse: hydrocarbon binders - Passive adhesiveness test method of water-free binders in the presence of water

Le présent document permet de déterminer l'adhéritivité passive entre les liants et les granulats en présence d'eau.

accordances: ~~norme française expérimentale par décision du Directeur Général de l'AFNOR le pour prendre effet le .~~

informations complémentaires:

Liants hydrocarbonés

BNPé P04

Membres de la commission de normalisation

Président : M Stawiarski

Secrétariat : Melle Toussaint- BNPé

M	BARDET	ESSO SAF
M	BLUET	NORMANDIE LABO SA
MME	BODIN UDRON	SHELL
M	BRULE	JEAN LEFEBVRE
M	CHAMBARD	USIRF-SFERB
M	DELORME	LABORATOIRE REGIONAL DE L'EST PARISIEN
MME	DONY	VIAFRANCE
M	EPINAT	ELF ANTAR FRANCE
M	ETIENNE	MELT
M	EXMELIN	MOBIL OIL FRANCAISE
M	FERRARO MAIA	SOCIETE DES PETROLES SHELL
M	GRIMARD	SOCIETE CHIMIQUE DE LA ROUTE
M	IRASTORZA	USIRF
M	JAMOIS	TOTAL RD
M	JOLIVET	TOTAL RD
M	KILLENS	FINA RESEARCH
M	LOMBARDI	ESSO SAF
M	MARCHAND	EUROVIA
M	MENARD	LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	NICAUD	IFP SAF
M	PHILIPPON	ETB SAF/NORMANDIE LABO SA
M	PLANCHE	ELF ANTAR FRANCE
M	PLANQUE	BP/ELF DUNKERQUE
M	RAMOND	LCPC S.FERB
M	SAMANOS	SCIREG ROUTES REGIONAL DE L'EST PARISIEN
M	SAUTEREAU	SETRA
M	STAWIARSKI	GPB ANTAR FRANCE
M	VANISCOTTE	SOCIETE CHIMIQUE DE LA ROUTE
		MOBIL OIL FRANCAISE

Le présent document a été réalisé par le groupe d'experts POMGE 2, dont l'animateur est M. Chambard, et qui est composé comme suit :

M	BERTAU	H.G.D. SA
M	CHAMBARD	USIRF-SFERB
M	EXMELIN	MOBIL OIL FRANCAISE
M	FERRARO MAIA	SOCIETE DES PETROLES SHELL
MME	FRANCK	CGAS SA
MME	GLITA	COCHERY BOURDIN CHAUSSEES SA
M	JOLY	RTE
M	LEMONNIER	DIRECTION DES ROUTES
M	LOMBARDI	ESSO SAF
MME	MARIOTTI	TOTAL RD
M	MARTINEAU	ELF ANTAR FRANCE
M	MENARD	LRPC S.FERB
M	PASQUIER	GERLAND ROUTES SA

AVERTISSEMENT : L'utilisation de la présente Norme implique l'intervention de produits, d'opérations et d'équipements à caractère dangereux. La présente norme n'est pas conçue aborder tous les problèmes de sécurité concernés par son usage. Il est de la responsabilité de l'utilisateur de consulter et d'établir des règles de sécurité et d'hygiène appropriées et de déterminer l'applicabilité des restrictions réglementaires avant utilisation.

1 Domaine d'application

La méthode s'applique à la détermination de l'adhésivité passive entre les liants et les granulats en présence d'eau. Elle s'applique à tous les liants anhydres, et en particulier aux liants suivants : bitumes purs, bitumes composés, bitumes fluidifiés, bitumes fluidis, goudrons, goudrons composés.

Elle s'applique à tous les granulats. Pour sa réalisation, la fraction 4/6,3 est principalement utilisée.

2 Références normatives

Le présent document comporte, par référence datée ou non datée, des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à cette norme que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

NF T 65-000, Liants hydrocarbonés - Définitions et classification

T 65-001¹⁾, Liants hydrocarbonés - Bitumes purs - Spécifications

T 65-002, Liants hydrocarbonés - Bitumes fluidifiés - Spécifications

T 65-003, Liants hydrocarbonés - Bitumes fluidis - Spécifications

NF T 65-004, Liants hydrocarbonés - Bitumes composés - Spécifications

T 65-021, Liants hydrocarbonés - Goudrons purs - Spécifications

T 65-022, Liants hydrocarbonés - Goudrons modifiés - Spécifications

3 Définitions

Pour les besoins du présent document, la définition suivante s'applique :

3.1 NF T 65-000, Liants hydrocarbonés - Définitions et classification

adhésivité passive

capacité du liant à résister au désenrobage des granulats en présence d'eau.

T 65-003, Liants hydrocarbonés - Bitume et autres hydrocarbures - Tests et essais

4 Principe

T 65-003, Liants hydrocarbonés - Bitume - Tests et essais

Les granulats propres et secs sont enrobés par un liant anhydre.

Les granulats enrobés sont immersés dans l'eau dans des conditions déterminées. La valeur de l'adhésivité est donnée par le pourcentage évalué de surface restant recouverte de liant, après un certain temps d'immersion.

1) en cours de révision - sera remplacé par l'EN 12591

5 Appareillage

Matériel et verrerie courants de laboratoire, ainsi que :

5.1 Etuve, thermostatée, ventilée, permettant une régulation de température de 40 °C à 160 °C ± 5°C au niveau des échantillons ;

5.2 Capsules, de 10 à 20 cm de diamètre environ ;

5.3 Thermomètres, permettant des mesures au degré près des valeurs recommandées ;

5.4 Plaque chauffante.

5.5 Balance précise à 0,1 g

6 Préparation

6.1 Préparation des granulats

Pour une étude liée à un chantier, l'essai est réalisé avec la classe granulaire utilisée pour le chantier ;

Pour une étude de laboratoire, l'essai est réalisé avec la classe granulaire de référence 6/10 (Valeureuse pour les matériaux),

Les granulats sont lavés puis séchés en atmosphère ventilée à 60 °C ± 5 °C pendant 24 h environ.

Puis selon le liant, les granulats sont chauffés conformément aux indications portées dans le tableau 1.

6.2 Préparation des liants

La température est indiquée dans le tableau 1 en fonction des types et des classes définis dans les normes référencées. Le chauffage est effectué dans un récipient clos en évitant toute surchauffe locale et toute perte de constituants volatils.

La durée du chauffage ne doit pas excéder 3 h pour un échantillon de quelques centaines de grammes.

Pour les liants non cités dans le tableau 1, prendre les températures d'utilisation habituelles indiquées par le fabricant.

$$T = 148^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C} \text{ LIANT.}$$

$$+15^\circ\text{C} - GT.$$

Le chauffage doit être effectué dans un appareil à atmosphère ventilée.

Le chauffage doit être effectué dans un appareil à atmosphère ventilée.

Le chauffage doit être effectué dans un appareil à atmosphère ventilée.

Le chauffage doit être effectué dans un appareil à atmosphère ventilée.

Le chauffage doit être effectué dans un appareil à atmosphère ventilée.

Le chauffage doit être effectué dans un appareil à atmosphère ventilée.

modifié + 10°C.

Tableau 1 - Température de chauffage des liants

148

Liants	Température de chauffage du liant °C ± 5 °C	Température de chauffage des granulats °C ± 5 °C
Bitumes purs		
180/220	130	130
70/100	140	140
50/70	145	145
35/50	150	150
20/30	160	160
Bitumes fluidifiés		
0/1	ambiance	40
10/15	60	40
150/250	115	40
400/600	125	40
800/1400	135	40
Bitumes fluxés		
400/800	125	40
800/1600	140	70
1600/3200	150	70
Bitumes-Goudrons		
1200 & 2000	125	40
2500	140	70
Bitumes-Brai		
60	130	
65	145	145
45	150	150
Bitumes composés pétroliers		
1500	130	40
2500	140	70
3500	150	70
Goudrons purs		
11 à 13	100	40
14	105	40
15-16	110	40
Goudrons modifiés		
40-50	100	40
60-70	110	40
80-100	110	70
Bitumes-Goudrons		
1200 & 2000		40

7 Mode opératoire

7.1 Méthode 1 : bitumes purs

Peser dans une capsule 15,2 g de granulats préparés comme indiqué au sous-article 6.1.

Peser 5 g de bitume pur préparé comme au sous-article 6.2 dans une capsule préalablement chauffée à la même température.

Verser les granulats dans le liant et mélanger jusqu'à complet enrobage en maintenant la capsule sur une plaque chauffante (5-10 °C) ; introduire ce mélange dans un bêcher que l'on recouvre d'un verre de montre ; laisser au repos pendant 10 min.

40-50

100

40

60-70

110

40

80-100

110

70

Verser dans le bêcher 300 ml environ d'eau déminéralisée ou distillée, recouvrir d'un verre de montre et laisser reposer 24 h.

Apprécier le pourcentage de surface recouverte d'un film de lant selon la notation indiquée à l'article 8.

7.2 Méthode 2 : bitumé modifiée - bitumé modifié - goudrons - goudrons modifiés - bitumes
composés

Peser dans une capsule 200 g ± 5 g de granulats préparés comme indiqué au sous-article 6.1.

Peser la quantité de liant nécessaire dans une capsule-préalablement chauffée à la même température, soit :

- pour les bitumes fluidifiés et fluidisés une quantité de $11 \text{ g} \pm 0.5 \text{ g}$,
 - pour les goudrons, goudrons modifiés et bitumes-composés, $10 \times d$ grammes (d étant la densité du liant), à 0.5 g près ;

Verser les granulats dans le hant et mélanger jusqu'à complet enrobage en maintenant la capsule sur une plaque chauffante :

Séparer le mélange obtenu en deux parties égales :

- Une partie est placée sur un verre de montre d'environ 15 cm de diamètre et laissée pendant $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ dans l'étuve (5.1) à $80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$; on prendra soin de bien étaler sur le verre de montre les granulats introduits.
 - Au bout de 24 heures :
 - placer le mélange dans un bêcher,
 - recouvrir par 300 ml d'eau déminéralisée ou distillée, couvrir le bêcher avec un verre de montre et laisser $16 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$ dans l'étuve (5-1) à $80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.
 - L'autre partie est introduite dans un bêcher sur lequel on pose un verre de montre le recouvrant. Attendre $30 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$ puis recouvrir le mélange par 300 ml environ d'eau déminéralisée ou distillée; recouvrir d'un verre de montre et laisser $16 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$ à l'ambiance;
 - apprécier pour l'une et l'autre parties le pourcentage de surface recouverte d'un film de fent selon la notation indiquée à l'article 8.

8 Expression des résultats

Les résultats sont exprimés en pourcentage de surface granulaire résistant à la découverte d'un film de liant, selon la notation suivante :

- 100 **saucune surface découverte**
 - 90 **plus de 90% environ des surfaces sont recouvertes** : *malaxer les granulats des*
granulats sont dispersés
de la poudre
 - 75 **75 à 90% environ des surfaces sont recouvertes**
 - 50 **50 à 75% environ des surfaces sont recouvertes**
 - < 50 **moins de 50% environ des surfaces sont recouvertes**
 - 0 **le liant est séparé des granulats**

le liant est séparé des granulats

3. ~~Exhibit 127, page 10, 1963.~~

Spaut dey

9 Fidélité

158

Les critères de fidélité ne sont pas déterminés.

10 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit contenir au moins les informations suivantes :

- a) une référence au présent document ;
- b) les éléments d'identification du filant et des granulats ;
- c) le dopage éventuel réalisé ;
- d) les résultats (voir article 8) ;
- e) les détails opératoires non prévus dans le présent document ainsi que les incidents susceptibles d'avoir une influence sur les résultats ;

f) la date de l'essai.

SECA → Dope
↳ AMINE

Dope à 3% des poids du silicium
3 pour 1000

4%

3 pour 1000

4% pour 1000

ANNEXE 3

Fiche technique du bitume employé

Bitume de grade PG 58-28

152 - 01001

6 * 20 L 152 100 L

CHARACTERISATION DU BITUME / ASPHALT BITUM CHARACTERISATION

INFORMATIONS GÉNÉRALES		ESSAIS DE CARACTÉRISATION					
Fabricant	: Produits Shell Canada	CARACTÉRISTIQUE MÉTRIQUE (Bitume d'origine)					
Lieu de fabrication	: Raffinerie de Montréal-Est	T (°C)	G (mm)	t (sec)	G* (Mpa)	d (g)	G*/sin d (Mpa)
Classe de bitume	[REDACTED]	50	25	12.392	1.100	95.35	1.100
Nom commercial	: Shell Bitume PG 50-30	64	25	12.044	.569	67.16	.569
No de réservoir	: 204.	Température pour G*/sin d = 1.0 Mpa Td = 59.5 °C					
No de lot	: 0205230010513	CARACTÉRISTIQUE MÉTRIQUE (Bitume vieilli ou EXPOT)					
No de fabrication	: 210513	ESSAIS COMPLÉMENTAIRES					
No de sequence	: 020513	T (°C)	G (mm)	t (sec)	G* (Mpa)	d (g)	G*/sin d (Mpa)
No de caractérisation	: 210523.	Point d'éclair (°C) : 110.0	330.5	50	25	9.999	3.126
Stabilité au stockage (°C) : 20.0	.2	64	25	10.105	1.676	63.55	1.603
Réécriture d'élasticité (%) à 10 °C		FLUXION DE FORTER (Bitume vieilli ou EXPOT ou EXP)					
Solubilité (%) à 25 °C	: 99.91	T (°C)	G(60) Mpa	n(60)	T (°C)	G(60) Mpa	n(60)
Masse volumique (g/cm³) à 25 °C	: 1.0079	-10	100.	.333	-10	100.	.333
Porte en masse en EXPOT (%)	: .023	-20	100.	.360	-20	100.	.367
Viscosité Brookfield (Pc) à 135 °C	: .297	Température pour n(60) = 0.300 -19.7 °C					
Viscosité Brookfield (Pc) à 165 °C	: .182	Température pour G(60) = 300 Mpa -23.7 °C					
CARACTÉRISTIQUE MÉTRIQUE		FLUXION DE FORTER (Bitume d'origine)					
Température élevée de caractérisation. Td : 59.5 °C T (°C)	G (mm)	t (sec)	G* (Mpa)	d (g)	G*/sin d (Mpa)		
Température basse de caractérisation. Td : -19.7 °C -10.54	100.	100.	.415	-10	100.	.409	
Autres caractéristiques		Valeur de G60	110. Mpa	Valeur de n60	.412		
Adhérence à la plaque							
Adhérence à la plaque							
Adhérence à la plaque							
Propose par: M. Cliche		Verifié par: Isabelle Roy		Date: JUN. 1 2001			

Température élevée de caractérisation: 59.5 °C | T (°C) | G (mm) | t (sec) | G* (Mpa) | d (g) | G*/sin d (Mpa)

Température basse de caractérisation: -19.7 °C | -10.54 | 100. | 100. | .415 | -10 | 100. | .409

BIBLIOGRAPHIE

- Agence canadienne d'inspection des aliments (2000). *Bleu d'outremer. Ingrédients approuvés pour usage dans les aliments du bétail, annexe IV, partie 1, catégorie 8 : produits divers.*
<http://www.inspection.gc.ca/francais/anima/feebet/sched4/class8bf.shtml>. Consulté le 22 mars 2002.
- Actualités transport (1997). *Les revêtements colorés.*
<http://www.mtq.gouv.qc.ca/innovation/actualites11.pdf>. Consulté le 9 mars 2002.
- AIPCR (1999). *Les liants modifiés, les liants avec additifs et les bitumes spéciaux.* Routes/Roads no. 303, juillet 1999, pp. 121-134.
- APPIA (2000). *Les enrobés de surface Lumichape®, note technique.*
<http://www.appia.fr/fr/prod/pdf/Lumichape.pdf>. Consulté le 9 mars 2002.
- Arnaudet, G., Bondil, R., Nicolas, A. (1999). *Renforcement de la sécurité du tunnel de Las Planas.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 744, page 48.
- Bayer Inc. (1992). *Pigments minéraux pour peintures et revêtements, fiches techniques.* Allemagne.
- Bayer Inc. (1994). *Coloration des enrobés à chaud.* Notice technique, Division Produits Minéraux, Oxydes de fer, France.
- Bayer Inc. (2001). *Bayer Inorganic Pigments, Color for Life.* Allemagne. CD-ROM.
- Bellemare, Y. (2000). *Guide pour la prospection de la pierre dimensionnelle au Québec,* Rapport PRO 2000-06, Géologie-Québec.

- Bérenguier, C. (1980). *Les économies d'énergie et l'éclairage des tunnels routiers.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 561, pp. 11-14.
- Besco, C.-A., Le Mestre, J. (1994). *Sécurité routière. À problème particulier... solution originale.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 715, pp. 46-47.
- Bonniot, F. (1993). *Propriétés rhéologiques des bitumes-polymères.* Mémoire de maîtrise, Département de génie chimique de l'École Polytechnique, Montréal, 224 pages.
- Bourque, P.-A. Page personnelle.
<http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s5/5.2.html>. Consulté en janvier 2002.
- Brailly, M.-C., Rennesson, C. (1995). *Coloration des revêtements routiers et sécurité routière.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 733, pp. 47-49.
- Busschots, K. (1999). *Innovations en matières de revêtements colorés.* Bulletin CRR no. 39, Bruxelles, pp. 7-10.
- CERTU (1997). *Le choix des revêtements colorés à base de bitume ou de résine pour la voirie urbaine, recommandations.* Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques. 101 pages.
- Cottot, M., Godard, É. (2000). *Asphalte clair, la ville en couleurs.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 784, page 20.
- Creton, L., Meunier, Y. (1992). *Techniques routières adaptées à la Ville.* Revue générale des routes et aérodromes, no. 694, page 23.

Chromoroc. *Les agrégats.* <http://www.chromoroc.com/agre0.htm>. Consulté le 28 février 2002.

Deneriaz, C., Marchand, J.-P. (1992). *Collection 1993 : une tendance très urbaine... Revue générale des routes et aérodromes*, no. 702, page 98.

Deterre, R., Foyer, G. (1997). *Introduction aux matériaux polymères*. Lavoisier Technique et Documentation, pp. 114-121.

Dollin, P., Genardini, C. (1992). *Signalisation colorée sur l'aire de Sommesous (A 26 - RN 4)*. Revue générale des routes et aérodromes, no. 702, page 93.

Domecq, J.-J., Sicard, D. (1995). *Les produits colorés à base de bitume ou de résines pour revêtements de voirie urbaine*. Revue générale des routes et des aérodromes, no. 730, page 42.

Douglas, R.J.W., Tremblay, L.-P. (1979). *Géologie et ressources minérales du Canada, Partie A (chapitres I à VII)*. Ministère de l'énergie, des mines et des ressources Canada, Ottawa.

Duong, D. (2001). Communications personnelles. Bitumar.

Eurovia (1999). Fiche technique.

Gauvry, P. (1998). *Un nouveau carrefour pour la ville : le mini-giratoire*. Revue générale des routes et aérodromes, no. 762, page 46.

Gaudreau, R., Houle, P., Doucet, P., Ste-Croix, L., Perreault, S., Lachance, S., Bellemare, Y., Jacob, H.-L., Buteau, P., Marcoux, P. (2000). *Rapport sur les activités d'exploration minière au Québec*. Géologie-Québec, Québec, Canada.

- Girault, J., Ledoux, R. (1994). *Guide pratique d'identification des minéraux.* Les publications du Québec, 133 pages.
- Godebert, H. (1992). *De nouvelles qualités pour l'asphalte.* Revue générale des routes et aérodromes, no. 694, pp. 52.
- Gravet, F. (1996). *Relever les défis de l'intégration urbaine : la contribution des revêtements bitumineux clairs.* Revue générale des routes et aérodromes, no. hors-série, page 67.
- Grimaux, J.-P., Groz, P.-C., Huet, M. (1989). *Les enrobés bitumineux : première partie.* Revue générale des routes et aérodromes, Guide pratique de construction, no. 52, pp. 8-9.
- Groz, P.-C., Masson, G. (1995). *La route prends des couleurs : 1990-1995.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 734, page 46.
- Hamon, J., Verhée, F. (1994). *Prado-Carénage : réalisation de chaussées claires.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 723, pp. 48-50.
- Hans, W. (2001). Communications personnelles. Bayer Inc.
- Hébert, Y., Hébert, R. (1994). *Guide pratique d'identification des roches.* Les publications du Québec, 133 pages.
- Herment, R., Reymonet, J.-P. (1989). *Mexphalte® C et Colclair®, des couleurs pour les chaussées.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 669.
- Herment, R., Huynh, P., Jensen, A. (1997). *La rhéabiliteion du masque d'étanchéité du barrage de Sainte-Cécile d'Andorge par des enrobés bitumineux blancs.* Transactions of the international congress on large dams, vol. 1, pp. 909-938.

Hunter, W. W., Harkey, D. L., Stewart, J. R., Birk, M. L. (2000). *Evaluation of the Blue Bike Lane Treatment used in Bicycle-Motor Vehicle Conflicts Areas in Portland, Oregon.* University of North Carolina, Federal Highway Administration of Virginia, 22 pages.

Kang, W.L., Ju Won, K., Dae Woong, K. (1985). *Development of Color Pavement in Korea.* Journal of Transportation Engineering, Vol. 111, No.3, pp. 292-302.

Journal Shell Bitume (1998). *Les enrobés clairs au Shell Mexphalte C relèvent les nouveaux défis urbains.* Revue Le Liant, no. 16, Paris, France, pp. 6-8.

Landry, B., Mercier, M. (1983). *Notions de Géologie.* Modulo Éditeur, pp. 391-394.

Lassalle, J., Chazal, P., Deligne, P., Duval, J., Langumier, G., Spillemaecker, P.M. (1980). *Liants et enrobés spéciaux.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 568, pp. 104-106.

Lassalle, J., Rémillion, A., Sicard, D. (1981). *Enrobés spéciaux à usages divers.* Revue générale des routes et des aérodromes, supplément au no. 581, pp. 6-8.

Laye, P., Gleize, G., Boubila, M., Brosse, B. (1992). *Des enrobés colorés à Cavillon.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 699, page 43.

Le Coroller, A., Herment, R. (1989). *Shell Mexphalte C and Colas Colclair.* Shell Bitumen Review 64, England, pages 6-10 .

Lesage, J., Groz, P.-C. (1992). *Sécurité et esthétique pour les chaussées urbaines, perspectives nouvelles.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 702, page 93.

- Loustalot, P., Cibray, J.-C., Genardini, C., Janicot, L. (1995). *Bétons bitumineux clairs sur le périphérique parisien. Objectifs, formulations et expérimentations.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 735, pp. 57-60.
- Mandagaran, B. (1992). *La couleur au service de la sécurité.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 694, pp. 50-51.
- Marec, M. (1994). *Comment rendre agréable l'ambiance intérieure d'un tunnel routier?* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 723, page 17.
- Mercadier, J.-C., Pruvost, A., Blanc, J.-P., Vidal, J.-P., Van Grevenynghe, P. (1995). *Opération sécurité sur la Gineste : la couleur.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 730, pp. 67-69.
- Monié, B., Novellas, F., Perrier, J. (1984). *L'éclairage des tunnels routiers, nouvelle méthodologie du Centre d'études des tunnels.* Revue générale des routes et aérodromes, no. 574, pp. 19-32.
- Moxon, S. (1997). *High factor asphalt.* International Water Power and Dam Construction, Vol. 49, no. 9, pp. 28-30.
- MTQ, Laboratoire des chaussées (2001). *Enrobés.* Université de Sherbrooke, Notes de cours GCI-718.
- MTQ, (2000). Enrobés pour construction neuve ou reconstruction. Direction du laboratoire des chaussées.
<http://www2.mtq.gouv.qc.ca/reseau/chaussees/fiches/neuve.pdf>. Consulté le 27 mars 2002.
- Onfield, J.-N. (1996). Les revêtements clairs, une solution lumineuse! Route actualité, pp. 87-89.

- Pannetier, P. (1998). *L'asphalte en ville : un matériau pour un environnement durable.* Revue générale des routes et aérodromes, no. 762, page 43.
- Pannetier, P., Mariaud, R. (1994). *L'asphalte, un matériau urbain.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 722, page 55.
- Pélon, M., Chiavassa, M. (1994). *Des enrobés ocre pour la Ville rose.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 715, page 50.
- Petroplus (2000). Mexphalte-C : *Les couleurs montrent le chemin.* <http://www.petroplus.ch/downloads/fra.pdf>. Consulté le 11 mars 2002.
- Potti, J.J. (1997). *Les enrobés coulés à froid en couleur basés au liant synthétique. Nouvelles applications.* International slurry surfacing association, 4^e Congrès mondial de l'ISSA, Paris, France.
- Rennesson, C. (1996). *Utilisation de la couleur sur chaussée en milieu urbain.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. hors-série 2, page 64.
- Robin, J. (1996). *Les aménagements de sécurité de la voirie urbaine.* Revue générale des routes et aérodromes, no. 743, pp. 66-68.
- Saillet, Y., Cluzaud, J.-M. (2000). *Les jardins Wilson en couverture de l'autoroute A1 à Saint-Denis.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 784, page 40.
- Screq-Est. Aménagements urbains. <http://www.screq-est.fr/pages/5/p5A03e.htm>. Consulté le 26 novembre 2001.
- Serres, A.-M., Legillon, H., Faure, B. (1993). *Couleur et clarté des surfaces routières.* Revue générale des routes et des aérodromes, no. 709, page 27.

Setra (1998). *Coloration des revêtements routiers et sécurité routière. Note d'information 112, France*, pp. 1-4.

Shell Bitumes (1997). *Bouches-du-Rhône : la couleur, c'est la vie. Le journal de Shell Bitumes*, no. 15, pp. 15-17.

Shell Bitumes (1999). *Guide pratique : Les enrobés colorés en ville. Consortium composé de Shell Bitumes, Colas Nord-Picardie, IVF, Lille Métropole, CETE Nord-Picardie*, 27 pages.

Shell Bitumen (2001). *Shell Mxpathalte C. Product Informations*. England.

Siegman et associés (2001). *Santa Cruz Avenue Corridor Study – short term measures*. Palo Alto, California, 16 pages.

Sieys, C. (2001). *La sécurité dans les tunnels du réseau Escota. Revue générale des routes et des aérodromes*, no. 796, pp. 27-32.

Simard, A. (2001). *Le potentiel minéral au Québec : Un état de la question*. Géologie-Québec, 28 pages. <http://www.geologie-quebec.gouv.qc.ca/potentiel/alainar.pdf>. Consulté le 4 mai 2001.

St-Jacques, M., Brosseau, Y. (2002). *Revêtements colorés : expériences françaises et développement possible au Canada*. Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil, Montréal.

Thouret, D., Luizard, D., Goutti, P., Louillot, k., Jokiel, M. (1994). *Des couleurs pour Bordeaux. Revue générale des routes et aérodromes*, no. 723, pp. 62-63.

- Turmel, É., Frinault, T., Deneuvilliers, C. (1995). *Les revêtements de sols coulés à base de résines synthétiques. Revue générale des routes et des aérodromes*, no. 734, page 27.
- Vagt, O. (1999a). *Pierre. Annuaire des minéraux au Canada, Ressources naturelles Canada*. http://www.nrcan.gc.ca/mms/cmy/index_f.html. Consulté le 4 mai 2001.
- Vagt, O. (1999b). *Granulats. Annuaire des minéraux au Canada, Ressources naturelles Canada*. http://www.nrcan.gc.ca/mms/cmy/index_f.html. Consulté le 4 mai 2001.
- Ville de Montréal (1998). *Fiche informative sur l'Enrocolor*. Montréal, 1 page.
- Whiteoak, D. (1991). *The Shell Bitumen Handbook*. Chertsey, Angleterre, pp. 320-323.
- Zündel, P. (1976). *Espaces publics, voies piétonnes : Une place de choix pour l'asphalte*. Revue Asphalte, no. 21, pp. 1-4.
- Zündel, P. (1999). *Asphalte coloré : une contribution à la qualité de l'environnement*. Asphalte - informations, Paris, France.
- Références utilisées pour le glossaire:
- Dreux, G. (1998). *Nouveau guide du béton*. Éditions Eyrolles.
<http://www.campus.ecp.fr/~ville/glossaire.html>. Consulté le 28 février 2002.
- Jacqueline (1990). *Concise encyclopédia of polymer science and engineering*. I. Kroschwitz editor, États-Unis.
- Perraton, D. (2000). *MGC-805 : Matériaux de construction*. Notes de cours, École de technologie supérieure.

Roy, J.-P., Blin-Lacroix, J.-L. (1998). *Le dictionnaire professionnel du BTP*. Eyrolles.

Screq. *Dictionnaire routier*.

USIRF. *Découvrons une usine d'enrobage*.

<http://www.screg-est.fr/pages/7/A/p7A06b/p7A06bC.htm>. Consulté le 11 mars 2002.

- Normes consultées:

AASHTO TP48-97	Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt Binder using Rotational Viscometer
AASHTO TP5-98	Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
ASTM D 70	Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials
CSA A23.2-5A	Détermination des particules fines du tamis de 80 µm
LC 21-065	Détermination de la densité et de l'absorption du GF de classe granulaire d/D
LC 21-100	Détermination du pourcentage de particules fracturées du GG
LC 21-101	Détermination du coefficient d'usure par attrition du GF à l'aide de l'appareil micro-Deval
LC 21-400	Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles
LC 26-003	Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire

LC 26-004	Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du laboratoire des chaussées
LC 26-005	Échantillonnage
LC 26-010	Réduction en laboratoire d'échantillons en vue d'essais
LC 26-040	Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés
LC 26-045	Détermination de la densité maximale
LC 26-0XX	Compactage de plaques d'enrobé en vue d'essais d'orniérage
LC 26-0XX	Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage
LC 26-320	Détermination du pourcentage de vides dans les enrobés à chaud compactés
NF P 98-253-1	Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés
NQ 2501-025	Analyse granulométrique des sols inorganiques
NQ 2560-010	Échantillonnage
NQ 2560-015	Réduction des échantillons pour essais en laboratoire
NQ 2560-040	Analyse granulométrique par tamisage
NQ 2560-045	Détermination de la densité maximale
NQ 2560-065	Détermination de la densité et de l'absorptivité du GF
NQ 2560-067	Détermination de la densité et de l'absorptivité du GG
NQ 2560-070	Détermination du coefficient d'usure à l'aide de l'appareil micro-Deval
NQ 2560-075	Détermination du coefficient d'écoulement des GF
NQ 2560-080	Détermination du coefficient de friabilité des GF
NQ 2560-250	Détermination de la teneur en mottes d'argile et en particules friables
NQ 2560-265	Détermination du pourcentage de particules plates et allongées

NQ 2560-350	Détermination par lavage de la quantité de particules au tamis de 80 µm
NQ 2560-400	Détermination de la résistance à l'abrasion à l'aide de l'appareil Los Angeles
XP T66-043	Essai d'adhésivité passive des liants anhydres en présence d'eau