Évaluation de l'impact des fines sur la résistance à l'arrachement des traitements de surface et caractérisation des mastics bitumineux des matériaux à base d'émulsion de bitume

par

Marc-André BÉRUBÉ

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Sc.A.

MONTRÉAL, LE 10 AVRIL 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Marc-André Bérubé, 2019



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Dharamveer Singh, codirecteur de mémoire
Département de génie civil à Indian Institute of Technology Bombay (IIT Bombay)

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

M. Florian Lafage, membre du jury
Directeur technique chez Bitume Québec

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

LE 22 FÉVRIER 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche Monsieur Alan Carter qui a dirigé ce projet de recherche, de m'avoir éclairci les idées lorsque j'étais dans l'incertitude de la direction à prendre, tout en m'accordant une grande autonomie. Merci à mon co-directeur Monsieur Dharamveer Singh pour m'avoir offert l'expérience d'aller travailler dans le domaine des matériaux bitumineux dans un autre pays, une autre culture. Mon esprit est sorti plus grand et plus ouvert de cette expérience. Enfin, je remercie Monsieur Florian Lafage et Monsieur Daniel Perraton qui ont acceptés de participer au jury de ma soutenance.

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans l'aide précieuse de mes collègues qui ont contribués à l'obtention des résultats en laboratoire. Je tiens à remercier tout particulièrement les techniciens de laboratoire Monsieur Richard Prowt, Monsieur Sylvain Bibeau, et Monsieur Francis Bilodeau pour le temps accordé à mon projet de recherche. Sans vous, je ne sais pas comment j'aurai pu réaliser un travail d'une telle envergure. Merci à Monsieur Sébastien Lamothe pour ses conseils judicieux et son expertise professionnelle qui a su me faire avancer lors de mes doutes. Merci à Mademoiselle Laurence Picard, Monsieur Théophile Kakpo, Monsieur Alexandre Bachand, Monsieur Emmanuel Dion, Monsieur Jordan Ouellet, Monsieur Mounir Boussabnia, et Monsieur Éric Lachance-Tremblay pour avoir agrémenté les journées au travail tout au long de ces années qui m'ont pourtant parue si courtes.

Évaluation de l'impact des fines à l'arrachement dans les traitements de surface et caractérisation des mastics bitumineux des matériaux à base d'émulsion de bitume

Marc-André BÉRUBÉ

RÉSUMÉ

Depuis plusieurs années, différentes entreprises ont montré les avantages économiques et de temps des travaux préventifs. Ces travaux servent à améliorer l'état des routes tout en protégeant le corps de la structure de la chaussée des infiltrations d'eau en augmentant ainsi la durée de vie global de la route. Les premières méthodes de conception des traitements de surface de type *chip seal* ont fait leurs apparitions dans les années 30 avec la méthode Hanson. Avec les compréhensions d'aujourd'hui sur les émulsions de bitume, l'approfondissement des connaissances des matériaux de traitement de surface et des mastics bitumineux a fait l'objet d'un projet de recherche avec le Laboratoire des Chaussée et matériaux Bitumineux (LCMB) en collaboration avec l'*Indian Institute of Technology Bombay* (IITB).

Le présent projet de recherché a pour objectif d'évaluer l'impact des particules fines à l'arrachement dans les mélanges bitumineux à base d'émulsion de bitume destinés aux traitements de surfaces de type *chip seal* ainsi que de développer une méthode de caractérisation pour les mastics des mélanges bitumineux à l'émulsion de bitume. Les essais expérimentaux de la première partie du projet ont permis de mesurer l'arrachement de différents couples agrégat-émulsion de bitume entre deux types de granulats et deux types d'émulsion pour les traitements de surface de type 3 (TS3). La deuxième partie du projet s'intéresse plus particulièrement au mastic des enrobés bitumineux à l'émulsion de bitume. Des essais sur les appareils DENT et DSR ont été réalisés sur des spécimens et la caractérisation de ces derniers a été réalisée afin d'avoir les propriétés mécaniques des mastics bitumineux de matériaux bitumineux à l'émulsion.

Mots clés: traitement de surface, mastic, entretient préventifs, arrachement, émulsion de bitume, filler, DENT, DSR

Evaluation of the Impact of Fillers on Aggregate lost in Surface Treatments Mixture and Characterization of the Cold-Mix Asphalt Mastics

Marc-André BÉRUBÉ

ABSTRACT

For several years, companies have shown benefits of economic and construction time of preventive work. These works serve to improve the condition of the roads while protecting the structure of the roadway from water infiltration and it is increasing the overall life of the road. The first mix-design methods of chip seal surface treatments made their appearance in the early 1930s with the Hanson method. With the new acknowledge of the bitumen emulsions, the deepening of knowledge of surface treatment materials and bituminous mastics has been the subject of a research project with the *Laboratoire sur les Chaussées et matériaux Bitumineux* (LCMB) in collaboration with Indian Institute of Technology Bombay (IITB).

The objective of this research project is to evaluate the impact of the filler in bitumen emulsion mixtures for chip seal and developing a characterization method for bituminous mastics from bituminous mixtures with bitumen emulsion. The experimental tests of the first part of the project made it possible to measure the aggregates loss of different aggregate-emulsion pairs of bitumen between two types of aggregates and two types of emulsion for surface treatments of type 3 (TS3). The second part of the project focuses on asphalt mastic and asphalt emulsion. DENT and DSR tests were performed on specimens and their characterization were performed in order to have the mechanical properties of bituminous mastics from bituminous materials to the emulsion.

Keywords: surface treatment, bituminous mastic, preventive maintenance, aggregates lost, bitumen emulsion, filler, DENT, DSR

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE 5
1.1 Constituant des matériaux de traitement de surface 5
1.1.1 Émulsion de bitume 5
1.1.1.1 Nature des constituants d'une émulsion de bitume..... 6
1.1.1.2 Fabrication d'une émulsion de bitume..... 15
1.1.1.3 Noms et classifications des émulsions de bitume 19
1.1.1.4 Propriétés des émulsions de bitume..... 21
1.1.2 Le granulat 32
1.2 Le matériau bitumineux pour traitement de surface 39
1.2.1 Problématiques des matériaux bitumineux de traitement de surface 41
1.2.1.1 Les dégradations extrinsèques 42
1.2.1.2 Les dégradations intrinsèques 46
1.2.2 Formulation des matériaux bitumineux de traitement de surface 48
1.2.2.1 Méthode Hanson 49
1.2.2.2 Méthode Nouvelle-Zélande 51
1.2.2.3 Méthode Kearby/Kearby modifiée 52
1.2.2.4 Autres méthodes..... 52
1.3 Mastic des mélanges bitumineux à l'émulsion: impact des fines 54
1.3.1 Composants du mastic des mélanges bitumineux à base d'émulsion 54
1.3.2 Cure du mastic des mélanges bitumineux à base d'émulsion..... 55
1.3.3 Formulation de mastic des mélanges bitumineux à base d'émulsion 57
1.3.4 Caractérisation des mastics de mélange bitumineux à base d'émulsion 61
1.4 Sommaire de la revue de la littérature 63

CHAPITRE 2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL 65
2.1 Problématique et objectif de l'étude 65
2.2 Méthodologie 65
2.3 Phase 1) Évaluation de l'influence des fines à l'arrachement dans les traitements de surface par temps froid.....66
2.3.1 Présentation des matériaux à l'étude..... 67
2.3.1.1 Granulats 67
2.3.1.2 Émulsion de bitume 70
2.3.2 Fabrication des éprouvettes pour l'essai résistance à l'arrachement 71

2.4 Phase 2) Développement d'une méthode de caractérisation des mastics bitumineux des enrobés à l'émulsion 77
2.4.1 Présentation des matériaux 78
2.4.2 Préparation des éprouvettes 80
2.4.3 Cure des mastics bitumeux 81
2.4.4 Composition des mastics bitumineux mis à l'étude 82
2.4.5 Dimension des éprouvettes 83

CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS 87
3.1 Phase 1) Évaluation de l'influence des fines sur la résistance à l'arrachement dans les traitements de surface 87
3.1.1 Cure des éprouvettes 87
3.1.2 Résultats de la résistance à l'arrachement 89
3.2 Phase 2 - Développement d'une méthode de caractérisation des mastics bitumineux des enrobés à l'émulsion 91
3.2.1 Résultats au DSR 91
3.2.1.1 Méthode de malaxage 1 91
3.2.1.2 Méthode de malaxage 2 94
3.2.2 Résultat DENT 97

CHAPITRE 4 ANALYSES DES RÉSULTATS 101
4.1 Phase 1 - Évaluation de l'influence des fines sur la résistance à l'arrachement dans les traitements de surface 101
4.2 Phase 2 - Développement d'une méthode de caractérisation des mastics bitumineux des enrobés à l'émulsion 103

CONCLUSION 109

ANNEXE I PROCÉDURE DE FABRICATION D'ÉMULSION DE BITUME AVEC L'ÉQUIPEMENT DU LCMB (EMULBITUME) 111

ANNEXE II FEUILLE DE FORMULATION POUR LES ÉMULSIONS DE BITUME AVEC ÉMULBITUME 119

ANNEXE III FORMULATION D'ÉMULSIONS AVEC L'ÉQUIPEMENT DU LCMB ÉMULBITUME 121

ANNEXE IV FICHES TECHNIQUES DES ÉMULSIONS DE BITUME 147

ANNEXE V PHASE 1) PRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS 151

ANNEXE VI ESSAIS EN LABORATOIRE 155

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 179

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Caractérisation des bitumes selon les essais rhéologiques....11

Tableau 1.2 Usages des émulsions de bitume selon leur classification....20

Tableau 1.3 Synthèse des interactions influençant l'adhérence....31

Tableau 1.4 Origine des granulats....32

Tableau 1.5 Essais de caractérisation pour les granulats de traitement de surface....33

Tableau 1.6 Classification des classes granulaire selon leur granularité....33

Tableau 1.7 Fuseaux granulaires de différents États des États-Unis pour une granulométrie de chip seal....34

Tableau 1.8 Fuseaux granulométrique de spécification pour les traitements de surface (TS) de type *chip seal* du Ministère des Transports du Québec....36

Tableau 1.9 Catégorie de granulat pour le traitement de surface chip seal....38

Tableau 1.10 Résumé des dégradations du traitement de surface de type *chip seal*....47

Tableau 1.11 Valeurs typiques de dosage dans les traitements de surface....49

Tableau 1.12 Méthodes de dimensionnement de traitement de surface utilisées au Canada et aux États-Unis....53

Tableau 1.13 Équivalence en chantier des méthodes de cure en laboratoire des éprouvettes Marshall....56

Tableau 1.14 Composition des mastics bitumineux à l'émulsion....59

Tableau 2.1 Fuseau granulométrique du traitement de surface – Selon la norme 4301 du Ministère des Transports du Québec et granulats à l'étude....67

Tableau 2.2 Granulométries à l'étude après tamisage....68

Tableau 2.3 Caractéristiques des granulats à l'étude....69

Tableau 2.4 Caractéristiques des émulsions de bitume à l'étude selon le fournisseur....70

Tableau 2.5 Types d'éprouvettes mis à l'essai de balayage (arrachement)....76

Tableau 2.7 Propriétés de l'émulsion de bitume 79

Tableau 2.8 Composition des mastics à l'étude.....83

Tableau 2.9 Paramètres des appareils DSR et DENT.....85

Tableau 4.1 Résultats d'arrachement moyen et taux de cure des éprouvettes de traitement de surface 102

Tableau 4.2 hypothèses pour l'analyse de la composition des mastics.....107

Tableau 4.3 Proportions massiques des mastics bitumineux à l'étude.....107

Tableau 4.4 Proportions volumiques des mastics à l'étude de la phase 2.....108

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Effort (en $) pour améliorer l'état de la chaussée en fonction de son âge 1

Figure 1.1 Émulsion : exemple de crémage et de sédimentation.....6

Figure 1.2 Diagramme schématique du processus de distillation.....7

Figure 1.3 Résultats de distillation de trois pétroles bruts 8

Figure 1.4 Schéma de séparation chimique des constituants du bitume.....9

Figure 1.5 Arrangement moléculaire du bitume 10

Figure 1.6 Fonctionnement d'un émulsifiant 14

Figure 1.7 Exemple d'un moulin colloïdal 16

Figure 1.8 Fabrication d'une émulsion de bitume avec un bitume pur 17

Figure 1.9 Exemple de résultats d'essais de viscosité Brookfield pour différents grades de bitume 18

Figure 1.10 Température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression 19

Figure 1.11 Appareil mesurant la viscosité des émulsions de bitume - A) Saybolt Furol. B) Brookfield 22

Figure 1.12 Viscosité (Degrés Engler) en fonction de la teneur en liant, en pourcentage massique 24

Figure 1.13 Étape de la coalescence d'une émulsion de bitume 26

Figure 1.14 Exemple d'adhésion active. Le bitume déplace l'eau à la surface du granulat pour prendre sa place et assurer l'étanchéité. 28

Figure 1.15 Exemple d'arrachement de granulat dû à une pauvre adhésion passive du matériau.....28

Figure 1.16 Illustration de la théorie de l'interaction mécanique.....29

Figure 1.17 Illustration de la théorie de l'interaction électrostatique) 29

Figure 1.18 Illustration de la théorie de l'interaction chimique. - A) Présentation des liaisons chimiques. B) Présentation des interactions de Van des Waals (b) 30

Figure 1.19 Illustration de la mouillabilité d'un matériau....31

Figure 1.20 Schéma du critère de performance McLeod....35

Figure 1.21 Influence de l'angularité des granulats dans le traitement de surface....37

Figure 1.22 Teneur en silice de quelques composés minéraux....38

Figure 1.23 Moments typiques d'interventions des techniques d'entretien d'une chaussée....40

Figure 1.24 Ordre de mise en œuvre des matériaux pour différents types de traitement de surface....41

Figure 1.25 Exemple d'arrachement d'agrégats de décapage dû à l'eau....43

Figure 1.26 Exemple de décapage dû à l'eau. Roulement d'un véhicule sur une surface saturée....43

Figure 1.27 Décohésion typique d'un traitement de surface....44

Figure 1.28 Exemple d'encastrement d'un traitement de surface....45

Figure 1.29 Influence du passage d'un véhicule sur le traitement de surface....48

Figure 1.30 Évolution des vides lors de la fabrication du *chip seal*....50

Figure 1.31 Composition conceptuelle des mélanges de chaussée à l'émulsion de bitume....58

Figure 1.32 Schéma de l'évolution de la rigidité (ratio mastic/bitume original) en fonction de la teneur en filler (en %)....60

Figure 2.1 Diagramme de l'étude....66

Figure 2.2 Fabrication d'une éprouvette pour l'essai de balayage : préparation des disques de feutre asphalté - A) Coupe de disques de 300mm de diamètre dans le rouleau #30. B) Disque mis à l'étuve sous une charge pour 72 heures. C) Disque aplati après l'étuve....72

Figure 2.3 Fabrication d'une éprouvette pour l'essai de balayage: coulage de l'émulsion de bitume. – A) Coulage de l'émulsion sur le disque asphalté dans le gabarit. B) Épandage de l'émulsion à l'aide de la tige de métal. C) Photo après épandage avec gabarit. D) Éprouvette avant la mise en place des granulats....73

Figure 2.4 Fabrication d'une éprouvette pour l'essai de balayage: mise en place et compaction des granulats – A) Dépôt des granulats sur l'émulsion de bitume. B) Ajustement de la répartition des granulats sur l'éprouvette. C) Compaction de l'éprouvette. D) Cure de l'éprouvette à température pièce 75

Figure 2.5 Fabrication de l'éprouvette pour l'essai de balayage : préparation des éprouvettes avant l'essai. – A) Enlèvement du surplus d'agrégats. B) Essai d'arrachement 77

Figure 2.6 Distributions granulaires du filler actif de type cendre volante classes F (FA).....80

Figure 2.7 Préparation des éprouvettes – A) Les deux fillers sont mélangés ensemble avant l'ajout de l'émulsion (méthode de malaxage 1). B) Le filler inerte et l'émulsion sont mélangés ensemble avant d'ajouter le filler actif (méthode de malaxage 2). C) Échantillons après cure.....82

Figure 2.8 Évaluation de la concentration optimale de filler. - A) Concentration de filler à 20%. B) Concentration de filler à 50%. C) Concentration de filler à 70%.....83

Figure 2.9 Exemples d'éprouvette DENT – A) Éprouvette avant 4 heures supplémentaires dans l'étuve à 60°C. B) Éprouvettes après 4 heures à 60°C 84

Figure 3.1 Évolutions moyennes (n=3) de la perte en eau lors de la cure des éprouvettes contenant du gabbro.....88

Figure 3.2 Évolution moyenne (n=3) de la perte en eau lors de la cure des éprouvettes contenant du granite.....89

Figure 3.3 Résultats moyens (n=3) d'arrachement obtenus à l'essai de balayage avec écarts-types 90

Figure 3.4 Résultats au DSR pour les échantillons avec la cendre volante (FA) avec la méthode de malaxage 1 à 10Hz. Module de cisaillement (en haut) et angle de phase (en bas) 92

Figure 3.5 Résultats au DSR pour les éprouvettes avec du ciment ordinaire Portland (OPC) avec la méthode de malaxage 1 à 10Hz. Module de cisaillement (en haut) et angle de phase (en bas).....93

Figure 3.6 Résultats au DSR pour les éprouvettes avec la cendre volante (FA) avec la méthode de malaxage 2 à 10Hz. Module de cisaillement (en haut) et angle de phase (en bas) 95

Figure 3.7 Résultats au DSR pour les éprouvettes avec du ciment ordinaire Portland (OPC) avec la méthode de malaxage 2 à 10Hz. Module de cisaillement (en haut) et angle de phase (en bas).....96

Figure 3.8 Résultats DENT pour les mélanges avec la cendre volante (FA) à une vitesse de sollicitation de 25 mm/min éprouvettes à rebords de 10mm à 15°C 98

Figure 3.9 Résultats DENT pour les mélanges avec le ciment ordinaire portland (OPC) à une vitesse de sollicitation de 25 mm/min éprouvettes pour des rebords de 10mm à 15°C 99

Figure 4.1 Ratios de rigidité (mastic/émulsion) avec la méthode de malaxage 1 à 10 Hz sur une moyenne avec les résultats obtenus aux températures 64°C, 70°C, 76°C et 82°C.....104

Figure 4.2 Ratios de rigidité (mastic/émulsion) avec la méthode de malaxage 2 à 10 Hz sur une moyenne avec les résultats obtenus aux températures 64°C, 70°C, 76°C et 82°C.....106

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BBR	*Bending Beam Rheometer*
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
CSA	*Canadian Standard Association*
CT	Court terme
CTOD	*Crack Tip Opening Displacement*
DSR	*Dynamic Shear Rheometer*
DENT	*Double-Edge-Notched Tension*
FA	Cendre volante *(Fly Ash)*
Ga	Granulat de type gabbro
GBR	Granulat bitumineux recyclé
GF	Granulat fin
GG	Gros granulat
Gr	Granulat de type granite
HR	Humidité relative
LA	Appareil *Los Angeles*
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
LT	Long terme
LOI	*Lost In Oven*
MD	Appareil Micro-Deval
MTO	Ministère des Transports de l'Ontario
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NV	Non vieilli
PG	*Performance grade*
PUC	*Performance uniformity coefficient*
RV	*Rotational Viscosity*
SB	*Styrene-butadiene*
SBR	*Styrene-butadiene rubber*

SBS	*Poly(styrene-butadiene-styrene)*
SFERB	Syndicat des Fabricants d'Émulsions Routières de Bitume
TS3	Traitement de Surface de type 3

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE MESURE

"	Pouce (unité impériale)
°	Degré
°C	Degré Celsius (unité de température)
µm	Micromètre ou micron
cSt	Centistokes
dmm	dixième de millimètre
g	Gramme (unité de masse)
h	Heure
Hz	Hertz (unité de fréquence)
j	Jour
kg/m^3	Kilogramme par mètre cube (unité de masse volumique)
kPa	Kilopascal
km	Kilomètre
km/h	Kilomètre par heure (unité de vitesse)
m	Mètre (unité de longueur)
m/s^2	mètre par seconde carrée (unité d'apesanteur)
m^2	Mètre carré (unité de surface)
m^3	Mètre cube (unité de volume)
mg/l	Milligramme par litre
mm	Millimètre
mm/min	Millimètre par minute
mPa*s	Millipascal seconde
MPa	Mégapascal
N	newton (unité de force)
s	seconde (unité de temps)

SYMBOLES

$	Dollar canadien
θ	Angle contact
δ	Angle de phase
η	Viscosité de la phase aqueuse
ν	Viscosité cinématique
Cu	Coefficient d'uniformité
d	Dimension du plus petit granulat
D	Dimension du gros granulat
D_{20}	Dimension du granulat à 50% passant
D_{50}	Dimension du granulat à 50% passant
D_{80}	Dimension du granulat à 50% passant
E°	Dégrée Engler
g	Accélération de la pesanteur
G*	Module de cisaillement
ρ_1	Densité de la phase
ρ_2	Densité de la phase dispersante
P_{EM}	Profondeur d'encadrement des granulats dans le traitement de surface
P_{2EM}	Deux fois la profondeur d'encadrement des granulats dans le traitement de surface
pH	potentiel d'Hydrogène
T°	Température
V	Stabilité Stocks
w_e	Énergie élastique emmagasinée
βw_e	Énergie plastique emmagasinée

INTRODUCTION

Le traitement de surface (TS), nommé *chip seal*, en anglais, est une technique d'entretien préventive qui permet d'améliorer l'état de la chaussée et d'augmenter sa durée de vie (Adams, 2014). La Figure 1.1 présente l'évolution de l'état d'une chaussée en fonction du temps et démontre qu'elle se dégrade de façon exponentielle avec les années. L'entretien préventif consiste à effectuer une maintenance sur la couche de surface de la chaussée existante lorsque la chaussée est encore dans un état qualifiée de très acceptable, donc qui se situe à l'intérieur la zone verte dans la Figure 1.1 (Trudeau, 2014).

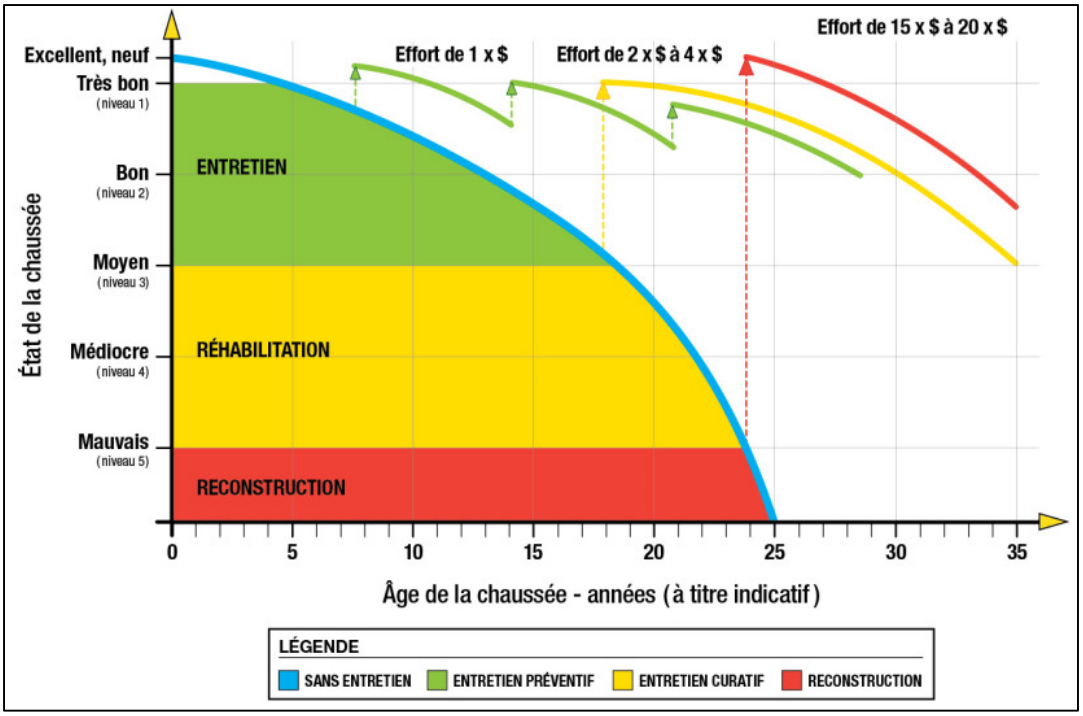


Figure 1.1 Effort (en $) pour améliorer l'état de la chaussée
en fonction de son âge (Tiré de http://entretiendesroutes.ca)

Le *chip seal* est composé d'un liant bitumineux sous forme d'émulsion, qui scelle et protège la chaussée existante, recouvert d'une couche de granulat qui assure une texture suffisante à la résistance au dérapage (Zealand, 2005). Ces deux étapes peuvent être répétées afin d'obtenir un traitement de surface multicouche (SFERB, 1988). Le traitement de surface

monocouche a une durée de vie moyenne de quatre ans et le traitement de surface multicouche peut durer jusqu'à dix ans. Malgré sa courte durée de vie, le traitement de surface offre un excellent rapport qualité-prix lorsqu'il est utilisé au bon moment et correctement (Gransberg & James, 2005).

Le *chip seal* est une méthode de construction très connue au Nouveau-Brunswick (Miller, 1987). Plus de 45% des chaussées au Nouveau-Brunswick sont recouvertes de *chip seal* (MacNaughton & al., 2012). En 2011-2012, le Ministère des Transports du Nouveau-Brunswick a utilisé le traitement de surface sur 789 km de route (Trudeau, 2014). La Nouvelle-Zélande demeure le pays où l'utilisation du *chip seal* est la plus fréquente, plus de 90% de leurs routes étant recouvertes par un traitement de surface (Zealand, 2005).

Au Québec, aucune statistique n'est disponible quant à l'utilisation du traitement de surface. Par contre, un bilan de l'état des chaussées du réseau québécois montre que 496 km sur 1686 km de travaux réalisés ont été des travaux préventifs en 2017, soit 29.4% des travaux totaux réalisés (MTQ, 2018). Le Ministère des Transports du Québec (MTQ) accorde seulement 5% de leur budget total aux interventions préventives (Tremblay, 2008). De plus, le MTQ juge qu'il serait avantageux économiquement de prioriser les travaux préventifs au bon moment, soit 1 an après la construction de la chaussée. Au-delà de ce temps, les coûts reliés à la réhabilitation deviennent plus élevés pour rétablir la qualité de la chaussée (Tremblay, 2008). Dans l'ensemble du réseau routier, 78,9% des routes sont évaluées en bon état et peuvent donc avoir les critères requis pour des travaux préventifs (MTQ, 2018). Les constats actuels au regard de la rentabilité, la rapidité d'exécution et de l'efficacité des travaux préventifs démontrent que le traitement de surface n'est pas assez présent sur les routes du Québec.

Présentement, le traitement de surface s'utilise principalement en double (2 couches) sur des routes secondaires en gravier pour retenir la poussière, sceller la structure existante et augmenter le degré de rugosité (TalonSébeq, 2013). Il peut être aussi installé sur une surface pavée ou retraitée, où il agit en couche de scellement pour protéger des intempéries tout en favorisant l'adhérence et la résistance au dérapage (Trudeau, 2012).

Des études précédentes ont permis de mettre en évidence l'incidence de la composition des traitements de surface sur leur durée de vie. L'interaction entre les composantes des traitements de surface à une influence majeure sur le comportement de ces derniers, et il a été démontré que le choix des fines peut avoir un impact important sur les performances (Gransberg, 2005; Adams, 2014; Zealand, 2005 & Lord, 2008), dont la résistance à l'arrachement.

L'objectif principal de ce mémoire est de montrer l'impact des fines sur la résistance à l'arrachement dans les matériaux de traitement de surface et de promouvoir leurs utilisations au Québec. Pour se faire, une première phase a été réalisée sur le traitement de surface pour évaluer l'aptitude à résister à l'arrachement. Ensuite, afin d'approfondir l'étude de l'interaction entre le filler et le bitume (émulsion), une deuxième phase a été requise pour permettre la caractérisation des mastics bitumineux fabriqués à l'émulsion.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres.

1. Le premier chapitre présente l'état des connaissances sur les traitements de surface, de ses composants et de l'impact des fines dans les matériaux à l'émulsion de bitume pour la caractérisation des mastics bitumineux;
2. Le deuxième chapitre sert à définir la problématique et l'objectif du projet de recherche tout en présentant la méthodologie utilisée;
3. Le troisième chapitre présente les résultats obtenus en laboratoire pour la caractérisation des granulats, des traitements de surface et des mastics bitumineux à l'émulsion à l'étude;
4. Le quatrième chapitre présente la synthèse et l'analyse des résultats obtenus lors de ce projet de recherche et les met en relation avec la théorie présentée au chapitre 1.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Afin de mieux comprendre la problématique du traitement de surface, une revue de la littérature a été effectuée. Ce chapitre traite de l'ensemble des éléments jugés significatifs vis-à-vis le traitement de surface et se présente en trois principales sections : 1) les éléments du traitement de surface; 2) l'étude du traitement de surface et 3) le mastic des mélanges bitumineux à l'émulsion : impact des fines.

1.1 Constituant des matériaux de traitement de surface

Pour les traitements de surface, seulement deux matériaux sont nécessaires : l'émulsion de bitume et le granulat. L'émulsion agit comme une colle qui permet d'assurer l'adhésion avec la chaussée existante tout en l'imperméabilisant, tandis que le granulat permet d'augmenter la texture de surface assurant ainsi la résistance au dérapage.

1.1.1 Émulsion de bitume

Une émulsion est, par définition, un système hétérogène à deux ou plusieurs phases liquides, constituée d'une phase dispersante, et d'au moins une autre phase dispersée sous forme de fines gouttelettes. Pour les émulsions, il s'agit généralement d'une solution lipophile (le bitume) mélangée avec une solution lipophobe (l'eau) (Ilias, 2015). Comme présenté à la Figure 1.1, ces deux solutions se séparent après un certain temps, soit par crémage ou par décantation, car elles sont non-miscibles : elles forment un mélange hétérogène et ne peuvent donc pas se mélanger ensemble (Dupasquier, Nazari, Fontaine-Vive, Fernandez, & Golebiowski, 2016). Lorsque mélangées, la viscosité de l'émulsion tend vers celle de la phase dispersante et ses caractéristiques varient en fonction du temps. Afin d'améliorer la stabilité de l'émulsion, des émulsifiants et une solution basique ou acide sont utilisés (Durand, Poirier, Richard, & Lenfant, 2011). Une définition plus précise de ces additifs est présentée plus loin dans ce chapitre.

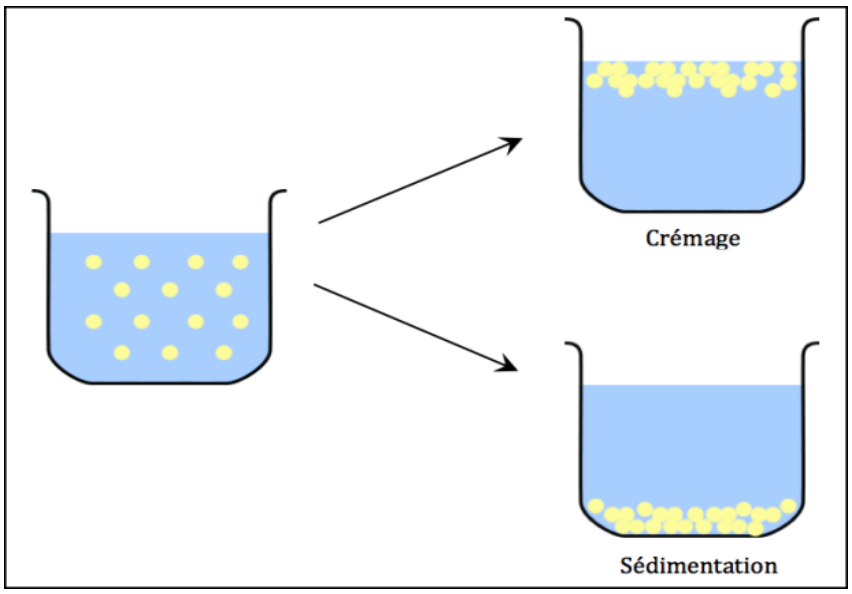


Figure 1.1 Émulsion : exemple de crémage et de sédimentation
Tirée de Dupasquier et al. (2016)

1.1.1.1 Nature des constituants d'une émulsion de bitume

Les deux composants principaux de l'émulsion de bitume sont le bitume (la phase dispersée) et l'eau (la phase dispersante). Afin d'obtenir une émulsion stable avec les caractéristiques désirées, des additifs supplémentaires sont ajoutés. Cette section présente les composants de l'émulsion de bitume.

Le bitume

Le bitume est le principal constituant des émulsions de bitume. Il est composé d'un mélange d'hydrocarbures provenant de la distillation par fractionnement du pétrole (Guissi, 2016). La Figure 1.2 présente le procédé de distillation du pétrole brut. Il consiste à effectuer une première distillation à une température de 85 à 330 °C en pression atmosphérique, et à récupérer le résidu non distillé (Trudeau, 2012). La distillation atmosphérique est utilisée pour séparer les composants légers, combustibles selon leur point d'ébullition, et récupérer le résidu de la première distillation appelé « résidu atmosphérique ». Afin d'enlever les

dernières traces des fractions légères et d'éviter la transformation thermique des molécules, le résidu atmosphérique est ensuite amené dans une colonne de distillation sous vide. La température de distillation sous vide varie entre 345 et 450 ºC (Eurobitume, 2015). Le bitume est le résidu de la distillation sous vide.

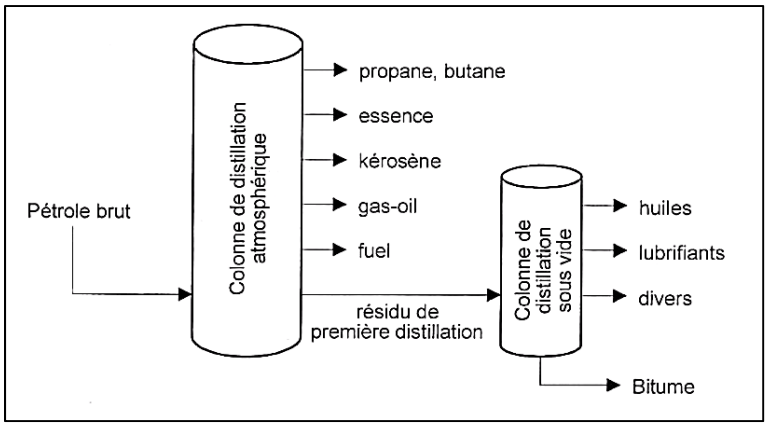


Figure 1.2 Diagramme schématique du processus de distillation
Tirée de Eurobitume (2015)

La proportion et la qualité du bitume récupéré dans la distillation dépendent grandement de la composition du pétrole brut. La Figure 1.3 présente les résultats de distillations de trois différents pétroles bruts. Comme montré sur la Figure 1.3, le pétrole brut avec la plus grande densité fournie le plus de bitume.

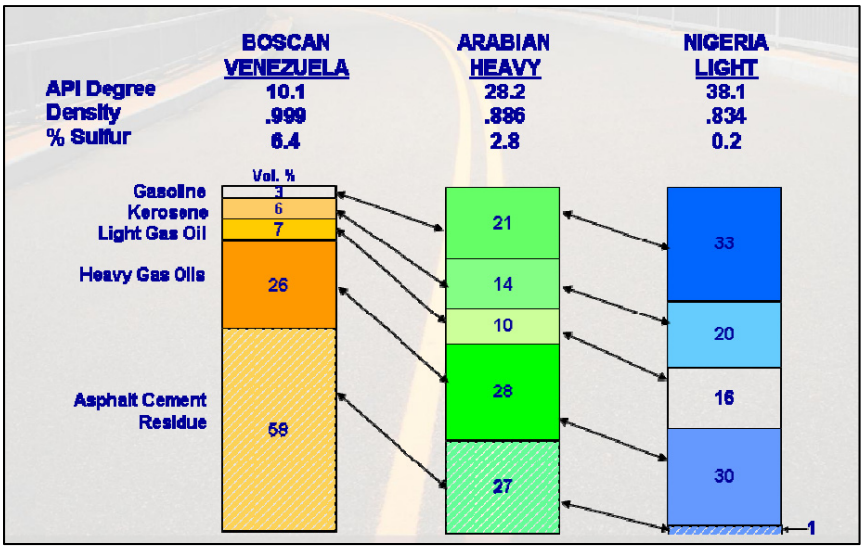


Figure 1.3 Résultats de distillation de trois pétroles bruts
Tirée de Trudeau (2012)

Composition du bitume

La composition chimique du bitume pur dépend également du pétrole brut. Afin d'obtenir la composition du bitume, on utilise l'analyse SARA à l'aide de tamis chimiques. Celle-ci consiste à regrouper les différents constituants au sein de 4 grandes familles : les asphaltènes, les résines, les saturés et les aromatiques (Trudeau, 2012). La Figure 1.4 présente la méthode de séparation des constituants. La première étape consiste à isoler les asphaltènes par précipitation des composés insolubles dans un hydrocarbure saturé de poids moléculaire faible. La partie insoluble est nommée asphaltène et la partie soluble est nommée maltène. La seconde étape consiste à séparer les maltènes en trois familles (résines, saturés et aromatiques) en utilisant la chromatographie sur gel de silice ou d'alumine (Perraton & Olard, 2013).

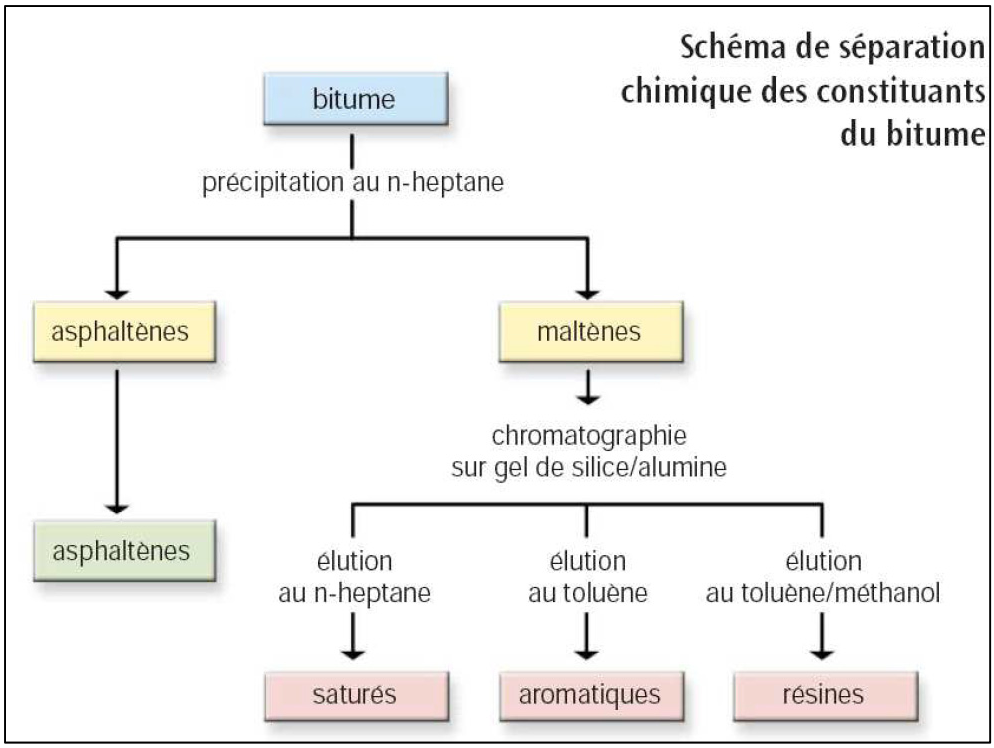


Figure 1.4 Schéma de séparation chimique des constituants du bitume
Tirée de Trudeau (2012)

Les asphaltènes sont donc dispersés dans les maltènes et sont des molécules à masse molaire très élevée. Ils sont composés principalement de carbone et d'hydrogène, mais contiennent également du soufre, de l'oxygène, de l`azote et certaines molécules métalliques à faible dosage (Lamothe, 2004; Ziyani, 2016). La Figure 1.5 montre l'arrangement moléculaire du bitume de types Sol et Gel (Chailleux & Hammoum, 2014). Le bitume de type Gel est riche en asphaltène et a une phase maltène pauvre en hydrocarbures aromatiques. Le bitume de type Gel a un comportement élastique. La structure de type Sol est une solution d'asphaltènes dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines. La phase maltène est riche en aromatique et on y observe un comportement visqueux. Les maltènes sont la partie dissoute du bitume et sont classés en trois familles distingues (Chailleux & Hammoum, 2014):

- Les saturés : Une chaîne droite non polaire et d'hydrocarbures aliphatiques ramifiés ;
- Les aromates : aliphatiques ramifiés non polarisés avec des insaturés ;
- La résine : Ce composant se situe dans les aromates et a la même composition que les asphaltènes, mais possède une masse molaire moins élevée.

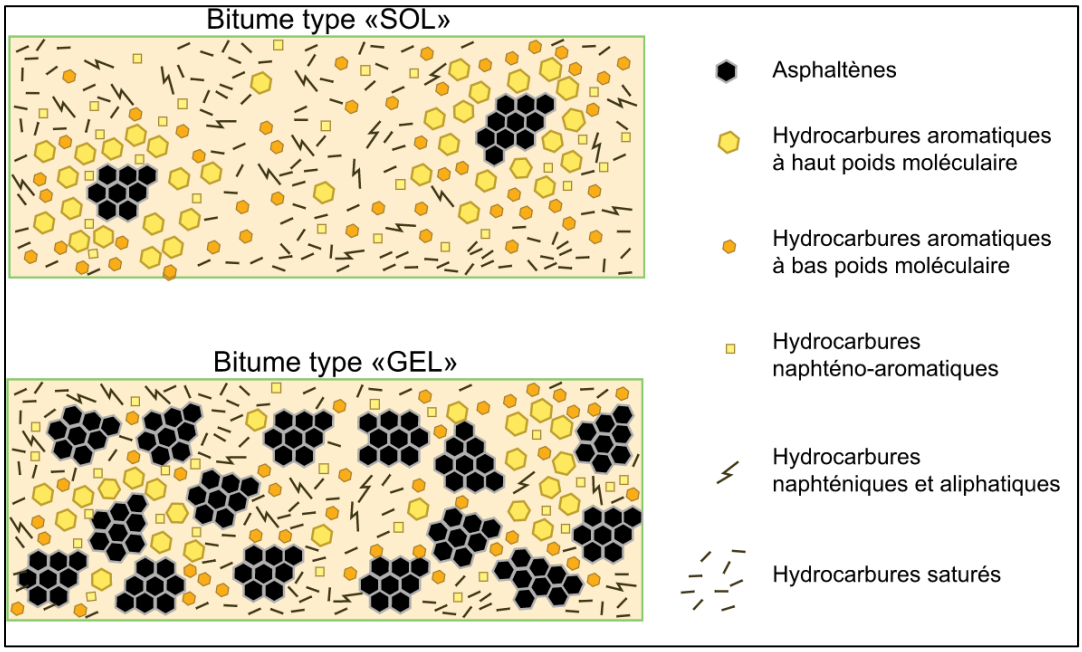


Figure 1.5 Arrangement moléculaire du bitume
Tirée de Chailleux & Hammoum (2014)

Le bitume est le matériau de choix pour la formulation de traitement de surface de type *chip seal* car il empêche l'eau de pénétrer dans la structure de la chaussée. Il scelle la totalité de la partie supérieure de la chaussée et retient les granulats déposés sur lui grâce à ses propriétés cohésives et adhérentes (Zealand, 2005).

Au Québec, le bitume est classifié depuis la classification *Performance Grade* (PG XX-XX) de *Superpave* selon des essais rhéologiques qui déterminent les limites de températures à laquelle le bitume conserve un comportement adéquat (MTQ, 2016). Par exemple, un bitume PG 58-28 conserve ses propriétés désirées entre -28°C et 58°C. Le Tableau 1.1 montre la caractérisation des bitumes selon les essais rhéologiques (Lamothe, 2004).

Tableau 1.1 Caractérisation des bitumes selon les essais rhéologiques
Tiré de Lamothe (2004)

Essai rhéologique	Caractéristique	Vieillissement [A]			Température d'essai	Exigence
		NV	CT	LT		
Viscosimètre rotatif (RV)	Maniabilité [B]	X			135 et 165°C (très élevée)	Norme 4101* AASHTO T316
Rhéomètre de cisaillement dynamique (DSR)	Résistance à l'orniérage	X[C]	X		52 à 76 °C (élevée)	Norme 4101* AASHTO T315
Rhéomètre de faisceau de flexion (BBR)	Résistance à la fissuration thermique	X [C]		X	-36 à -18°C (Basse)	Norme 4101* AASHTO T313
Récupération de fluage multistress (MSCR)	Résistance à la fissuration par fatigue		X[C]		52 à 64°C (élevée)	Norme 4101* AASHTO T350

[A] Bitume non vieilli (NV) : bitume d'origine ;
Bitume vieilli à court terme (CT) : soumis à l'essai au four à pellicule mince (RTFOT);
Bitume vieilli à long terme (LT) : soumis au RTFOT et à l'essai de récipient de vieillissement sous pression (PAV).
[B] Sert à la détermination des températures de malaxage et compactage.
[C] Pour le contrôle du bitume et non sa classification.
* Exigences spécifiées dans MTQ (2016).

Pour la fabrication des émulsions, tous les types de bitumes peuvent être utilisés. Les essais de caractérisations pour les émulsions de bitume sont tous effectués sur les bitumes non vieillis. Une des caractéristiques les plus importantes pour la fabrication d'une émulsion de bitume est la viscosité du bitume qui permet de connaître la température idéale d'émulsification (SFERB, 1988). Les bitumes les plus couramment utilisés sont les bitumes de grade PG 52-34, PG 58-28 et PG 64-28, car ils sont plus faciles à émulsionner et offrent une meilleure stabilité au stockage (Eurobitume, 2015). Les bitumes purs plus durs sont plus difficiles à fractionner et donnent des émulsions moins stables à moins de les modifier.

Modification du bitume

Afin de modifier les propriétés du bitume à différentes températures, des additifs sont ajoutés (Gibson, 2005). Avant d'utiliser des additifs, on peut effectuer une modification en

mélangeant deux grades de bitumes ensemble. Le bitume mélangé aura des propriétés situées dans l'intervalle des deux bitumes utilisés. Pour augmenter la rigidité d'un bitume, on peut l'oxyder en introduisant de l'air dans le bitume chaud (Eurobitume, 2015). Les additifs sont ajoutés au bitume chaud et ils sont malaxés ensemble pendant un temps établi par leur fabricant (Perraton & Olard, 2013). Il est à noter que l'approfondissement de ces additifs ne fait pas partie de l'étude de ce mémoire, mais qu'une mention est nécessaire.

Polymères / latex

Afin d'obtenir les propriétés requises pour un intervalle de température représentatif, des polymères naturels ou synthétiques (SBS, SBR et SB) sont utilisés. Au Québec, les polymères sont utilisés afin d'augmenter la rigidité et l'élasticité du bitume à haute et à basse température respectivement (Perraton, 2013). Un dosage typique de polymères dans le bitume varie de 1% à 3%, mais peut aller jusqu'à 7% pour des applications spécifiques (Eurobitume, 2015).

Fluxant

Le fluxant a pour principal rôle de diminuer la température de malaxage et de compaction. Conséquemment, il augmente la capacité de pénétration à l'aiguille. Le fluxant peut être de nature végétale (ex : huile de soya) ou organique (ex : diesel, kérosène) (Zealand, 2005).

Autres additifs

Afin de réduire la température de malaxage et de compaction sans trop modifier les propriétés du bitume, des additifs pour enrobés à tiède ont été développés (Hurley & Prowell, 2005). Pour augmenter l'adhésion entre le granulat et le bitume, des agents promoteurs d'adhésion sont utilisés (Nobel, 2000). Dans certains cas, du sel (NaCl) peut être ajouté au bitume pour modifier ses propriétés émulsifiantes (Basu, Nandakumar, & Masliyah, 1998; SFERB, 1988).

L’eau

L’eau est le deuxième composant principal de l’émulsion et le principal de la phase aqueuse. Elle est généralement récoltée à partir du réseau d’aqueduc public, mais elle doit contenir le moins d’impuretés organiques et minérales possible (SFERB, 1988). Il est recommandé de permuter l’eau à l’aide d’appareils appropriés. La permutation consiste à remplacer les ions de calcium et de magnésium par des ions de sodium. Le calcium et le magnésium réagissent avec les émulsifiants et forment des composants non solubles dans l’eau, et font en sorte que les émulsifiants perdent leurs propriétés émulsifiantes (Baumgardner, 2006). Afin d’éviter ces inconvénients, la concentration maximale d’ions magnésium est fixée à 150 mg/l et 200 mg/l pour les ions calcium (Corté & Benedetto, 2004).

Les agents chimiques : l’émulsifiant et l’acide/base

Les agents chimiques permettent d’améliorer la stabilité au stockage des émulsions en abaissant la tension à la surface des gouttelettes de bitume (SFERB, 1988). La Figure 1.6 présente des émulsifiants qui adhèrent à la surface d’une gouttelette de bitume. L’émulsifiant est constitué d’une radicale apolaire (la queue) lui conférant des propriétés hydrophobes ou lipophiles et, l’autre partie (la tête), est constituée d’un groupement polaire lui conférant des propriétés hydrophiles (Ziyani, 2016). Lors de l’émulsification de l’émulsion, la partie lipophile franchit la gouttelette de bitume et la tête hydrophile reste à la surface de la gouttelette de façon à recouvrir la totalité de la surface de la gouttelette.

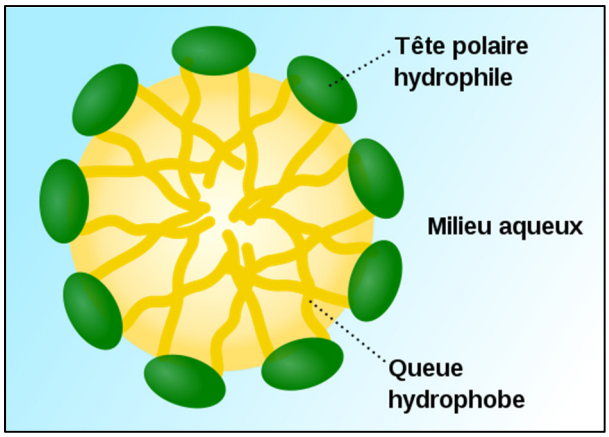


Figure 1.6 Fonctionnement d'un émulsifiant
Tirée de Accolas & Robrier (2010)

Les gouttelettes de bitume restent ensuite en suspension dans le milieu aqueux et se repoussent les unes des autres par répulsion polaire, ce qui permet d'avoir une stabilité au stockage (Needham, 1996). D'autres informations sur la stabilité au stockage sont présentées plus loin dans ce chapitre. Le taux d'émulsifiant à utiliser dépend du type d'émulsifiant et du type d'émulsion (LeBec, 2012). Un taux d'émulsifiant plus élevé amène à une meilleure stabilité et une rupture plus lente (Nobel, 2000).

Pour activer les émulsifiants et assurer la stabilité, des composants acides ou basiques sont utilisés, dépendamment du type d'émulsifiant. L'acide chlorhydrique (HCl), l'acide phosphorique (H_3PO_4) et l'acide acétique (CH_3COOH) sont les trois acides les plus utilisés dans la fabrication des émulsions cationiques. Le potassium (K) et l'hydroxyde de sodium (NaOH) sont les bases principalement employées pour les émulsions anioniques (Nobel, 2017). Le choix de l'acide ou de la base à utiliser dépend du type d'émulsifiant, de la disponibilité et de l'utilité de l'émulsion (James, 2006).

En outre, l'acide phosphorique donne une couleur plus noire au matériau final qu'avec l'utilisation d'acide chlorhydrique. Les mélanges formulés avec l'émulsion au H_3PO_4 restent maniables plus longtemps que celui formulé avec le HCl. De plus, le pH des émulsions au

H_3PO_4 est plus élevé qu'avec le HCl, ce qui diminue la corrosion, puisqu'un pH acide cause plus de corrosion (James, 2006).

1.1.1.2 Fabrication d'une émulsion de bitume

Pour fabriquer l'émulsion de bitume, il est primordial d'apporter une énergie mécanique afin de fractionner le bitume en gouttelettes et de disperser ces gouttelettes à travers la phase aqueuse (Nobel, 2000; SFERB, 1988). Pour obtenir cette énergie, différents types de mélangeurs existent dans l'industrie. La plupart des mélangeurs sont des moulins colloïdaux, composés d'une partie fixe, nommée Stator, et d'une partie mobile, le Rotor. L'espace entre ces deux éléments se nomme Entrefer. La Figure 1.7 présente le moulin colloïdal utilisé pour la fabrication des émulsions de bitumes à l'École de Technologie Supérieure.



Figure 1.7 Exemple d'un moulin colloïdal

Certains moulins ont un entrefer ajustable qui permet de mieux maîtriser la distribution des gouttelettes dans l'émulsion. De plus, la vitesse du moulin joue un impact sur la

granulométrie des gouttelettes de bitume. Plus la vitesse du rotor augmente, plus les gouttelettes de bitume sont petites et la stabilité sera augmentée (Gingras, Tanguy, Mariotti, & Chaverot, 2005; Marchal, Julien, & Boussad, 1993).

L'équipement permettant la fabrication des émulsions doit avoir deux réservoirs : un qui reçoit le mélange de la phase aqueuse et un qui reçoit le bitume. Afin de produire de plus grandes quantités, l'équipement peut être conçu pour fonctionner en continu. Tous les constituants sont entreposés à la température requise et sont amenés à l'aide de pompes à leurs cuves respectives. La Figure 1.8 présente le procédé d'émulsification d'un bitume pur (Lebec, 2005b). Afin de diminuer la viscosité du bitume et de faciliter l'émulsification, des fluxants/fluidifiants peuvent être utilisés (Buss, Guriguis, Claypool, Gransberg, & Williams, 2016; SFERB, 1988; Wijk, Adriaan, & Wood, 1983; Ziyani, 2016).

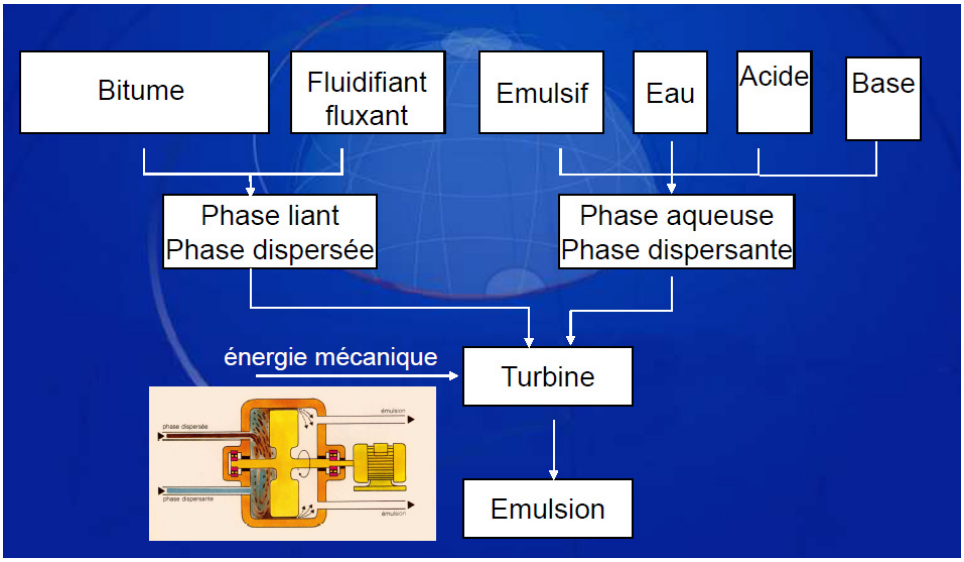


Figure 1.8 Fabrication d'une émulsion de bitume avec un bitume pur
Tirée de Lebec (2005a)

Dû à ses propriétés thermosensibles, le bitume possède une viscosité trop élevée pour être émulsifié à température ambiante. Il faut donc le chauffer afin d'atteindre une viscosité dynamique de 200 mPa*s (SFERB, 1988; Ziyani, 2016). À cette viscosité, le bitume présente les meilleures caractéristiques pour être émulsifié. L'essai Brookfield permet de déterminer

la viscosité du bitume à différentes températures (Needham, 1996). La Figure 1.9 présente un exemple de résultats pour trois grades de bitume. L'essai est réalisé à deux températures (135°C et 165°C) et une interpolation est effectuée pour déterminer la température optimale d'émulsification du bitume. Par exemple, un bitume de grade PG 52-28 doit être à une température de 145°C et un bitume de grade PG 64-28 demande une température de 158°C pour obtenir la viscosité désirée à la fabrication des émulsions.

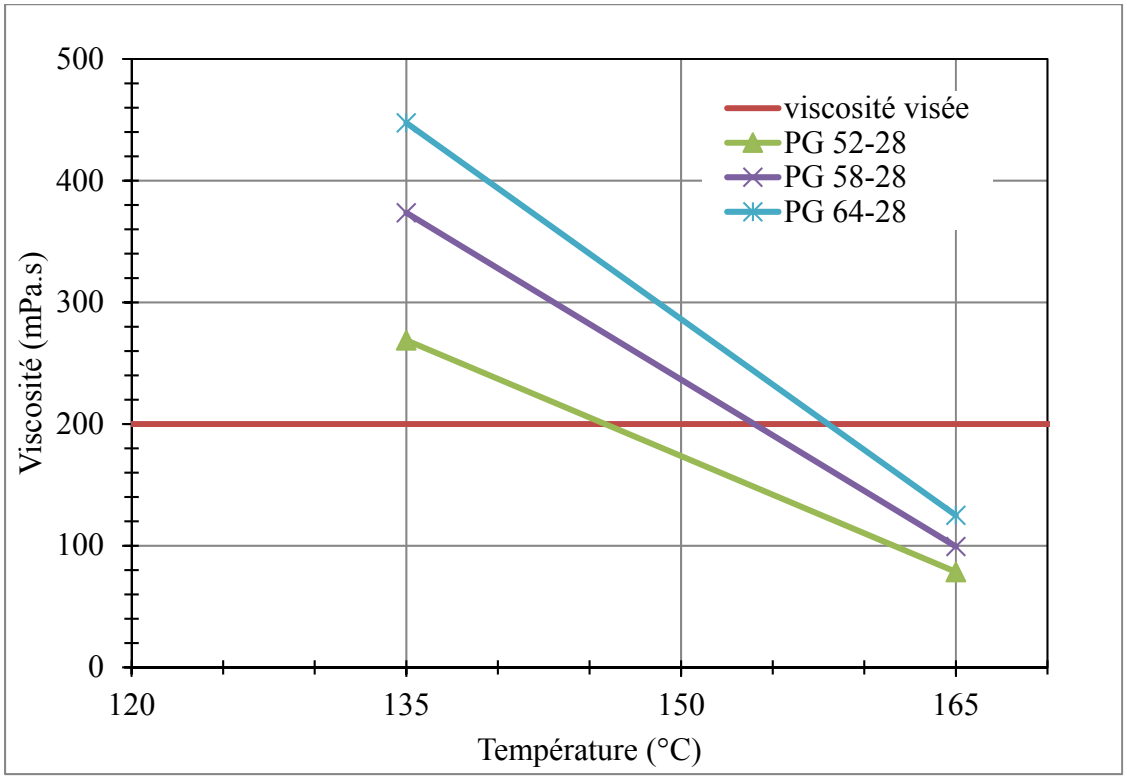


Figure 1.9 Exemple de résultats d'essais de viscosité Brookfield
pour différents grades de bitume

La phase aqueuse demande d'être légèrement chauffée pour augmenter la solubilisation de l'émulsifiant (Lebec, 2005a). Une température de 40°C est nécessaire pour la plupart des émulsifiants. La température de sortie de l'émulsion ne doit pas dépasser la température d'ébullition de l'eau au risque de causer une instabilité de l'émulsion (Baumgardner, 2006). La relation entre la température de l'émulsion à la sortie du moulin colloïdal et les paramètres de fabrication sont représentés avec la formule suivante (Needham, 1996):

$$\frac{[(B * T^{o}{}_{Bitume} * 0{,}5) + (A * T^{o}{}_{Savon} * 1)]}{[(B * 0{,}5) + (A * 1)]} = T^{o}{}_{Émulsion} \quad (1.1)$$

Où 0,5 et 1 sont les chaleurs spécifiques du bitume et de l'eau respectivement et A et B sont les teneurs massiques de la phase aqueuse et du bitume. Afin d'éviter l'ébullition de l'eau dans l'émulsion, la température à la sortie doit rester en dessous de 95°C. Lorsque la température à la sortie dépasse cette valeur, on doit utiliser une chambre de pression. Comme présenté à la Figure 1.10, la température d'ébullition de l'eau varie en fonction de la pression atmosphérique. L'Annexe I présente plus en détail l'équipement de fabrication d'émulsion de bitume de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) ainsi que sa procédure d'ouverture et d'utilisation.

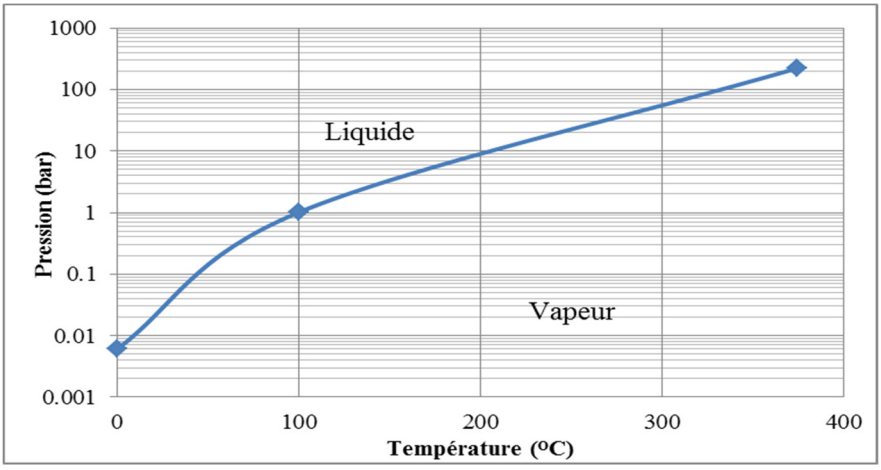


Figure 1.10 Température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression

1.1.1.3 Noms et classifications des émulsions de bitume

Au Québec, les émulsions de bitume sont divisées en deux grandes classes selon leur charge: anioniques ou cationiques (Trudeau, 2003). Les émulsions anioniques n'ont généralement aucun préfixe et les émulsions cationiques sont identifiées par le préfixe « C ». Les émulsions anioniques peuvent avoir parfois le préfixe « HF » qui mentionne la flottabilité élevée du bitume utilisé (*High Flottability*) (Lebec, 2012). Les émulsions sont ensuite classifiées selon

leur vitesse de rupture : Rupture rapide (*Rapid Setting*), Rupture moyenne (*Medium Setting*), Rupture lente (*Slow Setting*). Les émulsions portent en symbole les initiales de la rupture en anglais. Par exemple, une émulsion cationique à rupture rapide se nomme CRS et une émulsion anionique à rupture lente SS. Il est à noter que pour les émulsions à rupture lente, une appellation *Quick Setting* est attribuée pour les émulsions destinées aux enrobés coulés à froid (ECF) (LeBec, 2012). Une émulsion nommée CQS-1 est donc une émulsion à rupture lente. Les émulsions sont finalement classifiées en fonction de leurs viscosités. On indique 1 à la fin de l'émulsion lorsque la viscosité est faible et 2 lorsqu'elle est élevée. Une émulsion nommée CRS-2 est donc une émulsion à rupture rapide avec une viscosité élevée. Afin de préciser la composition des émulsions, les suffixes suivants sont utilisés (Redman, 2010) :

- p : Présence de polymère dans l'émulsion
- h : Viscosité du bitume utilisé élevée (bitume dur)
- H : Présence d'huile
- LM : Émulsion modifiée au latex

Le Tableau 1.2 présente les applications des émulsions de bitume.

Tableau 1.2 Usages des émulsions de bitume selon leur classification
Adapté de Lebec (2012)

Rupture rapide					
Application	CRS-1 RS-1	CRS-2 RS-2	CRS-1p RS-1p	CRS-1p RS-1p	CRS-1h RS-1h
Émulsion d'accrochage	X		X		X
Traitement de surface (*chip seal*)		X(1)		X(1)	
Cape-Seal (partie enduit)		X(1)		X(1)	
Sand-seal		X		X(1)	
Rupture moyenne					
Application	CMS-2 MS-2		CMS-2h MS-2h		

	HFMS-2		
Traitement de surface (*chip seal*)	X(1)		X(1)
Cape-Seal (partie enduit)	X(1)		X(1)
Recyclage en place Type I, II et III	X(1)		X(1)
Enrobé à froid, stockabilité limitée	X(1)		X(1)
Rupture lente			
Application	CSS-1 SS-1	CSS-1h SS-1h	CSS-1p SS-1p	CQS-1H CQS-1HP CQS-1HLM
Émulsion d'accrochage	X(2)	X(2)	X(2)	
Émulsion d'imprégnation	X(2)	X(2)		
Abat-poussière	X(2)	X(2)		
Fog-seal	X(2)	X(2)		
Recyclage en place Type I, II et III	X(1)	X(1)	X(1)	
Recyclage en centrale	X(1)	X(1)		
Cape-Seal (ECF)				X(1)
Enrobés coulés à froid				X(1)
Enrobé à froid, stockabilité limitée	X(1)	X(1)		

(1) Nécessite une étude de formulation avec les granulats utilisés
(2) Dilué avec de l'eau

Pour le traitement de surface de type *chip seal*, l'émulsion de bitume recommandée doit avoir une viscosité élevée et une rupture rapide à moyenne.

1.1.1.4 Propriétés des émulsions de bitume

On sépare les propriétés des émulsions en deux familles : les propriétés intrinsèques et les propriétés d'utilisation. Les propriétés intrinsèques des émulsions de bitume sont le pH, la conductivité, la teneur en eau, la taille et la distribution granulométrique des gouttelettes de bitume (Ziyani, 2016). Les propriétés d'utilisation sont l'adhésivité, la montée en cohésion, la viscosité et la rupture (Lebec, 2005a).

Les propriétés intrinsèques dépendent de la fabrication de l'émulsion. Les principales composantes d'une émulsion sont : le bitume, l'eau, l'émulsifiant et l'acide/base. Certaines émulsions contiennent des matériaux supplémentaires tels que des polymères, du latex ou des fluxants afin de modifier les propriétés finales du produit. Le dosage de chaque matériau

affecte donc les propriétés de l'émulsion de bitume. De plus, les paramètres de fabrication affectent les propriétés intrinsèques (SFERB, 1988).

Viscosité des émulsions de bitume

La viscosité de l'émulsion permet aux utilisateurs de déterminer les températures de pompage lors du transfert dans les canalisations. De plus, la viscosité de l'émulsion permet de connaître la température d'enrobage (Perraton, 2013).

La viscosité Saybolt Furol (SF) est la méthode d`essai utilisée pour évaluer les critères de performances des émulsions au Québec (ASTM, 2011). L`essai consiste à mesurer l'écoulement d'un volume d'émulsions connu à l'aide d'équipements normalisés qui sont présentés à la Figure 1.11. Les résultats sont présentés en secondes. Il est aussi possible de mesurer la viscosité dynamique à l`aide d`un appareil *Brookfield* qui applique une force de mouvement en rotation à un élément de taille, de forme et de poids fixe immergé dans un fluide (ASTM, 2015). L`appareil, présenté à la Figure 1.11, traduit la résistance du fluide au mouvement de rotation de l`élément en viscosité dynamique en mPa*s.

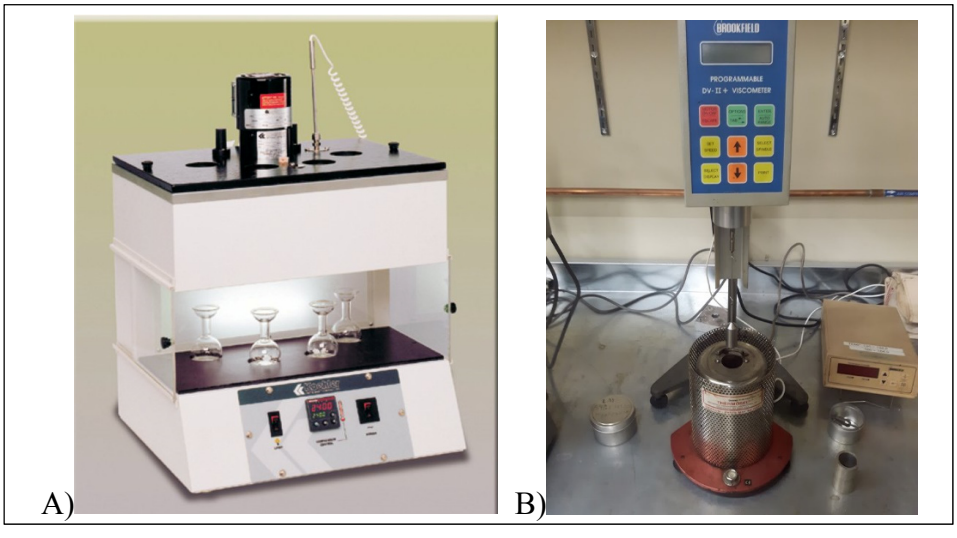


Figure 1.11 Appareil mesurant la viscosité des émulsions de bitume - A) Saybolt Furol. B) Brookfield

La France utilise un appareillage spécifique de la viscosité cinématique d'Engler (SFERB, 1988). La température d'essai de toutes les émulsions de bitumes testées est 25°C et la viscosité est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$\nu = 7.5 * (E - \frac{1}{E}) \quad (1.2)$$

Où :

ν = Viscosité cinématique en centistokes (cSt);

E = Degré d'Engler (°E).

Une émulsion est qualifiée de fluide lorsque sa viscosité se situe entre 2 et 6 cSt, de semi-fluide lorsque sa viscosité se situe entre 6 et 15 cSt et de visqueuse lorsqu'elle est située entre 15 et 30. Il est à noter que pour obtenir la viscosité dynamique en mPa*s, il faut multiplier la viscosité cinématique en cSt par la densité du fluide (AMCO, 2015). Les principaux paramètres qui influent la viscosité sont (Needham, 1996; SFERB, 1988):

- La viscosité augmente de façon exponentielle avec la teneur en bitume (figure 1.12);
- La viscosité de la phase dispersante ;
- La proportion de sel dans le bitume. La viscosité augmente avec la concentration en sel dans le bitume à cause de l'augmentation de la dimension des particules;
- La température de l'émulsion;
- La présence d'additifs dans l'émulsion de bitume, le bitume ou la phase dispersante;
- Le type et quantité d'émulsifiants;
- La distribution granulométrique des particules de bitume.

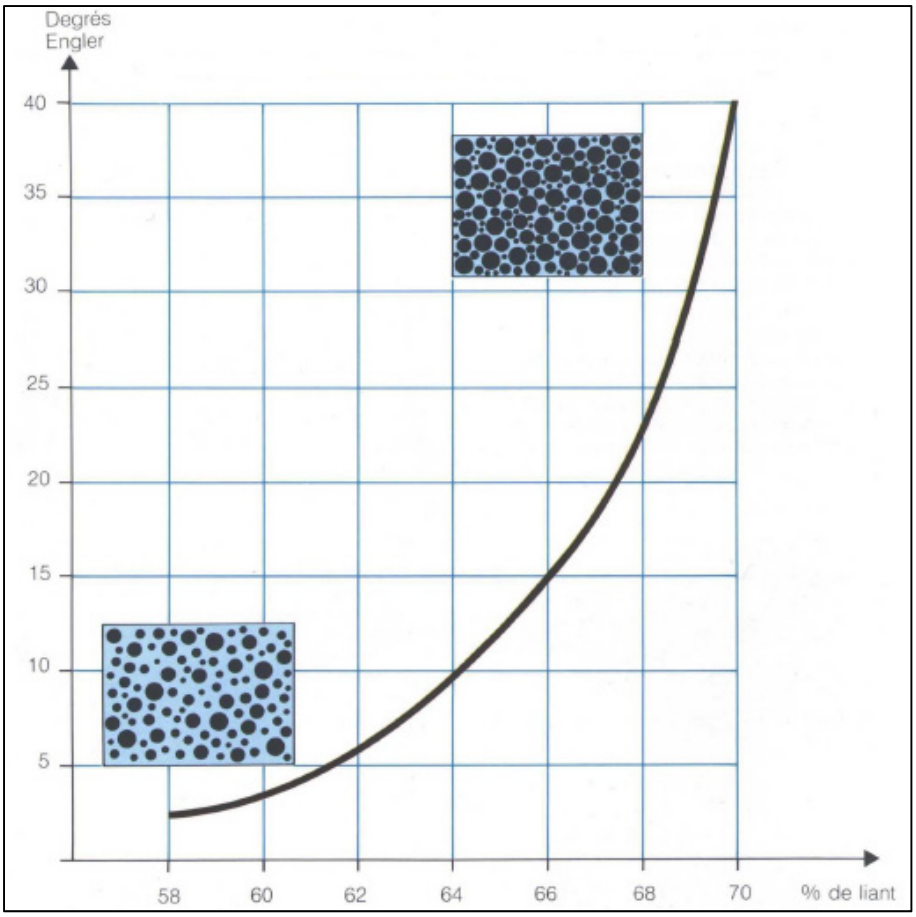


Figure 1.12 Viscosité (Degrés Engler) en fonction de la teneur
en liant, en pourcentage massique
Tirée de LeBec (2005a)

Stabilité au stockage des émulsions de bitume

Les émulsions de bitumes nécessitent une stabilité au stockage afin de garder leurs propriétés initiales après un certain temps d'entreposage. Une mauvaise stabilité au stockage amène les gouttelettes de bitume à fusionner ensemble (Furlong, James, Kalinowski, & Thompson, 1999). La méthode d`essai utilisée au Québec consiste à observer la stabilité de l`émulsion après 24 heures et 5 jours (ASTM, 2010). L'essai consiste à verser de l'émulsion de bitume dans un cylindre gradué et de distiller la partie supérieure et inférieure après le temps d'attente requis. Plus la différence est élevée, plus l'émulsion est instable. On distingue 3 étapes de déstabilisation pour les émulsions de bitume : La sédimentation/crémage, la

floculation et la coalescence. La sédimentation/crémage est le résultat des effets de pesanteur et est régie par la loi de Stocks (SFERB, 1988; Tadros, 2013). La formule est la suivante :

$$V = \frac{1}{18} * g * \frac{ø^2 * (\rho_1 - \rho_2)}{\eta} \quad (1.3)$$

Où :

V= Stabilité Stocks (0=stable infiniment);

g= Accélération de la pesanteur (9.81m/s^2);

ø= diamètre moyen des gouttelettes de bitume (m);

ρ1= densité de la phase dispersée (kg/m^3);

ρ2= densité de la phase dispersante (kg/m^3);

η= viscosité de la phase aqueuse (Pa*s).

Pour ralentir la vitesse de sédimentation, on peut augmenter la viscosité de la phase aqueuse ou diminuer la taille des gouttelettes de bitume (Guery, 2006). Compte tenu de leurs particules ayant une dimension moyenne de 0.01 à 0.05 µm, les microémulsions sont dites infiniment stables (Eastoe, 2003). Il est donc possible d'améliorer la stabilité en augmentant l'énergie mécanique lors de la fabrication, ou en utilisant plus d`émulsifiants. Par contre, l'utilisation excessive d'émulsifiants provoque des émulsions surstables et ralentit la vitesse de rupture de l'émulsion (Garilli, Autelitano, Godenzoni, Graziani, & Giuliani, 2016). L'augmentation de l'énergie mécanique augmente le fractionnement du bitume et les émulsifiants abaissent la tension de surface (LeBec, 2012).

La floculation est l'étape où les gouttelettes de bitume en suspension s'attirent ensemble pour former de plus grosses particules. À ce stade, il est possible de retrouver les propriétés initiales de l'émulsion en l'agitant. La coalescence découle des gouttelettes qui fusionnent ensemble pour ne former qu'une seule particule. Ce phénomène est irréversible (LeBec, 2015). La Figure 1.13 présente les étapes de la coalescence d'une émulsion.

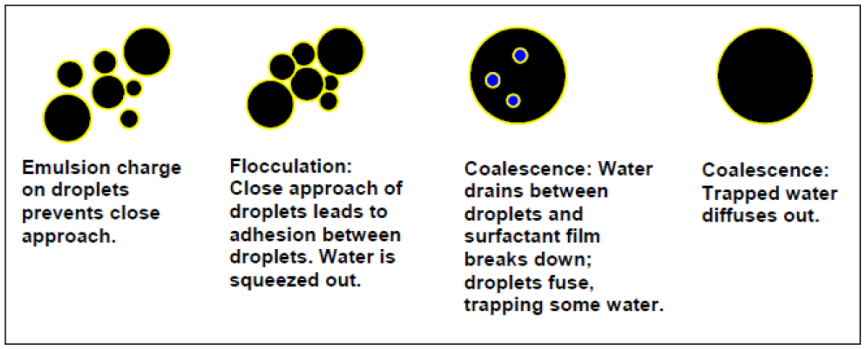


Figure 1.13 Étape de la coalescence d'une émulsion de bitume
Tirée de SFERB (1988)

Charge des particules

La charge des particules permet au concepteur de se concevoir une approximation de l'affinité avec le granulat. Deux méthodes d`essais sont proposées pour caractériser la charge des particules (ASTM, 2009). La première consiste à observer le déplacement d'une charge à travers l`émulsion. Une électrode chargée positivement et une chargée négativement sont insérées dans l`émulsion. Les émulsions cationiques adhèrent sur l`électrode chargée négativement et les émulsions anioniques adhèrent sur l`électrode chargée positivement.

Il est aussi possible de déterminer la charge des particules en mesurant le potentiel d'hydrogène (pH) afin de trouver la concentration en hydrogène dans l'émulsion ou des deux composants séparés (SFERB, 1988). Lorsque le pH est situé à 7, la concentration en hydrogène (H+) est égale à la concentration en hydroxyde (OH-). Plus la concentration de H+ est élevée, plus le pH tendra vers 0 et plus l'émulsion sera dite cationique. Une émulsion classique cationique a un pH de 2 à 3 lors de la mise en œuvre et se stabilise à 4.5 (neutre) après sa cure. Lorsque le pH est en dessous de 2, des problèmes tels que la rupture retardée, la corrosion de l'ouvrage et une mauvaise adhésivité peuvent survenir (Lebec, 2005a).

Granulométrie des émulsions de bitume

La granulométrie des émulsions est la distribution du diamètre des gouttelettes de bitumes. La granulométrie des émulsions est évolutive : elle change avec la fusion des gouttelettes de bitume (SFERB, 1988). Lors de la formulation, une température de sortie élevée et une augmentation de la vitesse du moulin colloïdale diminuent la dimension des particules (Nobel, 2017). Une distribution des gouttelettes de bitume étroites et un petit diamètre augmentent généralement la viscosité et la stabilité au stockage des émulsions (Lebec, 2012).

Le seul critère au Québec concernant la granulométrie des gouttelettes de bitume est le pourcentage passant au tamis 850µm (ASTM, 2013). L`essai consiste à évaluer la proportion retenue sur le tamis en y versant une quantité d`émulsion. Les résultats sont exprimés en % retenus. Cet essai vérifie si l`émulsion comporte des particules de trop grandes dimensions risquant de causer de l'instabilité lors du stockage de l`émulsion (SFERB, 1988).

Adhésion

La compréhension des mécanismes d'adhésion entre les granulats et l'émulsion de bitume est très importante pour améliorer la durabilité des chaussées. Il faut savoir que l'adhésion se définit comme le phénomène de liaison physico-chimique entre deux matériaux, soit entre le résiduel de bitume et le granulat (Jolicoeur, 2006). L'adhérence est l'état d'un corps qui colle et tient à un autre et l'adhésivité est l'aptitude d'un matériau à créer de l'adhérence.

Deux types d'adhésions existent : passive et active. L'adhésion active se présente lorsque le bitume entre en contact avec la surface des granulats (Tremblay, 2016). Lorsqu'il y a présence d'eau sur les granulats, le bitume est en mesure de prendre la place de l'eau et d'assurer la liaison, comme présenté à la Figure 1.14 (Zealand, 2005). L'adhésion passive est traduite par la résistance à la pénétration de l'eau dans le matériau. Les pressions externes appliquées sur les pores du granulat forcent l'eau à pénétrer dans le matériau bitumineux et augmente les risques d'arrachement du granulat, comme présenté à la Figure 1.15.

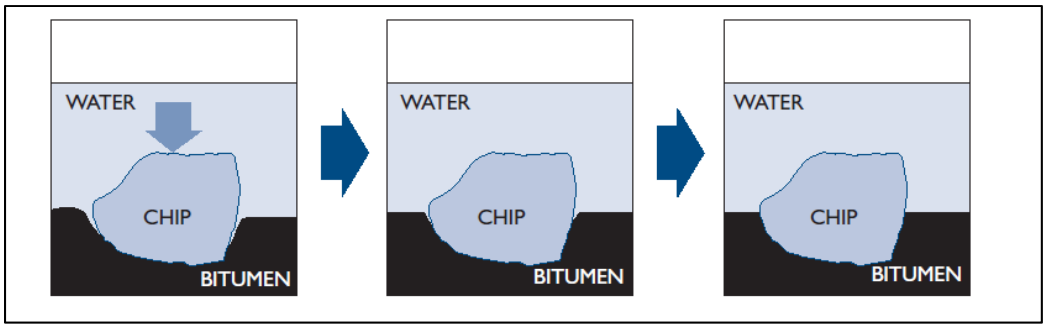


Figure 1.14 Exemple d'adhésion active. Le bitume déplace l'eau à la surface du granulat pour prendre sa place et assurer l'étanchéité
Tirée de Zealand (2005)

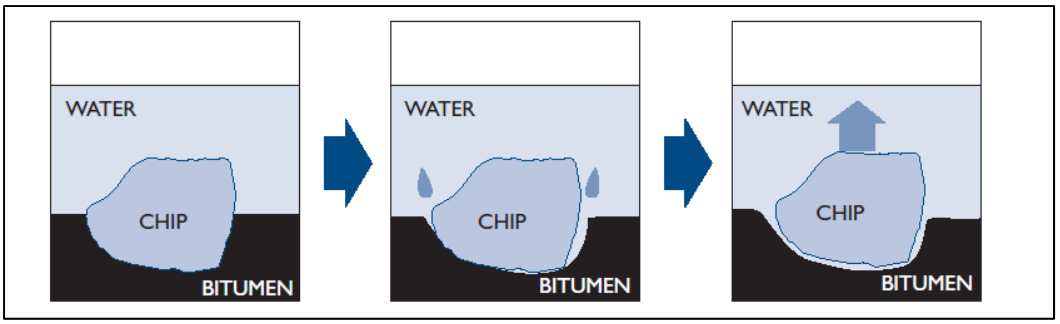


Figure 1.15 Exemple d'arrachement de granulat dû à une pauvre adhésion passive du matériau
Tirée de Zealand (2005)

Afin de mieux comprendre le principe de l'adhésion, il est essentiel de maîtriser les théories d'adhésions établies (Cihlarova & al, 2018). L'adhésion est assurée par différentes interactions entre le liant bitumineux et la surface des granulats qui est présentée au Tableau 1.3. L'addition de toutes ces interactions caractérise l'adhésion entre l'émulsion de bitume et le granulat.

D'abord, l'interaction mécanique apparaît lorsque le liant entre en contact avec le granulat et pénètre dans ses cavités. (Kucharek, 2012). Cette interaction est plus forte avec des granulats poreux, du fait que le bitume pénètre dans les trous du granulat pour recouvrir une plus grande surface, tel qu'illustré à la Figure 1.16. Les paramètres qui affectent l'interaction mécanique sont donc la surface de contact du granulat et la viscosité du liant qui permet d'accéder aux pores du granulat (Gerberich, 2005).

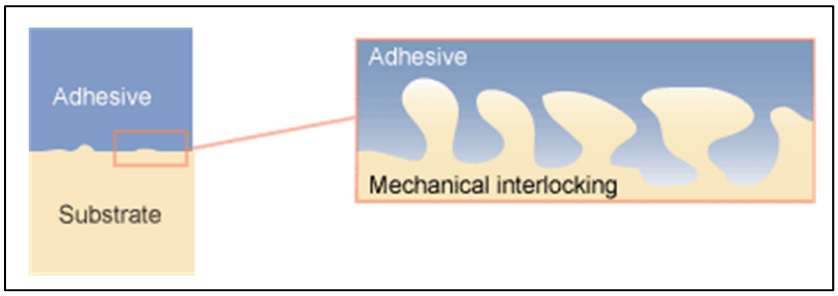


Figure 1.16 Illustration de la théorie de l'interaction mécanique
Tirée de Gerberich (2005)

Ensuite, l'interaction électrostatique se présente lorsque le bitume entre en contact avec la surface du granulat. La surface du granulat est généralement chargée électriquement et l'émulsion est chargée selon son pH. Comme présenté à la Figure 1.17, l'adhésion est produite par l'attraction de deux charges opposées. La charge électrique des granulats est traduite par leur teneur en silice (Ziyani, 2016). Un granulat sans silice est comparable à une surface purement positive. Par exemple, une émulsion de bitume cationique en contact avec un granulat électronégatif, comme le granite, assure l'adhésion grâce à l'interaction électrostatique.

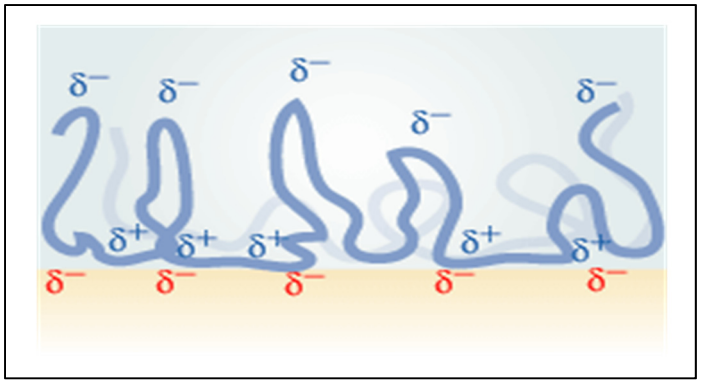


Figure 1.17 Illustration de la théorie de l'interaction électrostatique
Tirée de Gerberich (2005)

Lors du contact entre l'émulsion de bitume et la surface du granulat, une interaction chimique s'amorce entre les groupes fonctionnels du bitume et de la surface du granulat. La

Figure 1.18 montre les groupes chimiquement polaires interagir ensemble et créer des liaisons chimiques. Ces liaisons chimiques sont réalisées à partir d'un partage d'une paire d'électrons. Les atomes mettent en commun des électrons et créent un doublet d'électrons qui les relient (Kucharek, 2012). De plus, on retrouve les groupes non polaires comme les forces de Van der Waals qui contribuent à l'adhésion globale (Perraton, 2013).

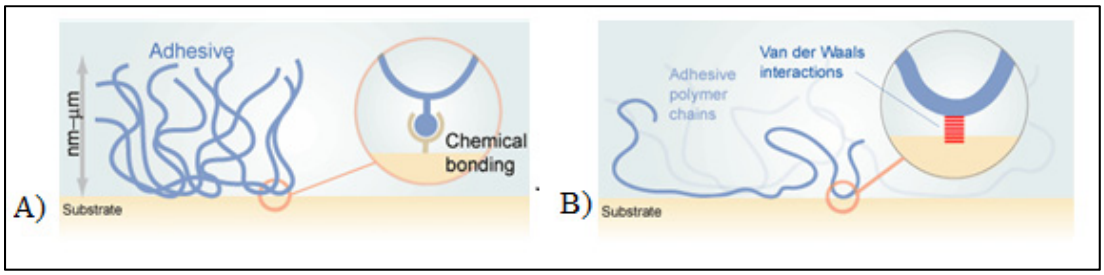


Figure 1.18 Illustration de la théorie de l'interaction chimique. - A) Présentation des liaisons chimiques. B) Présentation des interactions de Van des Waals (b) Tirée de Gerberich (2005)

La dernière interaction est basée sur la théorie de la thermodynamique, aussi appelée la théorie du mouillage. C'est la théorie prédominante qui explique le concept d'adhésion attribué aux forces intermoléculaires à l'interface bitume/granulat (Kucharek, 2012). La théorie de mouillage se résume par le comportement d'un liquide en contact avec une surface solide. Comme présenté à la Figure 1.19, on évalue le profil d'une goutte sur la surface granulaire. Un résultat avec un angle de contact $\theta \geq 90°$ désigne une surface hydrophobe. Conséquemment, un angle de contact élevé est un indicateur de pauvre adhésion et de faible mouillabilité (Law, 2014). Le Tableau 1.3 synthèse les types d'interactions influençant l'adhésion entre le bitume et le granulat.

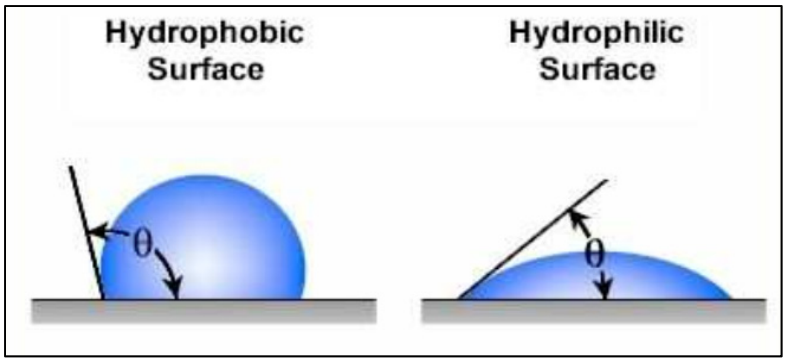


Figure 1.19 Illustration de la mouillabilité d'un matériau
Tirée de Kucharek (2012)

Tableau 1.3 Synthèse des interactions influençant l'adhérence

Type d'interaction	Paramètres
Mécanique	Le granulat (texture de surface et dimension de pores ouvertes) ; Viscosité de l'émulsion de bitume
Électrostatique	Attraction des charges opposées entre l'émulsion de bitume et le granulat (pH de l'émulsion et teneur en silice du granulat)
Chimique	Réaction entre les molécules de bitume et du granulat créant des liaisons covalentes et/ou de forces de Van der Waals
Thermodynamique	Énergie libre à la surface de chaque matériau, mouillabilité

Afin d'évaluer l'aptitude d'un bitume ou d'une émulsion bitumineuse à adhérer sur une source granulaire, le Ministère des Transports du Québec (MTQ) a développé une méthode d'essai qui consiste tout d'abord à enrober une fraction granulaire lavée avec un liant bitumineux. Le mélange bitumineux est ensuite curé et mis dans un bécher sur une table agitatrice pour être agité pendant une période de 24 heures. L'évaluation se fait visuellement après avoir lavé et séché les éprouvettes (MTQ, 2013). Une deuxième méthode consiste à fabriquer un enrobé à l'émulsion ayant une teneur en bitume résiduelle de 5%. Après la cure de 24 heures, on met l`éprouvette dans l`eau en ébullition pendant 10 minutes. On évalue finalement le désenrobage visuellement après lavage et séchage de l'éprouvette (ASTM, 2012).

1.1.2 Le granulat

Le granulat est, par définition, un matériau sans cohésion, formé de particules de tailles inférieures à 125mm qui sont utilisés dans la fabrication des routes, de voies ferroviaires et de certains ouvrages d'art (MTQ, 2017). On distingue deux types de granulats : naturels et artificiels. Les granulats naturels proviennent de l'extraction des carrières, des gravières ou des sablières, et les granulats artificiels sont fabriqués (Perraton, 2013). La qualité des granulats est évaluée par rapport à leurs caractéristiques intrinsèques et leurs caractéristiques de fabrication (Lamothe, 2004; MTQ, 2017). Les caractéristiques intrinsèques sont les propriétés liées à leur composition minéralogique et leur texture pétrographique (Lamothe, 2004). Ces caractéristiques sont donc inchangeables. Pour les granulats naturels, on distingue 3 familles de roches : Magmatiques, Sédimentaires et Métamorphiques. Le Tableau 1.4 démontre le procédé de fabrication des différents types de roches naturelles et artificielles.

Tableau 1.4 Origine des granulats
Adapté de Perraton, (2013)

Type		Fabrication	Exemple
Naturel	Magmatique (Ignée)[A]	Solidification du magma	Basalte, granite, gabbro, pierre ponce
	Sédimentaire[A]	Consolidation d'une accumulation sédimentaire	Argile, sable, gravier, calcaire, grès
	Métamorphique[A]	Modification sous pression/température d'une roche sédimentaire ou magmatique	Ardoise, quartzite, schiste, marbre

[A] Tiré de Perraton, 2013; [B] Tiré de Barthel, 2016; [C] Tiré de Talon Sebeq, 2012

Tableau 1.4 Origine des granulats (suite)
Adapté de Perraton, (2013)

Type		Fabrication	Exemple
Artificiel	Synthétique[B]	Sous-produits industriels	Les laitiers, les scories, les cendres volantes et les résidus de mines
	Matériaux de recyclage[C] (MR)	Trottoirs, dalles, édifices, chaussées	Granulats de béton concassés (GBC), Granulats bitumineux recyclés (GBR)

[A] Tiré de Perraton, 2013
[B] Tiré de Barthel, 2016
[C] Tiré de Talon Sebeq, 2012

Les principales caractéristiques intrinsèques sont : la densité, l'absorption et la résistance aux dommages externes. Les caractéristiques de fabrication dépendent des conditions d'exploitation et du traitement des matériaux et sont donc modifiables. Le Tableau 1.5 synthèse les caractéristiques requises pour la fabrication de *chip seal*.

Tableau 1.5 Essais de caractérisation pour les granulats de traitement de surface

Caractéristiques des granulats		Nom de l'essai	Méthodes d'essais[A]
Intrinsèque	Masse volumique	Densité et absorption du granulat	LC 21-066[1] LC 21-067[2]
	Absorption d'eau		
	Résistance au polissage	Coefficient de Polissage par Projection (CPP)	LC 21-102
	Résistance à l'usure	Micro-Deval	LC 21-101[1] LC 21-070[2]
	Résistance à l'abrasion	Los Angeles	LC 21-400
Fabrication	Granulométrie	Analyse granulométrique	LC 21-040
	Propreté		
	Angularité	Fragmentation	LC 21-100[2]
	Forme	Particules plates	LC 21-265
		Particules allongées	

1 Pour granulat fin
2 Pour gros granulat
A Tirée de MTQ, 2017

Les granulats se caractérisent en premier lieu par leur granularité, ou granulométrie. Le Tableau 1.6 présente la classification des granulats selon leur dimension de la France (Ghomari & Bendi-Ouis, 2008) et du Québec (MTQ, 2017) où d et D sont la valeur du plus petit et du plus gros granulat respectivement.

Tableau 1.6 Classification des classes granulaire selon leur granularité

Classe	Étendue granulaire*	France (FR)[A] dimension en mm	Québec (Qc)[B-C] dimension en mm
Fine	0/D	$D \leq 0{,}080$	$D \leq 0{,}080$
Filler	0/D	$D \leq 0{,}080$	$D < 0{,}315$
Granulat fin	0/D	-	$D < 5$

Gravillon	d/D	d ≥ 2,00 et D ≤ 31,50	d ≥ 2,00 et D ≤ 31,50
Gravier	d/D	-	d ≥ 2,00 et D ≤ 20,00
Caillou	d/D	d ≥ 20,00 et D ≤ 80,00	d ≥ 20,00
Ballast	d/D	-	d ≥ 20,00 et D ≤ 50,00
Grave	0/D	6,30 < D ≤ 80,00	5,00 < D ≤ 80,00

[A] Nommés ainsi par Ghomari & Bendi-Ouis (2008)
[B] Nommés ainsi par MTQ (2017)
[C] Nommés ainsi par GTD (2007)
* D : dimension maximale et d : dimension minimale.

Pour effectuer le squelette granulaire qui constitue l'ensemble des matériaux solides du matériau bitumineux, il faut mélanger différentes classes granulaires afin d'obtenir une courbe granulométrique respectant les critères établis. Le Tableau 1.7 présente les fuseaux granulométriques établis du *chip seal* dans différents États des États-Unis (Gransberg & James, 2005).

Il est observable qu'au tamis 200 (≈0.07mm), pratiquement tous les États imposent un maximum passant de 1% (2% pour le Montana). Une trop haute teneur en fines augmentera l'arrachement des granulats en diminuant la cohésion entre le granulat et le bitume résiduel de l'émulsion de bitume (Wood, Janish, & Gaillard, 2006; Zealand, 2005). Idéalement, la dimension des granulats doit être uniforme, c'est-à-dire avoir une seule dimension. Un granulat unidimensionnel maximise la surface de contact au niveau pneu/chaussée et ainsi diminue les risques de dérapages (C. M. Lee, 2017).

Tableau 1.7 Fuseaux granulaires de différents États des États-Unis
pour une granulométrie de chip seal
Tiré de Gransberg & James (2005)

Dimension des tamis		État et fuseaux granulaires						
(US)*	(mm)	Alaska	Arizona (Trafic faible)	Arizona (Trafic élevé)	Minnesota	Montana	Dakota du Sud 1A	Dakota du Sud 1B
1/2"	12,7	100	100	100	100	-	100	100
3/8"	9,5	90-100	100	70-90	90-100	100	40-70	100
1/4"	6,35	-	70-90	0-10	40-70	-	-	-
4	4,75	10-30	1-10	-	0-15	0-30	0-15	10-90
8	2,36	0-8	0-5	0-5	0-5	0-15	0-5	0-30

40	0,45	-	-	-	-	-	-	0-4
200	0,07	0-1	0-1	0-1	0-1	0-2	0-1	-
* Dimension des tamis impériaux								

Un coefficient d'uniformité de performance (*PUC)* a été développé pour évaluer la granulométrie utilisée pour les traitements de surface de type *chip seal* (McLeod, 1969). Le *PUC* est le ratio entre le pourcentage passant du granulat de même dimension que la profondeur d'enrobage (P_{EM}) et le pourcentage passant du granulat de même dimension que deux fois la profondeur d'enrobage (P_{2EM}). L'équation pour obtenir PUC est la suivante :

$$PUC = \frac{P_{EM}}{P_{2EM}} \tag{1.4}$$

Les valeurs de P_{EM} et P_{2EM} sont des indicateurs de risques de ressuage et d'arrachement respectivement. Selon McLeod, les granulats de même dimension que la profondeur d'enrobage correspondent à 0.7 fois la dimension médiane du granulat (dimension du granulat à 50% passant, nommé *D50*) et s'enfoncent dans le bitume résiduel du traitement de surface causant du ressuage (Figure 1.20) (Buss et al., 2016). Les granulats ayant 1.4 fois la dimension de *D50* correspondent donc à deux fois l'épaisseur d'enrobage et démontrent un manque d'adhésion. Le manque d'adhésion contribue à l'arrachement des granulats lors du passage des véhicules (J. Lee & Y, 2009).

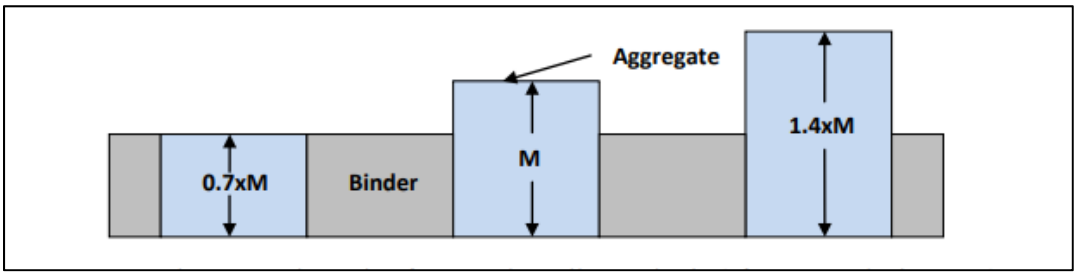


Figure 1.20 Schéma du critère de performance McLeod
Tirée de Lee & Y (2009)

Au Québec, le Ministère des Transports du Québec (MTQ) a défini 4 types de traitements de surface *chip seal* selon leurs granulométries (Tableau 1.8). Le type de traitement de surface dépend de la classe granulaire utilisée et aucune combinaison granulaire n'est requise (MTQ, 2008). Lors du traitement de surface en multicouche, le choix de la classe granulaire à utiliser dépend du diamètre moyen *(D50)* des particules du granulat de la couche inférieure. Il est à noter que le diamètre moyen du traitement de surface *(D50)* doit se situer entre 50% et 60% du D50 de la couche inférieure.

Le MTQ demande d'ajouter les tamis 6.3 mm et 16 mm à l'analyse granulométrique afin d'avoir une meilleure précision de la distribution granulaire du traitement de surface. Les granulats doivent avoir une teneur en fine en dessous de 0.7%. Pour tous les types de traitements de surface *chip seal*, un coefficient d'uniformité *(CU)* d'un maximum de 1.6 est demandé. Le coefficient d'uniformité est le rapport entre les dimensions de grains où le pourcentage passant est 80% *(D80)* et 20% *(D20)* respectivement (MTQ, 2008). Les granulométries utilisées pour ce mémoire sont présentées au chapitre suivant.

Tableau 1.8 Fuseaux granulométriques de spécification pour les traitements de surface (TS) de type *chip seal* du Ministère des Transports du Québec
Tiré de MTQ (2008)

Tamis (mm)	TS1[A]	TS2[B]	TS3[C]	TS4[D]	Méthodes d'essais
	% passant				
28	100	-	-	-	LC 21-040
20	85-100	100	-	-	
14	0-15	85-100	100	-	
12.5	-	-	-	-	
10	0-3	0-15	85-100	100	
5	-	0-3	0-15	85-100	
2.5	-	-	0-3	0-15	
1.25	-	-	-	0-3	
0.08	-	-	-	-	
*Cu**	< 1.6				
Propreté (% max.)**	0.7				CSA-A23.5-5A

A	S'apparente à la classe granulaire 14/20
B	S'apparente à la classe granulaire 10/14
C	S'apparente à la classe granulaire 5/10
D	S'apparente à la classe granulaire 2.5/5
*	Coefficient d'uniformité (D80/D20)
**	Propreté du granulat (passant au tamis 80 µm)

Les granulats de traitement de surface doivent résister à l'usure et aux chocs pour assurer un bon contact pneu/chaussée et empêcher le dérapage (Adams, 2014; Buss et al., 2016). En plus des exigences granulométriques, le Ministère a établi un maximum permis de particules plates et allongées et un minimum de particules fragmentées (MTQ, 2008). Les particules trop plates ou allongées s'enfoncent complètement dans le bitume et causent du ressuage dans le traitement de surface lors de la compaction (Figure 1.21) diminuant l'adhérence pneu/chaussée. Les granulats doivent être de forme cubique le plus possible.

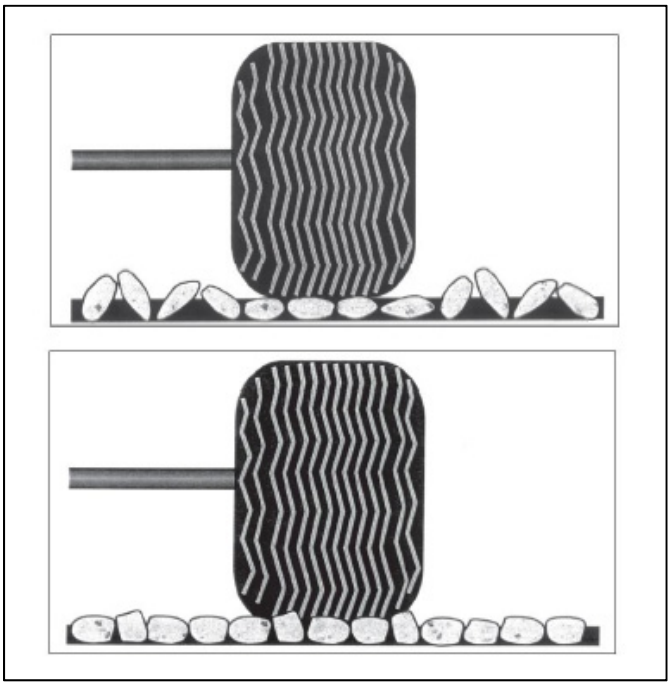


Figure 1.21 Influence de l'angularité des granulats
dans le traitement de surface
Tirée de TEXAS (2012)

Les caractéristiques des granulats pour le traitement de surface sont évaluées à l'aide des essais présentés au Tableau 1.9.

Tableau 1.9 Catégorie de granulat pour le traitement de surface chip seal

		TS1 TS2	TS3	TS4	Méthodes d'essais
	Catégories	4d[1]	3d[1]	3[2]	MTQ 4301
Essais	Micro-Deval (MD), en %	≤ 30	≤ 25	≤ 35	LC 21-101[2] LC 21-070[2]
	Los Angeles (LA), en %	≤ 50	≤ 50	-	LC 21-400
	Micro-Deval et Los Angeles (MD + LA), en %	≤ 75	≤ 70	-	LC 21-101 LC 21-400
	Fragmentation, en %	≥ 60	≥ 60	-	LC 21-100[2]
	Particules plates, en %	≤ 30	≤ 30	-	LC 21-265
	Particules allongées, en %	≤ 50	≤ 50	-	

[1] Catégorie de gros granulat fin selon le MTQ (2007)
[2] Catégorie de granulat fin selon le MTQ (2007)

Lors de la formulation de *chip seal*, il faut savoir qu'il est primordial de connaître la nature du granulat. Pour chaque famille de granulat, il existe des roches dites acides et basiques. La notion d'acidité/base fait référence à la teneur en silice (SiO_2) du granulat (Ziyani, 2016). La Figure 1.22 montre différentes sources granulaires en fonction de leur teneur en SiO_2 (Kucharek, 2012).

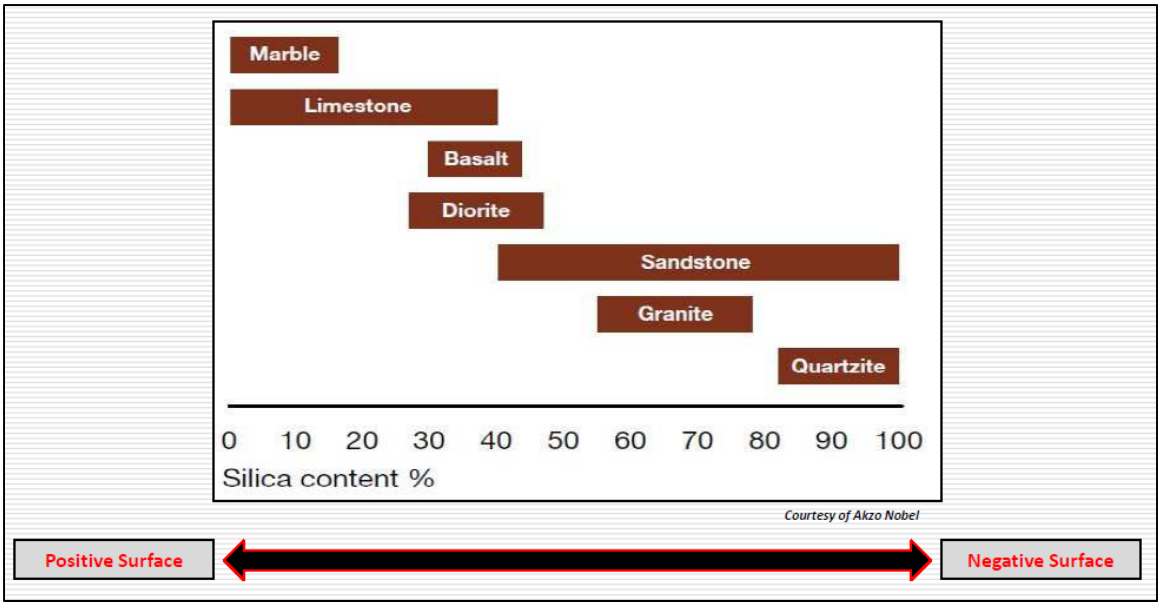


Figure 1.22 Teneur en silice de quelques composés minéraux
Tirée de Kucharek (2012)

Une teneur en silice élevée indique une surface de contact du granulat négative et, par exemple, la réaction entre une émulsion anionique et un granulat fortement dosé en SiO_2 est donc plus faible qu'avec une émulsion cationique (SFERB, 1988). Conséquemment, les propriétés telles que l'adhésion entre l'émulsion et le matériau granulaire sont affectées et peuvent nuire à la qualité du traitement de surface. C'est pourquoi il est important de sélectionner le bon couple émulsion-granulat.

1.2 Le matériau bitumineux pour traitement de surface

Le traitement de surface *chip seal* est une technique d'entretien qui s'effectue généralement à très jeune âge (Figure 1.23). Il peut être installé sur une surface granulaire, revêtue ou même parfois neuve (Trudeau, 2014). Le *chip seal* a pour principal avantage de protéger la structure de chaussée des intempéries en scellant et en imperméabilisant la surface. Lorsqu'installé sur une couche granulaire, il empêche le soulèvement de la poussière et la projection de particules, diminuant ainsi les coûts reliés à l'entretien des chaussées granulaires (Gürer, Karasahin, Çetin, & Aktas, 2012). Sur une surface revêtue, il diminue les risques d'aquaplanage en favorisant l'adhérence et préserve la qualité du revêtement existant.

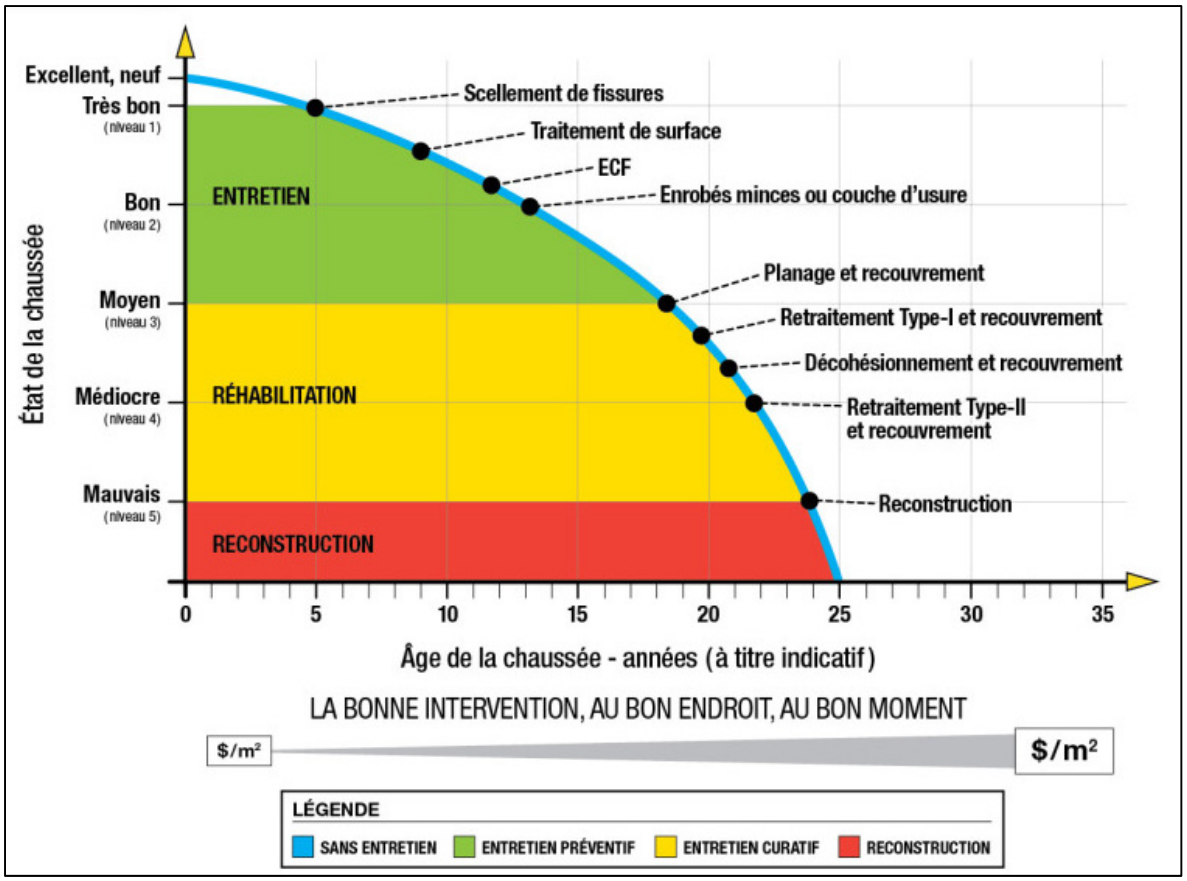


Figure 1.23 Moment typique d'interventions des techniques d'entretien d'une chaussée
Tirée de http://entretiendesroutes.ca

Pour dresser le traitement de surface, l'émulsion est d'abord chauffée à la température recommandée par le fabricant (généralement de 60°C à 80°C) dans les camions épandeurs à émulsion. L'émulsion est ensuite épandue à débit régulier afin d'obtenir un taux de pose égal à celui exigé par le concepteur. L'émulsion doit être déposée sur une surface bien nettoyée et les granulats y sont déposés directement ensuite (SFERB, 1988). Les granulats sont épandus à débit constant et compactés légèrement sans vibration (Trudeau, 2014).

Les deux dernières étapes sont répétées pour les traitements de surface multicouche (figue 1.24). La rupture de l'émulsion survient au contact des granulats et la cure termine lorsque l'eau est évacuée complètement. La cure de l'émulsion dépend des conditions météorologiques et du type d'émulsion utilisé. Entre autres, la cure des émulsions modifiées au polymère prend plus de temps. Elle peut prendre quelques jours (Zealand, 2005). La

circulation doit être ralentie pendant cette période en dessous de 30km/h pour éviter tout arrachement.

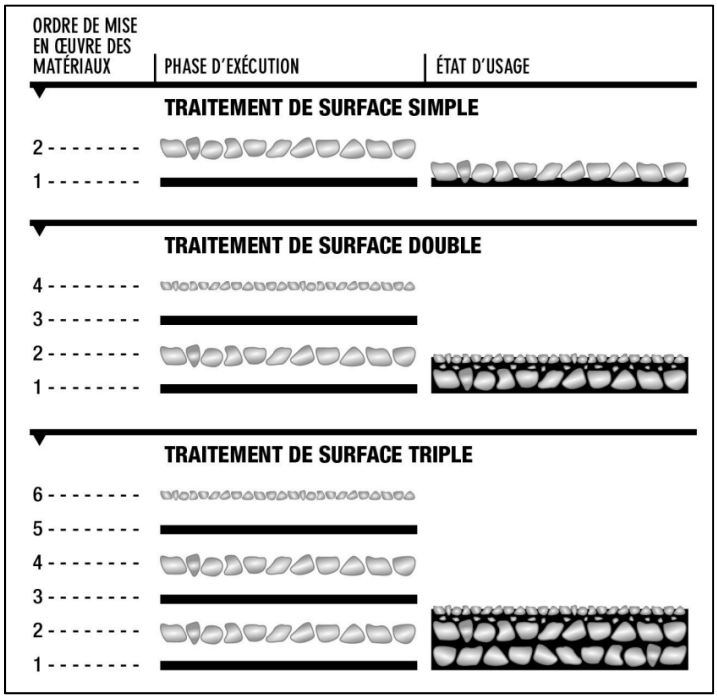


Figure 1.24 Ordre de mise en œuvre des matériaux
pour différents types de traitement de surface
Tirée de Trudeau (2014)

Le passage des véhicules à basse vitesse favorise l'évacuation de l'eau et accélère la cure de l'émulsion sans endommager le traitement de surface (Zealand, 2005). Après avoir complété la cure, le surplus de granulat restant sur la chaussée est finalement balayé et récupéré pour éviter les risques de projection de particules. Le coût est d'environ 2$/m^2 pour un traitement de surface simple et 9$/m^2 pour le traitement triple (http://entretiendesroutes.ca).

1.2.1 Problématiques des matériaux bitumineux de traitement de surface

Les défaillances peuvent être classées en deux catégories : les défaillances reliées aux éléments extérieurs du traitement de surface (extrinsèques) et les défaillances reliées aux propriétés du traitement de surface (intrinsèques). Le traitement de surface n'a aucune propriété structurale et ne peut donc pas être utilisé sur une chaussée présentant des

conditions structurales défaillantes (Shuler, 2013). Les principales dégradations du *chip seal* sont présentées dans la section suivante à partir de leur catégorie. Le Tableau 1.10 présenté plus loin synthétise les causes de dégradation.

1.2.1.1 Les dégradations extrinsèques

La perte d'agrégats

La perte d'agrégats est l'une des problématiques les plus critiques des traitements de surface. Cette défaillance se présente généralement après la mise en œuvre du matériau dès le passage des premiers véhicules (Gransberg & James, 2005). Le passage des véhicules doit être ralenti lors de la cure de l'émulsion afin d'éviter la projection des particules et l'arrachement des granulats (Zealand, 2005).

Une autre cause de perte d'agrégats est le décapage. Elle est présentée aux figures 1.25 et 1.26. Lorsque le drainage est insuffisant, l'eau tend à pénétrer l'interface agrégats/bitume (Zealand, 2005). La charge appliquée sur le traitement de surface saturé en eau lors du passage cause des perturbations dans le matériau (Shatinawi & Kirk, 1993). Lors du passage du véhicule sur la chaussée mouillée, la partie avant de la roue roule sur un film continu d'eau en poussant une quantité d'eau. La partie centrale de la roue roule sur une surface de granulats interrompue par une quantité d'eau et la partie arrière du pneu roule sur une surface sèche.

Le mouvement de l'eau favorise le décapage en détruisant le lien entre l'agrégat et le bitume et ultimement cause l'arrachement du granulat (Adams, 2014). De plus, l'arrachement des agrégats amène à la migration du bitume vers le haut et diminue la friction entre la chaussée et la roue du véhicule en diminuant l'effet textural désiré.

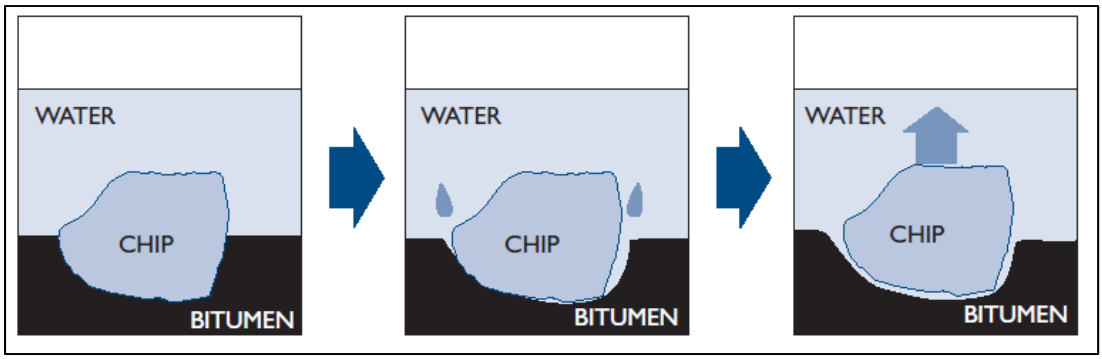


Figure 1.25 Exemple d'arrachement d'agrégats de décapage dû à l'eau.
Tirée de Zealand (2005)

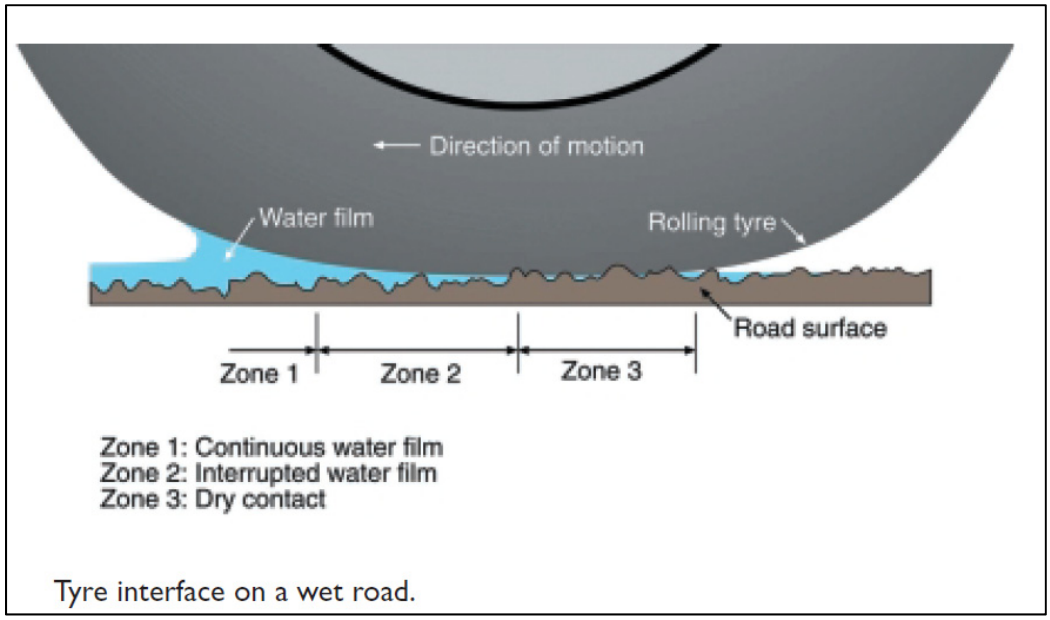


Figure 1.26 Exemple de décapage dû à l'eau. Roulement
d'un véhicule sur une surface saturée
Tirée de Zealand (2005)

La décohésion

La décohésion du traitement de surface est un défaut de construction principalement causé par une application non uniforme ou trop visqueuse du liant sur toute la largeur de la chaussée (Gransberg & James, 2005). De plus, la décohésion se produit lorsque la chaussée existante est poussiéreuse, froide ou humide (Wood et al., 2006). L'ensemble des forces qui permet la liaison entre la chaussée existante et le traitement de surface est affecté et la

cohésion est diminuée. Lorsque la cohésion est insuffisante, le traitement de surface tend à s'arracher par section, comme présenté à la Figure 1.27. L'arrachement de section affecte la texture du traitement de surface. Les sections arrachées ont une résistance au dérapage et un confort de roulement moins élevés.



Figure 1.27 Décohésion typique d'un traitement de surface
Tirée de Adams (2014)

Le ressuage

Le ressuage est la migration du bitume vers la surface de la chaussée sous l'effet des charges, particulièrement lorsque la température est élevée (Gransberg & James, 2005). Cette problématique peut être observée par des taches foncées formées sur la surface, principalement sur les traces de roues. De plus, lors de la compaction et du passage des véhicules, les granulats s'enfoncent dans la chaussée existante augmentant la profondeur d'encastrement des granulats (Potter & Church, 1976). La Figure 1.28 montre un exemple d'encastrement d'un traitement de surface. En Nouvelle-Zélande, la rigidité de la structure inférieure est évaluée lors du dimensionnement et est présentée à la section suivante (Zealand, 2005). Les granulats s'enfoncent davantage dans une chaussée ayant un bitume plus mou et peuvent s'enfoncer complètement dans le liant diminuant ainsi l'adhésion chaussée/pneu.

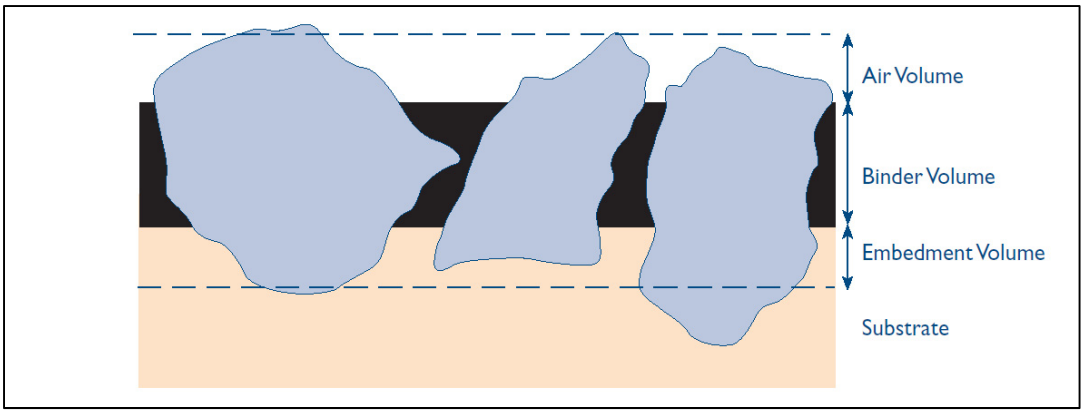


Figure 1.28 Exemple d'encastrement d'un traitement de surface
Tirée de Zealand (2005)

La fissuration

La fissuration dans le traitement de surface permet à l'eau de pénétrer dans la chaussée et accélère le processus de dégradation en dessous du traitement de surface (Adams, 2014). Elle se manifeste majoritairement en hiver et parfois se referme par elle-même en été (Zealand, 2005). L'eau gonfle en présence de gel et crée des forces supplémentaires indésirables dans la structure de chaussée et cause des dommages prématurés à la structure (Lamothe, 2014).

Les types de fissurations reliées aux couches inférieures affectent le traitement de surface tels que les fissurations par fatigue, les fissurations thermiques et la remontée des fissures. La fissuration par fatigue apparaît avec le vieillissement du bitume et les charges répétées sur le matériau. L'oxydation du bitume le fragilise et le rend plus vulnérable aux changements thermiques (Ghimire, 2015). Le bitume vieilli adopte un comportement fragile à plus haute température et se fissurera au passage des véhicules par temps froid. La fissuration par fatigue se présente dans les traces de roues et est longitudinale (Nguyen, 2009). De plus, les fissures existantes des couches inférieures créent des mouvements dans la structure de chaussée et migrent jusqu'à la surface (Adams, 2014). Dépendamment de la qualité du bitume, le traitement de surface ralentit la remontée de fissure, mais ne l'empêche pas (Ilias, 2015).

1.2.1.2 Les dégradations intrinsèques

La perte d'agrégats

Lors de la mise en place, un dosage trop élevé en granulat augmente la perte d'agrégats. D'autres causes sont reliées à l'enrobage trop faible des granulats. En effet, un dosage trop faible de bitume résiduel, un bitume trop dur ou une mauvaise compaction des granulats affectent l'enrobage. De plus, les propriétés du bitume résiduel de l'émulsion et des granulats affectent la perte d'agrégat (Redman, 2010).

Les propriétés des granulats, telles que la granulométrie, la propreté, la forme, l'absorption et la densité influent le traitement de surface au niveau de l'aptitude à résister à la perte d'agrégats. Entre autres, les trop gros granulats de la granulométrie s'arracheront dû au faible enrobage (J. Lee & Y, 2009). Les granulats doivent contenir le moins de poussière possible pour éviter d'affecter l'adhésion entre le granulat et le bitume (McLeod, 1969). De plus, les propriétés rhéologiques du bitume résiduel à température faible influe la perte d'agrégats (Fond, 2016). À basse température, le bitume tend à avoir un comportement fragile et devient moins apte à résister aux forces causées par le trafic à l'interface bitume/granulat. Aussi, l'eau emprisonnée dans le mélange lors de la cure cause des vides indésirables qui séparent le lien bitume/agrégat (C. M. Lee, 2017). La perte d'agrégats rend la surface plus lisse donc plus glissante.

Le ressuage

Lorsque le dosage en liant est trop élevé, les agrégats s'enfoncent complètement dans le bitume et le bitume migre vers la surface. L'utilisation d'un bitume résiduel trop mou accélère cette migration, surtout lorsque la température est élevée. Le ressuage affecte la texture du traitement de surface en augmentant les risques de dérapage. Cependant, il ne cause pas d'arrachement. L'adhérence diminue avec le taux de ressuage.

La fissuration

Les causes intrinsèques de fissurations dans le traitement de surface sont reliées principalement à une mauvaise classe de bitume utilisé pour sa formulation. À basse température, le traitement de surface aura de la fissuration thermique. La fissuration thermique, aussi nommée fissuration transversale, est reliée aux effets environnementaux causant la contraction du matériau à basse température. Le bitume se contracte avec la diminution de la température et favorise l'ouverture des fissures. Les fissures transversales sont observables sur des intervalles réguliers sur le traitement de surface et font généralement toute la largeur de la chaussée.

Tableau 1.10 Résumé des dégradations du traitement de surface de type *chip seal*

Dégradation	Causes extrinsèques	Causes intrinsèques
Perte d'agrégats (arrachement)	- Passage des véhicules trop rapide à jeune âge. - Faible drainage (décapage par l'eau). - Compaction insuffisante.	- Dosage en granulats trop élevé. - Dosage en bitume trop faible. - Rupture de l'émulsion (séparation du lien bitume/granulat par des vides causés par l'eau). - Classe de bitume inadéquate (bitume trop dure).
Ressuage	- Température trop élevé. - Profondeur d'encastrement des granulats élevée (chaussée existante molle).	- Dosage en bitume trop élevé. - Classe de bitume de l'émulsion inadéquate (bitume trop mou).
Fissure	- Basse température. - Remonté de fissures des sous-couches. - Défaillances de la chaussée inférieure.	- Mauvaise classe de bitume utilisé (fissuration thermique) - Oxydation du bitume.
Décohésion	- Mauvaise application de liant (non-uniforme). - Chaussée existante poussiéreuse, froide ou trop humide.	- Mauvaise affinité bitume-granulat

1.2.2 Formulation des matériaux bitumineux de traitement de surface

Afin d'avoir les performances optimales, il est important de bien concevoir le traitement de surface. Les dosages en émulsion et en agrégat lors de la construction sont les propriétés les plus importantes à déterminer lors de la conception. Un dosage trop élevé en granulats augmente la projection des particules aux passages des véhicules. L'excès d'agrégats augmente les risques de bris chez les utilisateurs et dépense du matériel inutilement (C. M. Lee, 2017). Un dosage trop faible en granulat laisse des sections recouvertes seulement d'émulsion et diminue l'adhérence de la chaussée. De plus, les granulats s'arrachent plus facilement lorsque le taux de bitume résiduel est trop faible (Johnston & King, 2012). Lorsqu'il manque de liant, la cohésion entre le granulat et le liant est trop faible pour résister aux forces appliquées (Figure 1.29).

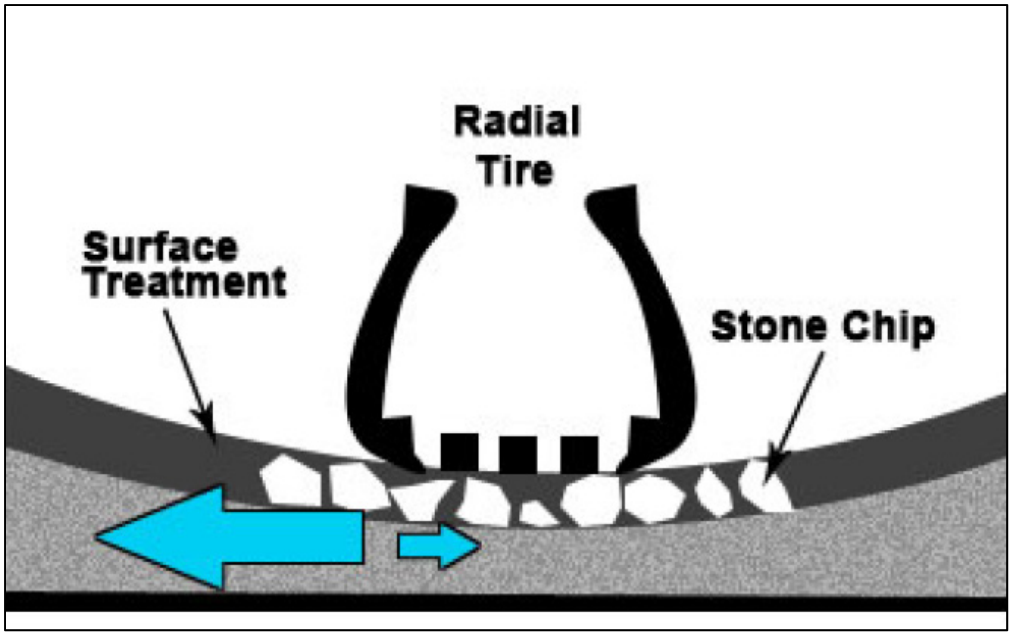


Figure 1.29 Influence du passage d'un véhicule sur le traitement de surface
Tirée de Johnson & King (2012)

Un taux trop élevé de bitume résiduel diminue aussi la résistance au dérapage. Les granulats se recouvrent complètement de liant et perdent leur effet textural. Le bitume migre vers la surface et crée du ressuage (Adams, 2014). Au Québec, aucune méthode de conception n'est

établie mais il existe des recommandations de dosage (Trudeau, 2014). Le Tableau 1.11 présente les dosages typiques pour différents types de traitement de surface.

Tableau 1.11 Valeurs typiques de dosage dans les traitements de surface
Tirée de Trudeau (2014)

Traitement de surface	Agencements granulaires disponibles[1]	Dosage[2]	
		Granulat (kg/m^2)	Émulsion de bitume ($litre/m^2$)
Simple	(5-10)	14	1.6
	(10-14)	18	1.8
	MG-20	22	2.1
Double	(10-14) + (5+10)	18 + 14	2.0 + 1.6
	(14-20) + (10-14)	20 + 18	2.2 + 1.8
	MG-20 + MG-20	22 + 22	2.1 + 2.1
Triple	(14-20) + (10-14) + (5-10)	20 + 18 + 14	2.2 + 2.0 +1.6
	(10-14) + (5-10) + (2.5-5)	18 + 14 + 10	2.0 + 1.6 + 1.2

Note : Les valeurs sont à titre indicatif et doivent être validées par un concepteur.
Il peut avoir un ajustement de ±10%.
[1] D'autres agencements sont réalisables.
[2] Il peut avoir un ajustement du dosage lors de la mise en œuvre.

Il existe des méthodes de conception qui permettent d'avoir une meilleure précision des valeurs de dosage. De plus, il existe plusieurs paramètres qui influencent le dosage tel que la condition de la chaussée, du trafic et des propriétés des matériaux utilisés lors de la construction. Quelques méthodes sont présentées dans les sections suivantes.

1.2.2.1 Méthode Hanson

La méthode Hanson est la première méthode scientifique de formulation pour les enrobés de traitement de surface (Towler & Dawson, 2008). Cette méthode date de 1935 et a été développée en Nouvelle-Zélande. Cette méthode ne prend pas en compte le niveau et le type de trafic, la condition de la chaussée existante et des propriétés des matériaux utilisés lors de la construction de la chaussée existante (Brockus & Hunter, 1996). Elle permet de déterminer le taux d'application de bitume et d'agrégat en fonction de l'évolution des vides dans l'enrobé de traitement de surface. Comme le montre la Figure 1.30, Hanson a déterminé que

le traitement de surface a un pourcentage de vide approximatif de 50% après avoir déposé les granulats sur la couche de liant. Ensuite, le liant comble les vides lors du passage du rouleau compacteur jusqu'à obtenir 30% de vides. Par la suite, il a repéré une compaction secondaire lors du passage du trafic jusqu'à obtenir 20% de vides.

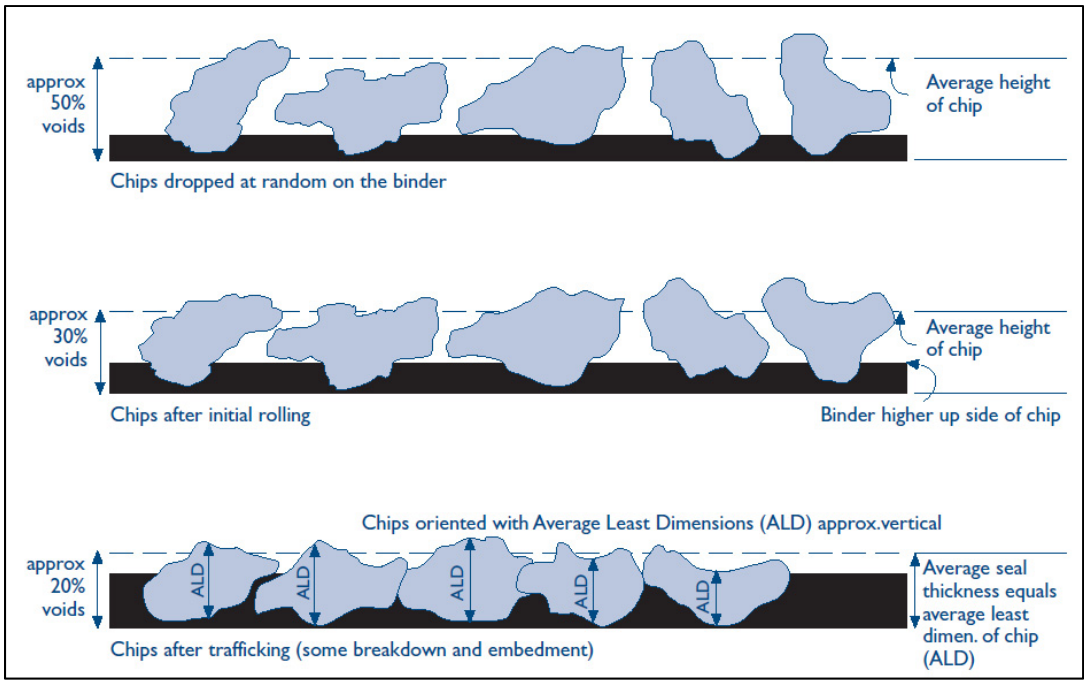


Figure 1.30 Évolution des vides lors de la fabrication du *chip seal*
Tirée de Zealand (2005)

Selon les observations d'Hanson, les vides doivent être comblés de 65% à 70% par le liant après le passage du rouleau compacteur pour éviter les problèmes d'arrachement ou de saignement. Le saignement, ou ressuage se manifeste lorsque le bitume remonte à la surface et recouvre complètement les granulats. Il augmente les risques de dérapage. De plus, Hanson créa la variable nommée *Average Least Dimension (ALD)* pour déterminer le taux de bitume résiduel optimal et l'épaisseur totale du traitement de surface. Pour déterminer l'ALD, Hanson mesurait la moyenne de la plus petite largeur de 200 granulats. Les granulats ont tendance à bouger de façon à avoir la plus petite largeur comme hauteur. Pour obtenir une surface texturée sans saignement ni arrachement, Hanson conclut qu'après la compaction des voitures, le teneur en vides des granulats sans liant est 20% et que 70% de ces vides

doivent être comblé par le bitume résiduel, de façon à avoir 6% de vides au final. Finalement, il en conclut une équation pour évaluer le taux de bitume résiduel à appliquer dans le traitement de surface:

$$R = ALD * 0.20 * 0.70 = 0.14 * ALD \quad (1.5)$$

Où :

R = Taux de bitume résiduel (l/m^2);

ALD = Moyenne de la plus petite largeur des granulats.

1.2.2.2 Méthode Nouvelle-Zélande

La méthode Nouvelle-Zélande est l'évolution de la méthode Hanson à laquelle on a ajouté des critères de performances. Cette méthode prend en considération le trafic et l'enfoncement des granulats du traitement de surface dans la couche inférieure, appelé substrat. En se basant sur la méthode Hanson, elle corrige le dosage d'émulsion selon la texture, la rigidité, l'absorption du substrat (Zealand, 2005). La méthode du cercle de sable est utilisée pour de déterminer la texture macroscopique du substrat (Zealand, 1981). L'essai consiste à mesurer le diamètre d'un volume de sable standardisé lorsqu'il est épandu sur le substrat. Une forte macro texture demande un dosage en liant plus élevé pour combler toute la surface existante.

La rigidité du substrat est évaluée à l'aide d'un marteau Marshall anciennement utilisé dans la formulation des enrobés à chaud (Ball, Patrick, & Herrington, 2005). La base du marteau est remplacée par une balle d'acier de 19 mm de diamètre. Le dosage en liant est modifié selon la pénétration de la balle. Lorsque le résultat de la pénétration d'un coup de marteau est plus élevé que 5 mm, l'utilisation du traitement de surface de *chip seal* n'est pas permise due aux risques de ressuage (Zealand, 2005). Au-dessus d'une pénétration de 5mm, les granulats s'enfoncent dans la chaussée et le bitume les recouvre. De plus, la méthode Nouvelle-Zélande utilise des coefficients de correction empiriques pour corriger le dosage en liant selon le trafic, l'absorption de la surface et la forme des granulats.

1.2.2.3 Méthode Kearby/Kearby modifiée

Durant les années 50, les États-Unis ont développé une méthode de formulation du *chip seal* en se basant sur la méthode de Hanson (Kearby, 1953). Cette méthode couvre le traitement de surface simple et multiple. McLeod a déterminé à l'aide de différents calculs la quantité de granulats et de liant nécessaires selon l'épaisseur du traitement de surface moyen, le pourcentage d'encastrement des granulats et le pourcentage de vides présent dans le traitement de surface (Adams, 2014). Kearby recommande d'utiliser des granulats de dimension uniforme et propose huit classes granulaires. Il met en évidence l'influence des particules plates et allongées et impose une limite. Selon Kearby, une proportion maximale de 10% de particules plates et allongées doit être respectée pour obtenir de meilleures performances. Entre autres, la méthode Kearby prend en considération la condition de la chaussée et le niveau de trafic en ajustant l'encastrement des granulats. Les granulats plus durs ont un encastrement plus élevé et les granulats moins rigides s'encastrent moins. De plus, des granulats plus gros diminuent l'encastrement et doivent être utilisés pour le trafic plus élevé (Shuler & Lord, 2010). Pour le trafic plus léger, l'encastrement est augmenté à l'aide de granulats plus petits.

1.2.2.4 Autres méthodes

En 2005, un document a été rédigé afin de synthétiser les différentes techniques de dimensionnement du traitement de surface réalisé au Canada et aux États-Unis (Gransberg, 2005). Le Tableau 1.12 présente les techniques utilisées au Canada et aux États-Unis. On note que la méthode empirique, qui se base sur l'analyse des performances des constructions existantes, est la méthode la plus utilisée aux États-Unis.

La méthode la plus utilisée au Canada est la méthode proposée par *Asphalt Institute* basée sur la théorie du critère de performance de McLeod (section 1.1.2). Après avoir sélectionné et caractérisé les granulats, le taux d'épandage de l'émulsion de bitume est obtenu à partir de table fournie par *Aspahlt Institute*. Des facteurs d'ajustement se font à partir d'observations

du concepteur (Lord, 2008). Par ailleurs, plus du tiers des *chip seal* est dimensionné par la méthode empirique pour les deux pays. Afin d'obtenir au traitement de surface, il est important d'ajuster le dosage des composants en évaluant la texture de la surface existante, les conditions du trafic (volume, vitesse et proportion de poids lourd), le climat et le matériau de traitement utilisé (émulsion, granulat et couple granulat-bitume).

Tableau 1.12 Méthodes de dimensionnement de traitement de surface utilisées au Canada et aux États-Unis
Tiré de Gransberg (2005)

Méthode de dimensionnement	États-Unis (%)	Canada (%)
Kearby/Kearby modifié	7	0
McLeod/*Asphalt Institute*	11	45
Méthode empirique (Expérience)	37	33
Méthode maison	19	0
Aucune méthode	26	22

Une méthode d'évaluation de performance à l'arrachement des traitements de surface est proposée par l'ASTM (ASTM, 2004). La méthode consiste à fabriquer un mélange de traitement de surface sur un disque asphalté et de le soumettre après un certain temps à un essai de balayage. La préparation des éprouvettes est développée à la section 2.2.1. Pour évaluer l'arrachement, l'ASTM propose d'utiliser la formule suivante :

$$\%\ d'arrachement = \left(\frac{A-B}{A-C}\right) \times 100 \times 1.33 = \left(\frac{A-B}{A-C}\right) \times 133 \tag{1.6}$$

Où :

A= Masse de l'éprouvette avant l'essai, en g;

B= Masse de l'éprouvette après l'essai, en g;

C= Masse du disque asphalté, en g.

1.3 Mastic des mélanges bitumineux à l'émulsion: impact des fines

Les sections présentées précédemment ont permis, entre autres, de mettre en évidence l'importance des fines dans le traitement de surface et ont montré qu'il pourrait être profitable de s'intéresser à l'interaction des particules fines avec l'émulsion de bitume. Lorsque les particules fines entrent en contact avec l'émulsion de bitume, un mastic se crée avec les fines et le bitume résiduel de l'émulsion de bitume (SFERB, 1988).

1.3.1 Composants du mastic des mélanges bitumineux à base d'émulsion

Dans la plupart des mélanges bitumineux à base d'émulsion de bitume, deux types de fines peuvent se retrouver dans le mastic provenant des fillers, nommés fines inertes et fines actives respectivement (Lee, 1964). Par définition, le filler inerte est composé de fines qui n'ont aucune réaction chimique en contact avec l'eau. Elles proviennent généralement des carrières des particules fines du calcaire, du basalte et du granulat bitumineux recyclé (GBR). Afin d'augmenter la capacité structurale de l'enrobé à l'émulsion et accélérer sa cure, un filler actif tel que le ciment Portland est parfois ajouté (Wang & Sha, 2010). Le filler actif réagit lorsqu'il entre en contact avec l'eau du mélange bitumineux à l'émulsion. Par conséquent, l'hydratation du ciment est affectée par la présence des goulettes de bitume de l'émulsion (Du, 2014). En effet, lorsqu'une grande quantité de ciment est combinée à une faible quantité d'émulsion, les goulettes de bitume enrobent les particules de ciment et ralentissent le processus d'hydratation du mastic. Toutefois, l'utilisation de la bonne proportion de ciment Portland accélère la cure du mélange dans les mélanges bitumineux à base d'émulsion.

Le filler actif réagit avec l'eau du mélange et augmente la rigidité du matériau. L'objectif principal d'utiliser le filler actif est d'accélérer le processus de cure du mélange bitumineux à l'émulsion tout en ayant une rigidité suffisante pour permettre le passage des véhicules le plus rapidement possible. Le processus d'hydratation du ciment dépend des conditions de cure du mélange (Humidité relative et température). De plus, l'utilisation du ciment augmente la résistance aux fissures et aux déformations permanentes (Needham, 1996). Les

propriétés et les proportions utilisées jouent un rôle majeur dans les performances du mélange bitumineux à base d'émulsion (Godenzoni, Graziani, & Corinaldesi, 2016; Nagelm & Al-Busaltan, 2013; Wang & Sha, 2010).

Plusieurs études ont montré que des granulats synthétiques et recyclés tels que la chaux hydratée, les laitiers granulés à haut fourneau et ses résiduels, la fumée de silice et la cendre de biomasse traitée peuvent améliorer les performances du mélange bitumineux et peuvent être utilisés comme substituts du ciment (Lachance-Tremblay et al., 2012, Carter, Gandi, & Singh, 2017; Godenzoni et al., 2016; Nagelm & Al-Busaltan, 2013; Wang & Sha, 2010). L'utilisation de ces sous-produits dans les mélanges bitumineux à l'émulsion réduit significativement la sensibilité aux déformations permanentes et aux dégâts reliés à l'eau en produisant un module de rigidité plus élevé (Nosseti, Pérez-Jiménez, Martinez, & Miró, 2016) tout en abaissant les gaz à effet de serre et le prix. Par exemple, les cendres de la biomasse ont un pourcentage d'absorption élevé et des propriétés cimentaires, ce qui augmente de 5 fois le module de rigidité simplement en ajoutant 5% au mélange bitumineux à l'émulsion (Nagelm & Al-Busaltan, 2013; Nassar & Thom, 2016).

La composition du mastic des mélanges bitumineux à base d'émulsion est donc le bitume résiduel de l'émulsion, les fines inertes de la fraction granulaire, les fines du GBR et les fines actives (Du, 2014).

1.3.2 Cure du mastic des mélanges bitumineux à base d'émulsion

Le filler actif augmente les propriétés mécaniques et la rigidité du matériau. Il réagit lorsqu'il entre en contact avec l'eau dans le mélange et crée des liaisons en modifiant la structure moléculaire du mélange (Nassar, Al-Ani, & Thom, 2016). Cette réaction évolutive est affectée par les conditions de cure qui modifieront les caractéristiques finales du mélange bitumineux. Le filler inerte ne réagit pas avec l'eau. Néanmoins, des propriétés telles que sa surface spécifique et sa distribution granulaire du filler inerte auront un impact au mélange

(Lee, 1964). La pénétration à l'aiguille et la ductilité du mastic diminueront avec la concentration en filler et sa viscosité augmentera (Robati, Carter, & Perraton, 2015).

La température de cure (T°) et l'humidité relative (HR) influencent significativement la rigidité du matériau à l'émulsion de bitume. L'augmentation de la température facilite l'évaporation de l'eau présente dans le mélange à l'émulsion de bitume et augmente ses propriétés mécaniques à jeune âge. Une température élevée augmente la rigidité du mélange en vieillissant le bitume de l'émulsion. Cependant, l'eau perdue par l'évaporation de la température de cure plus élevée peut gêner l'hydratation du ciment et diminuer son efficacité (Nagelm & Al-Busaltan, 2013). Une humidité relative élevée est le plus souvent désirable pour les matériaux lors la cure étant donné que la réaction se produit avec l'eau. Par contre, fournir plus d'humidité au matériau lorsque sa teneur en eau est suffisante pour l'hydratation du ciment est non nécessaire et peut même s'avérer nuisible (Godenzoni et al., 2016).

En laboratoire, le protocole de cure pour la plupart des mélanges bitumineux à l'émulsion s'effectue sur des éprouvettes compactées à l'aide d'un marteau Marshall et se produit en deux phases dues à leur comportement évolutif. Les éprouvettes sont en premier lieu conservées dans leur moule et sont scellées pour une courte période. Ensuite, ils sont démoulés et conditionnés dans une chambre environnementale à température et humidité contrôlées (Godenzoni et al., 2016; Nassar et al., 2016; Wang & Sha, 2010). Divers auteurs ont expérimenté différentes méthodes de cure afin de déterminer la relation avec la cure en chantier et les résultats sont présentés au Tableau 1.13.

Tableau 1.13 Équivalence en chantier des méthodes de cure en laboratoire des éprouvettes Marshall

Méthode de cure	Équivalence en chantier	Référence
3 jours à 60°C + 3 jours à 24°C	1 an	(Bowering, 1970)
3 jours 60°C	Construction + jeune âge	(Bowering & Martin, 1971)
3 jours 60°C	entre 23 et 200 jours	(Acott, 1980)

1 jour dans son moule à température pièce	Court terme	(Ruckel, Acott, & Bowering, 1982)
1 jour dans son moule à température pièce + 1 jour démoulée 40°C	7 à 14 jours	(Ruckel et al., 1982)
1 jour dans son moule à température pièce + 3 jours démoulée 40°C	30 jours	(Ruckel et al., 1982)

Tableau 1.13 Équivalence en chantier des méthodes de cure en laboratoire des éprouvettes Marshall (suite)

Méthode de cure	Équivalence en chantier	Référence
10 jours dans son moule à température pièce + 50 heures 60°C	N/A	(Wijk, Adriaan, & Wood, 1983)
3 jours dans son moule à température pièce + 4 jours dans un dessiccateur à vide à température de la pièce	N/A	(Little, N., Button, & Epps., 1983)
3 jours à 25°C	N/A	(Roberts, Engelbrecht, & Kennedy, 1984)
3 jours 60°C	1 an	(Maccarrone, Holleran, Leonard, & Hey, 1994)
3 jours 60°C	N/A	(Lancaster, McArthur, & Warwick, 1994)
12 heures scellés dans son moule à20-25°C et ensuite à 20±5°C et 90% HR	N/A	(Wang & Sha, 2010)
24 heures scellés dans son moule à 20°C et ensuite démoulé à différente T°	N/A	(Nagelm & Al-Busaltan, 2013)
24 heures scellés dans son moule à 20°C et ensuite démoulé à différente T° et HR	N/A	(Nassar & Thom, 2016)

1.3.3 Formulation de mastic des mélanges bitumineux à base d'émulsion

Pour les enrobés à l'émulsion de bitume, le pourcentage passant massique du tamis 75 µm doit se situer entre 3 à 8% du total granulométrique pour respecter les exigences du Ministère des transports Indien (Indian Roads Congrees, 2014; Nagelm & Al-Busaltan, 2013). La somme de la teneur en fines actives et inerte doit donc se retrouver dans cet intervalle. La Figure 1.31 présente les appellations des différents mélanges bitumineux à base d'émulsion en fonction de leur teneur en ciment et le résiduel de bitume. Les enrobés à l'émulsion contiennent généralement jusqu'à 2% de ciment par rapport à la masse totale des agrégats

séchés et contiennent le même dosage en bitume que les enrobés coulés à chaud. Les matériaux stabilisés à l'émulsion (BSM) et les matériaux traités au ciment-bitume (CBTM) contiennent tous les deux le même dosage en bitume mais se distinguent au niveau de la teneur en ciment. Le dosage en ciment des matériaux stabilisés à l'émulsion est plus faible afin de conserver les propriétés viscoélastiques du mélange (Grilli, Graziani, & Bocci, 2012). Afin de mieux comprendre le comportement de l'interaction entre le filler actif et l'émulsion de bitume, certains auteurs ne respectent pas les proportions présentées à la Figure 1.31 (Nassar et al., 2016; Nassar & Thom, 2016; Robati et al., 2015).

Pour bien représenter le mastic des enrobés bitumineux à froid, la teneur en filler actif et inerte doit respecter les critères établis par le Ministère Indien (Indian Roads Congrees, 2014). Afin d'avoir une éprouvette représentative des critères du Ministère et la Figure 30, la teneur en filler actif doit se situer entre 12.5% (1% de le teneur maximale en filler) et 66,6% (2% de la teneur minimale de filler) du contenu en filler total du mastic (Grilli et al., 2012).

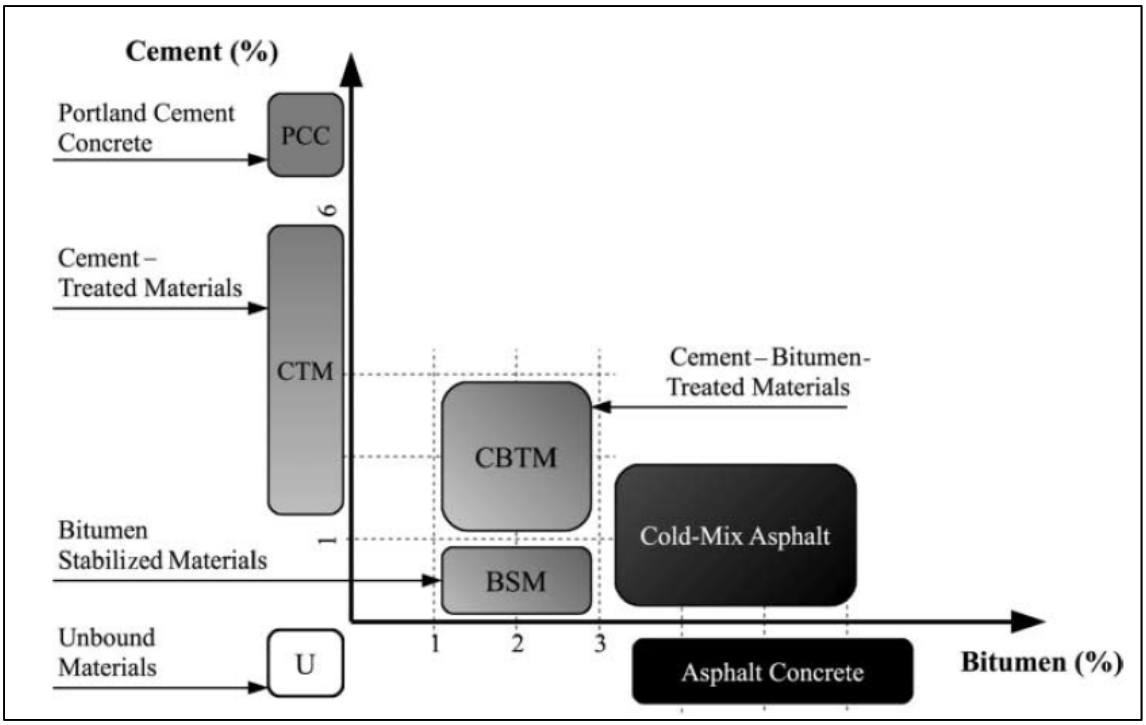


Figure 1.31 Composition conceptuelle des mélanges de chaussée à l'émulsion de bitume
Tirée de Grilli et al. (2012)

Afin d'estimer la teneur en émulsion de bitume des enrobés coulées à froid, le Ministère des routes indiennes propose la formule suivante (Indian Roads Congrees, 2014) :

$$P = 0.05A + 0.1B + 0.5C \quad (1.7)$$

Où :

P= Teneur en émulsion de bitume (en %) par rapport à la masse totale sèche du mélange;

A= Pourcentage retenu au tamis 2.36 mm (en %), masse sèche;

B= Pourcentage retenu au tamis 75 µm (en %), masse sèche;

C= Pourcentage passant le tamis 75 µm (en %), masse sèche.

En utilisant uniquement des particules fines ayant 100% passant le tamis 75 µm, la teneur en émulsion de bitume égale 50% de la masse sèche totale des granulats. Il est à noter que cette valeur n'est qu'une estimation et que d'autres essais sont requis pour obtenir une teneur optimale. Le Tableau 1.14 présente des proportions utilisées dans des études antérieures.

Tableau 1.14 Composition des mastics bitumineux à l'émulsion

Teneur en émulsion de bitume (%)	Teneur en fines (%)		Référence
	Actives	Inertes	
15-25	30-40	45-55	(Biswas, sahis, Majumder, Seal, & Mandal, 2016)
43	28	28	(Wang & Sha, 2010)
45	55		(Du, 2014)

Le ratio bitume-filler optimal dépend de différents facteurs tels que l'absorption, la surface spécifique et la distribution granulaire du filler utilisé (Lee, 1964). Conséquemment, l'émulsion de bitume est affectée par les propriétés du filler utilisé. Par exemple, la vitesse de rupture de l'émulsion dépend des caractéristiques et de la proportion utilisée du filler (Vega-Zamanillo, Calzada-Perez, & Castro-Fresno, 2011). Comme présenté à la Figure 1.32, le

mastic bitumineux présente 3 différentes régions en fonction de la teneur en filler. À faible concentration, le mastic est considéré dans la région diluée. C'est-à-dire que la distance entre 2 particules du filler dans le mastic est trop élevée et ces dernières n'interagissent pas entre elles et n'ont donc qu'une légère influence sur la rigidité du matériau.

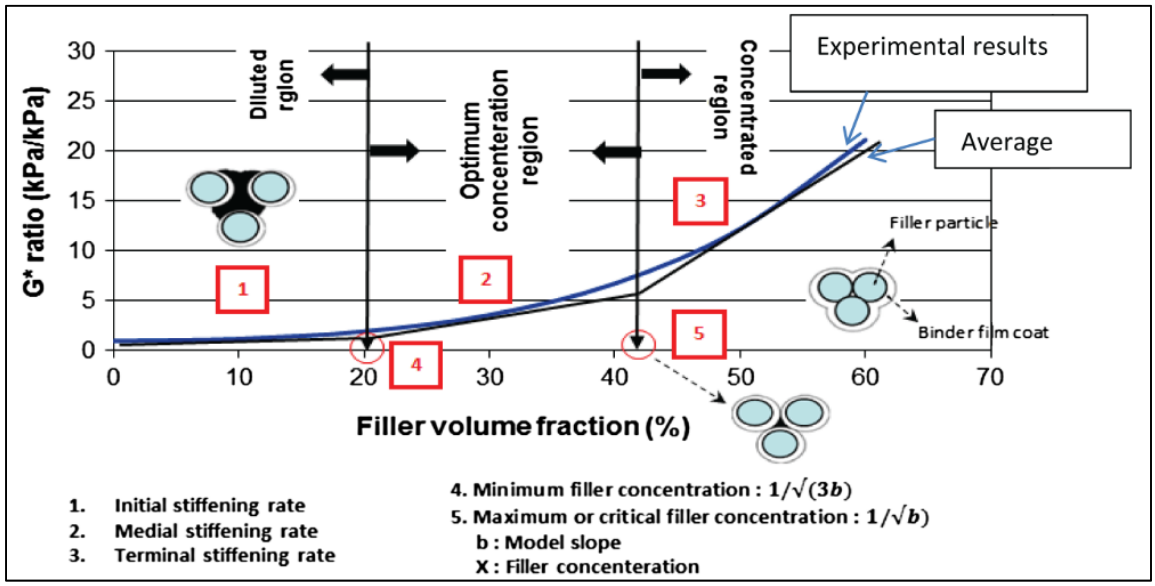


Figure 1.32 Schéma de l'évolution de la rigidité (ratio mastic/bitume original) en fonction de la teneur en filler (en %)
Tirée de Robati et al. (2015)

Avec l'augmentation de la concentration de filler, le matériau entre dans la seconde région appelée la région de concentration optimale. À partir de cette concentration, la distance entre 2 particules du filler est assez courte pour qu'elles débutent à interagir ensemble et la rigidité du mastic augmente légèrement (Robati et al., 2015). La zone optimale termine lorsque tout le bitume utilisé dans le mélange est absorbé par le filler. À partir de cette concentration, nommée la région concentrée, la rigidité du mastic augmente davantage avec l'ajout de filler. Par contre, l'enrobage des granulats est affecté et détériore l'adhésion du mastic. Le mastic joue un rôle de liant dans les enrobés bitumineux et le caractériser permet d'assurer encore mieux la performance de la chaussée (White, 2016). Pour évaluer l'influence des fines, il est donc important de se situer dans la région de concentration optimale du mastic. De manière à déterminer la concentration optimale de filler à utiliser, une évaluation visuelle et mécanique doit être effectuée avec les matériaux à l'étude (Robati et al., 2015).

Compte tenu de la dimension des particules du filler, il est préférable d'avoir des éprouvettes de petite taille pour favoriser l'homogénéité. Robati propose d'incorporer en premier lieu l'eau au filler (inerte et actif) et ensuite d'ajouter l'émulsion de bitume au mélange à l'aide d'une spatule en plastique. Après malaxage, l'éprouvette doit être soumise à une cure précise afin d'obtenir la rupture de l'émulsion. Pour ce faire, Robati propose dépose le mastic sur une plaque de granite utilisée dans la caractérisation des émulsions au Québec (Transport Québec, 2011), et Farrar propose d'utiliser le moule de la méthode d'essai du *Simple Aging Test* (SAT) qui permet de récupérer le résidu des émulsions en uniformisant l'épaisseur des éprouvettes mises à la cure (Farrar et al., 2013). En possédant les mêmes dimensions, les éprouvettes sont exposées davantage à des conditions de cure plus comparables. Une méthode d'essai ASTM propose d'utiliser une surface de type silicone pour récupérer le résidu d'une émulsion de bitume en utilisant une technique d'évaporatoire à basse température (ASTM, 2009b). L'émulsion est versée sur la surface en silicone et le taux d'application est enregistré.

1.3.4 Caractérisation des mastics de mélange bitumineux à base d'émulsion

Les mastics bitumineux doivent répondre à des critères de performances reliés à leurs caractéristiques tels que la rigidité du matériau et la résistance à la fissuration. Pour caractériser la rigidité des enrobés coulés à froid, le module d'essai de tension indirect (ITSM) est utilisé pour évaluer les propriétés viscoélastiques du mélange dans plusieurs études (Grilli et al., 2012; Nagelm & Al-Busaltan, 2013; Nassar et al., 2016). Pour les bitumes et les mastics bitumineux, le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) permet de déterminer la rigidité de ces derniers. En comparaison au bitume pur, le mastic agit comme un solide élastique lorsqu'il est sollicité à une charge rapide et une température froide. Il adopte le comportement d'un liquide visqueux lorsqu'une charge est appliquée lentement et que la température est plus élevée. Le module de cisaillement G* et l'angle de phase δ fluctuent à travers la température et la fréquence utilisées lors de l'essai (Sybilski, Vanelstraete, & Partl, 2004). Afin d'évaluer la résistance aux déformations permanentes

(l'orniérage), le mastic est caractérisé à haute température et basse fréquence. Pour résister à l'orniérage, le mastic doit être suffisamment rigide et élastique dans les conditions de l'essai. L'angle de phase définit la portion élastique et visqueuse des propriétés viscoélastiques du mastic. Un angle de 0° montre un comportement purement élastique et un angle de 90° montre un comportement purement visqueux (Perraton, 2013). L'AASHTO offre une méthode d'essai normalisé pour définir la température haute du grade de performance PG du bitume en utilisant une fréquence de 10 rad/seconde (AASHTO, 2010, 2016).

Pour les bitumes purs, les valeurs de G* et δ dépendront de plusieurs facteurs. La source du pétrole brut et les composants du bitume auront une grande influence sur la rigidité du matériau. Un bitume non modifié a un grade de performance PG de température élevée généralement de 52°C ou 58°C et peut aller jusqu'à 64°C pour les bruts de bonne qualité. Afin d'obtenir une meilleure rigidité à haute température, des polymères de type Styrène Butadiène Styrène (SBS) et des huiles aromatiques sont fréquemment ajoutés au bitume (Fernades, Forte, & Leite, 2008). La rigidité du bitume augmente tout au long de sa vie due à l'oxydation causée lors de sa fabrication (chaleur + air) et à travers le temps.

Les émulsions de bitume présentent sensiblement les mêmes propriétés que le bitume sauf qu'elles nécessitent une cure avant d'effectuer l'essai. Le processus de cure de l'émulsion se produit lorsque l'eau sort de l'émulsion à travers le temps (SFERB, 1988). Les particules de bitume fusionnent alors ensemble pour former le liant résiduel du matériau. Ce processus est appelé rupture de l'émulsion. Le temps de rupture est affecté par les paramètres environnementaux (température, humidité et vitesse du vent) et par la composition de l'émulsion (teneur en eau, type d'émulsifiant et dosage en émulsifiant). Entre autres, le surdosage en émulsifiants peut affecter les caractéristiques du bitume résiduel et par conséquent les essais de caractérisations sont requis. Il a été prouvé que l'épaisseur et l'aire des éprouvettes affectent directement le procédé de cure (Farrar et al., 2013). Les éprouvettes doivent donc avoir le même taux d'épandage et les mêmes conditions de cure afin de pouvoir être comparées.

Pour évaluer les performances en fatigue du liant, l'appareil de tension à double encoche (DENT) a été développé par le Ministère des Transports de l'Ontario (MTO). Cet essai est maintenant imposé pour l'acceptation des liants modifiés à plusieurs endroits. Cet essai couvre la détermination de la résistance du bitume à la rupture ductile en utilisant l'appareil développé par le MTO. Il détermine l'énergie élastique et plastique ($\mathbf{w_e}$ et $\mathbf{\beta w_p}$) en mesurant la force et la rigidité du matériau (AASHTO, 2015). L'appareil DENT propose d'utiliser trois largeurs différentes d'encoches pour ensuite les briser en tension avec une vitesse de déplacement fixe. À l'aide de ces valeurs, il est possible de déterminer le déplacement critique du point d'ouverture de la fissure (CTOD) qui donne une mesure de la tolérance à la déformation du matériau dans sa zone de ductilité. La ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer sans reprendre sa longueur initiale et sans se rompre. Les résultats de l'essai DENT peuvent être utilisés pour évaluer les performances de l'enrobé en chantier tels que la fissuration prématurée et excessive.

1.4 Sommaire de la revue de la littérature

Dans ce chapitre, il a été montré que les traitements de surface sont des matériaux bitumineux qui sont utilisés pour l'entretien des chaussées. Ils permettent d'imperméabiliser la chaussée tout en donnant une bonne texture de surface. Puisque les traitements de surface sont composés d'émulsion de bitume et de granulats, l'interaction entre les composantes est de première importance pour améliorer leurs performances. Afin de limiter les problèmes de fissurations, de ressuage et d'arrachement, le dosage des constituants est important, mais le type de granulats, et plus particulièrement des fines à un impact majeur sur le comportement à court et long terme. Des essais sont disponibles pour évaluer les caractéristiques des traitements de surface en laboratoire. Pour l'étude de l'interaction entre les fines et le bitume résiduel de l'émulsion de bitume, il est possible de travailler avec seulement le mastic. Par contre, aucune méthode de caractérisation n'a encore été établie.

CHAPITRE 2

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Problématique et objectif de l'étude

La revue de littérature a pu mettre en évidence certains points critiques. D'une part, la granulométrie du traitement de surface demande d'être le plus uniforme possible. De plus, la proportion des fines a un impact majeur sur l'arrachement des granulats. Le mastic des matériaux à base d'émulsion de bitume semble jouer un rôle crucial au niveau des performances, et ce pour tous types d'enrobés et matériaux bitumineux. La caractérisation des mastics bitumineux à base d'émulsion n'est pas encore très bien définie, et une étude plus approfondie mérite d'avoir lieu afin d'obtenir un aperçu des performances en chantier au niveau de la rigidité du mastic et de sa tolérance à la déformation. Également, la vitesse de cure des émulsions est affectée directement par les conditions climatiques. L'objectif de cette étude est donc d'évaluer l'impact des fines dans les mélanges bitumineux à l'émulsion.

Pour répondre à cet objectif, le travail a été séparé en 2 phases, soit : 1) Évaluation de l'influence des fines à l'arrachement dans les traitements de surface, et 2) Développement d'une méthode de caractérisation des mastics bitumineux des enrobés à l'émulsion. La première phase fut réalisée à l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) et la deuxième phase fut réalisée à l'*Indian Institute of Technology Bombay* (IIT Bombay), en Inde.

2.2 Méthodologie

Le diagramme présenté à la Figure 2.1 résume la méthodologie du projet. Pour chaque phase, les matériaux ont été sélectionnés en fonction de leur disponibilité sur place.

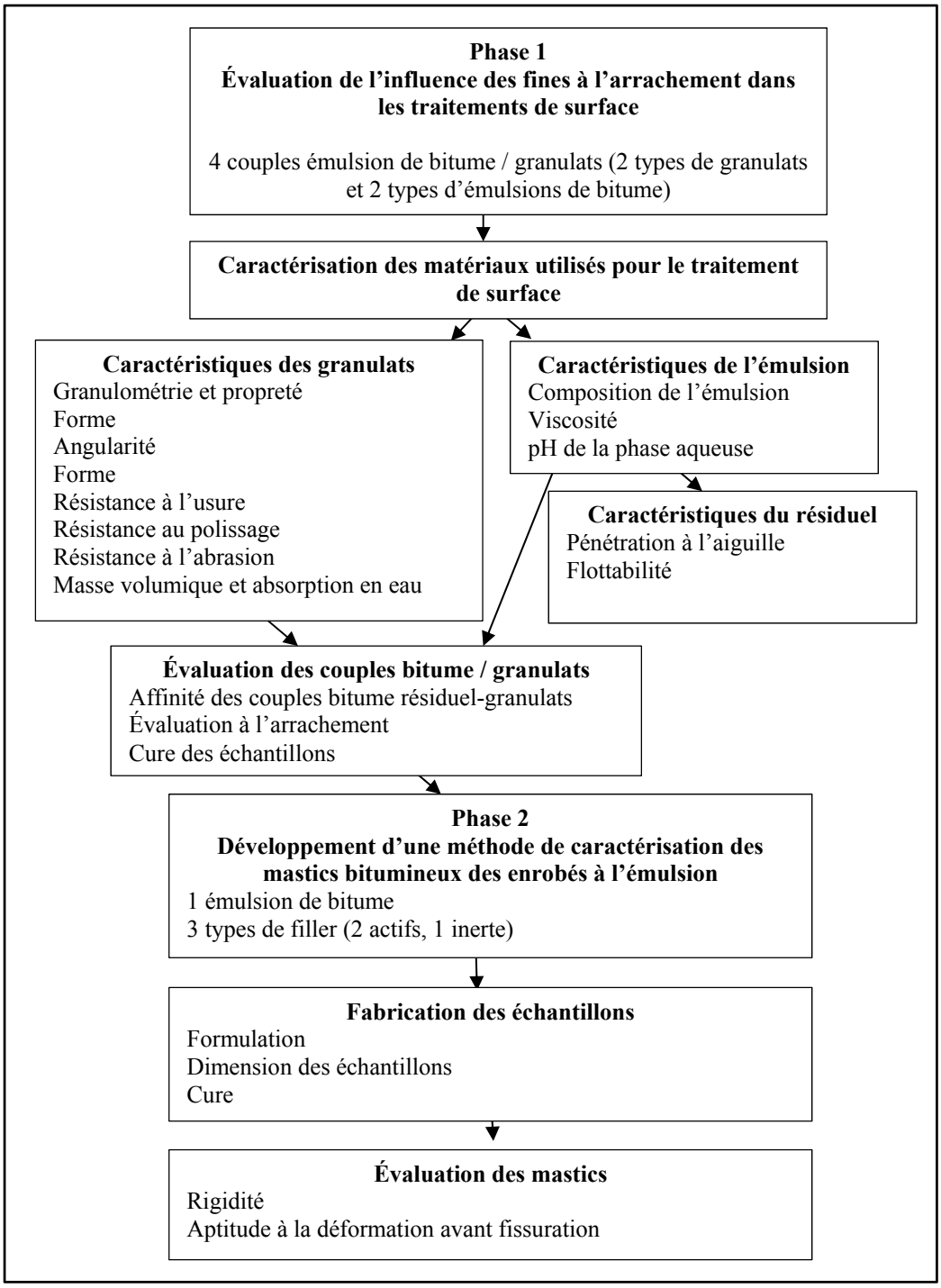


Figure 2.1 Diagramme de l'étude

2.3 Phase 1) Évaluation de l'influence des fines à l'arrachement dans les traitements de surface par temps froid

La première phase de l'étude visait à évaluer l'impact des particules fines dans les traitements de surface. Cette partie du projet fut réalisée au Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB), à l'ÉTS, Montréal. La formulation des matériaux de traitements de surface a été basée sur les critères du MTQ. Un essai visant à caractériser l'arrachement des granulats à l'aide d'un balayage répété a été réalisé sur les éprouvettes.

2.3.1 Présentation des matériaux à l'étude

Pour la phase 1, deux types de granulats (gabbro et granite) et deux types d'émulsions de bitume (CRS-2 et HFMS-2) ont été utilisés. Ces deux granulats ont été sélectionnés, car leur utilisation dans l'industrie des matériaux bitumineux au Québec est omniprésente. De plus, la teneur en silice élevée du granite l'amène à avoir une surface de contact chargée négativement. Inversement, la faible teneur en silice du gabbro lui confère une surface chargée positivement. Afin de respecter les critères du MTQ, des manipulations ont dû être réalisées pour modifier certaines caractéristiques des granulats. Les deux émulsions ont été fournies par l'entreprise McAsphalt et sont présentées plus loin dans ce chapitre.

2.3.1.1 Granulats

Les granulométries des différents mélanges ont été réalisées sur la base du fuseau granulométrique du traitement de surface de type 3 (TS3). Le Tableau 2.1 présente le fuseau granulométrique du traitement de surface type 3 ainsi que les deux granulométries des granulats à l'étude. L'analyse granulométrique a été effectuée selon la méthode d'essais du MTQ LC 21-040.

Tableau 2.1 Fuseau granulométrique du traitement de surface – Selon la norme 4301 du Ministère des Transports du Québec et granulats à l'étude

Tamis (mm)	% Passant

	Norme MTQ		Granulats à l'étude	
	CS (%)[A]	CI (%)[A]	Gabbro	Granite
14	100	100	100	100
10	100	85	94	90
6.3	-	-	32	33
5.0	15	0	9.8	9.4
2.5	3.0	0	4.1	3.2
1.25	-	-	3.0	2.6
0.630	-	-	2.5	2.3
0.315	-	-	2.2	2.2
0.160	-	-	1.9	2.0
0.08	0.7	0	1.6	1.7

[A] CS – Courbe Supérieure ; CI – Courbe Inférieure

L'analyse granulométrique des granulats montre que ces derniers ne respectent pas les critères MTQ au tamis 2.5mm et 80µm. La teneur en granulats fins et en particules fines est trop élevée pour le granite et le gabbro. Les granulats ont donc été tamisés au tamis 5mm afin d'obtenir une granulométrie plus serrée qui respecte les exigences du MTQ. Le retenu du tamis 5mm a ensuite été lavé au tamis 2.5mm ensuite pour enlever les fines. Le Tableau 2.2 montre la granulométrie des granulats après séparation et lavage (0% fines).

La fraction passant le tamis 5mm a été récupérée pour créer des particules fines. Un concasseur à mâchoire modèle *Fritsch P1, I* a permis de réduire la dimension jusqu'à 1mm. Ensuite, les granulats ont été placés dans un broyeur à disques et anneau oscillants *Pulverisette 9*. La matière minérale fine a été récupérée pour être combinée aux gros granulats. Pour chaque type de granulat, 2 teneurs en fines sont évaluées (0.0% et 0.7%). Le Tableau 2.2 présente les quatre granulométries à l'étude. Tous les mélanges à l'étude respectent les exigences MTQ.

Tableau 2.2 Granulométries à l'étude après tamisage

Tamis	Limite TS3[A]	Gabbro 0%	Gabbro 0.7%	Granite 0%	Granite 0.7%

		CS	CI	fines	fines	fines	fines
mm	20	-	-	100	100	100	100
	14	100	100	100	100	100	100
	12.5	-	-	100	100	100	100
	10	100	85	95	95	91	91
	6.3	-	-	22	23	23	24
	5	15	0	0.3	0.9	0.3	1
	2.5	3	0	0.2	0.8	0.2	0.9
	1.25	-	-	0.1	0.8	0.1	0.8
µm	630	-	-	0.1	0.8	0.1	0.8
	315	-	-	0.1	0.8	0.1	0.8
	160	-	-	0.1	0.8	0.1	0.8
	80	0.7	0	0.0	0.7	0.0	0.7

[A] CS – Courbe Supérieure ; CI – Courbe Inférieure

En plus de la granulométrie, des essais de caractérisation des granulats ont été réalisés. Le Tableau 2.3 synthèse les caractéristiques du gabbro et du granite.

Tableau 2.3 Caractéristiques des granulats à l'étude

Caractéristiques		Gabbro	Granite	Méthode d'essai	Exigence MTQ 4301
Intrinsèques	Micro-Deval (MD)	8.1	8.0	LC 21-070	≤ 25
	Los Angeles (LA)	29	29	LC 21-400	≤ 50
	Densité Brute	2.894	2.710	LC 21-067	-
	Densité apparente	2.938	2.757		-
	Absorption (%)	0.51	0.56		-
	Micro-Deval et Los Angeles (MD + LA)	37.1	37.0	LC 21-070 LC 21-400	≤ 70

[A] Essai effectué sur la partie retenue 10mm
[B] Cu=D80/D20 (diamètre des grains au point de la courbe granulométrique où le pourcentage passant est de 80% et 20%)

Tableau 2.3 Caractéristiques des granulats à l'étude (suite)

Caractéristiques	Gabbro	Granite	Méthode d'essai	Exigence MTQ 4301

Fabrication	Coefficient d'uniformité (Cu)	1.50	1.58	MTQ 4301[B]	≤ 1.6
	Particules allongées (%)[A]	17.3	5.7	LC 21-265	≤ 50
	Particules plates (%)[A]	22.5	23.5		≤ 30
	Particules plates et allongées (%)[A]	5.7	1.6		-
	Fragmentation (%)	90.3	88.8	LC 21-100	≥ 60

[A] Essai effectué sur la partie retenue 10mm
[B] Cu=D80/D20 (diamètre des grains au point de la courbe granulométrique où le pourcentage passant est de 80% et 20%)

2.3.1.2 Émulsion de bitume

Deux types d'émulsions de bitume ont été utilisés pour cette étude et proviennent tous les deux de l'entreprise McAsphalt. La première est une émulsion cationique à rupture rapide et haute viscosité (CRS-2) et la deuxième est une émulsion anionique à rupture moyenne, à haute viscosité et bitume à haute flottabilité (HFMS-2). McAsphalt a recommandé l'émulsion HFMS-2 malgré la non-conformité de la norme établie par le MTQ. Afin de mieux comprendre le fonctionnement des émulsions, l'ÉTS a tenté de fabriquer ses propres émulsions avec l'Émulbitume. Ce travail inclut donc la mise en fonction de l'équipement Émulbitume à l'ÉTS, la calibration des composants de l'équipement et la procédure de réalisation des émulsions. L'Annexe II présente la feuille de fabrication d'émulsion et l'Annexe III présente le travail effectué avec l'Émulbitume (calibration, fabrication d'émulsions, essais). Après plus de 25 tentatives, l'option de fabriquer les émulsions de bitume pour ce projet a été retirée. Chaque tentative exigeait au minimum 4 jours de nettoyage et demandait beaucoup de solvant. De plus, un travail de programmation est requis pour rendre l'équipement apte à fabriquer des émulsions de bitume. L'Annexe IV présente les fiches techniques des émulsions fournies par McAsphalt. Le Tableau 2.4 synthétise les caractéristiques des émulsions à l'étude.

Tableau 2.4 Caractéristiques des émulsions de bitume à l'étude selon le fournisseur

Caractéristiques	Essais	Émulsion à l'étude

		CRS-2	HFMS-2
Fraction résiduelle, en %	ASTM D6997	64.3	62.9
Fraction huile, en %		0.0	1.5
Fraction eau, en %		35.7	35.6
pH de la phase aqueuse	STEBMOP 110*	2.4	11.4
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, en s	ASTM D7496	162	188
Pénétration à l'aiguille à 25°C, en dmm[1]	ASTM D5	170	130
Essais de flottabilité, en s[1]	ASTM D139	-	> 1200

* Essai maison de McAsphalt et STEB
[1] Essai effectué sur le résiduel après distillation de l'émulsion

Les deux émulsions ont la même teneur en eau, mais l'émulsion CRS-2 possède une fraction du résiduel plus élevée. La fraction d'huile de l'émulsion HFMS-2 comble la différence des proportions entre les deux émulsions. Une des propriétés affectées par l'huile est, entre autres, la pénétration à l'aiguille lorsque le bitume est mélangé à l'huile. Un bitume plus rigide a donc été utilisé pour la fabrication de l'émulsion HFMS-2. L'émulsion HFMS-2 reste cependant plus visqueuse que l'émulsion CRS-2.

2.3.2 Fabrication des éprouvettes pour l'essai résistance à l'arrachement

La fabrication des éprouvettes pour l'essai de balayage fut réalisée en se basant sur la méthode d'essais ASTM D7000. Des disques de 300mm de diamètre ont été fabriqués à partir d'un rouleau de feutre asphalté #30 de BP Canada. Pour les aplatir, les disques ont été mis à l'étuve à 50°C pour une période de 72 heures avec une charge appliquée. Ensuite, les disques ont été retirés et laissés curer à température ambiante pour un minimum de 3 jours avant de commencer la réalisation des éprouvettes. La Figure 2.2 montre les étapes de réalisation des disques de feutre asphaltés.

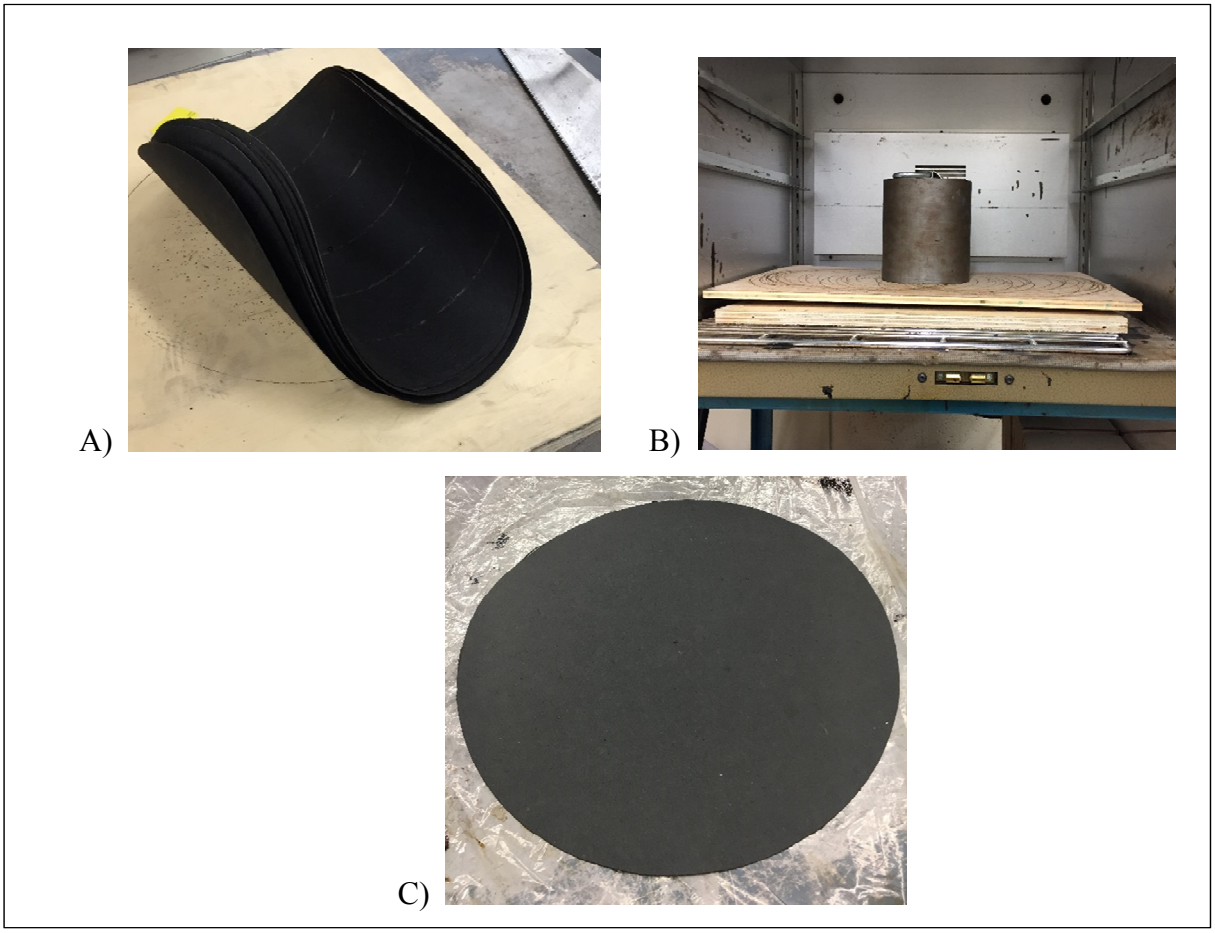


Figure 2.2 Fabrication d'une éprouvette pour l'essai de balayage : préparation des disques de feutre asphalté - A) Coupe de disques de 300mm de diamètre dans le rouleau #30. B) Disque mis à l'étuve sous une charge pour 72 heures. C) Disque aplati après l'étuve

Pour fabriquer les éprouvettes de traitement de surface, une plaque en acier inoxydable de 16 *Gauge US* (1.52mm d'épaisseur) ayant un trou de 280mm a été déposée sur le disque de feutre asphalté préalablement pesé. Une quantité de 95g d'émulsion à 60°C a été versée sur la partie supérieure de la surface de travail de façon à être en mesure d'atteindre toute l'aire exposée du disque. L'émulsion a été ensuite étalée à l'aide d'une tige métallique, d'un seul mouvement continu. La plaque en acier est par la suite retirée pour y déposer les granulats, tels que présentés à la Figure 2.3. On dépose les granulats le plus rapidement possibles pour avoir un contact granulat-émulsion de bitume avant la rupture de l'émulsion. Dans cette étude, l'absorption du papier asphalté n'a pas été prise en compte.

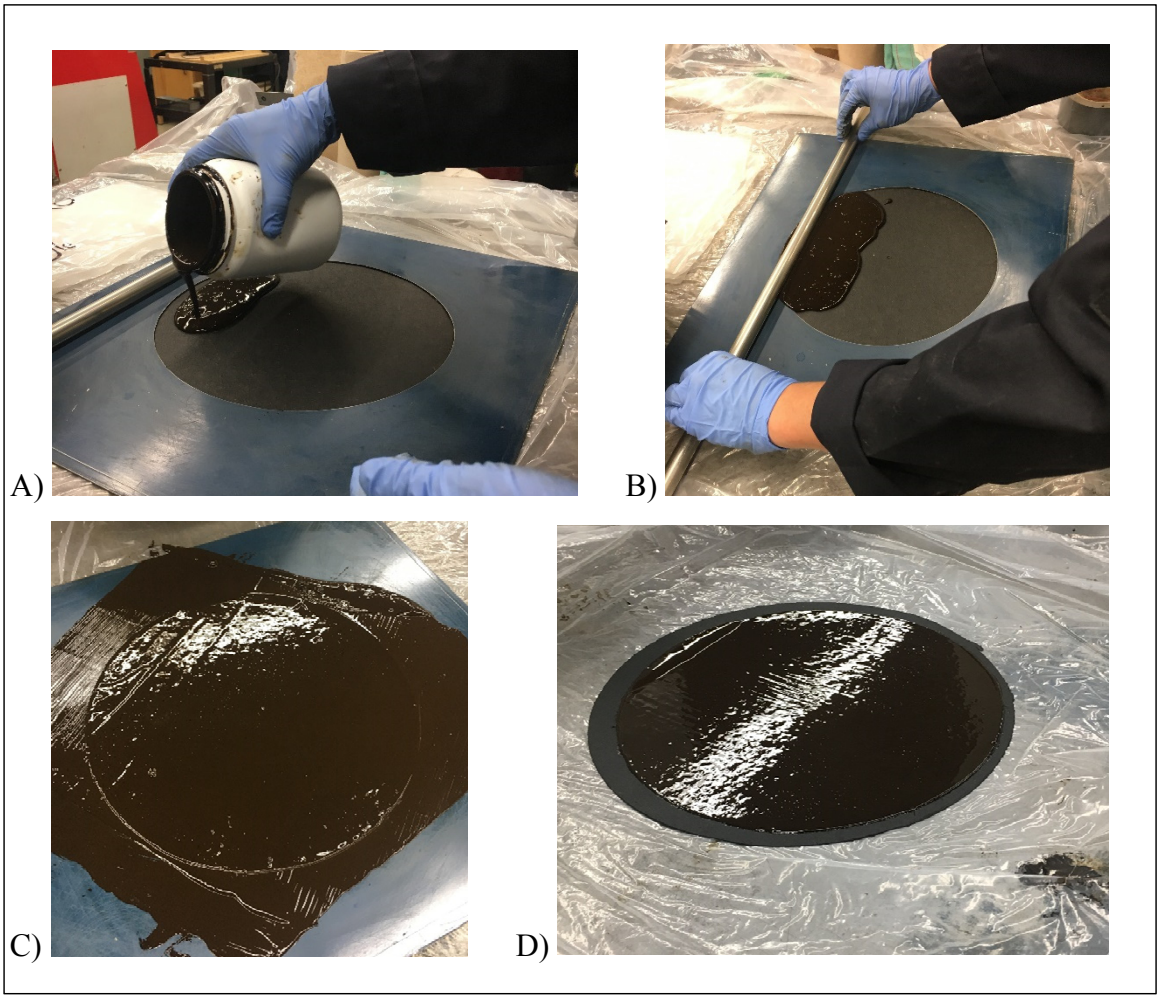


Figure 2.3 Fabrication d'une éprouvette pour l'essai de balayage: coulage de l'émulsion de bitume. – A) Coulage de l'émulsion sur le disque asphalté dans le gabarit. B) Épandage de l'émulsion à l'aide de la tige de métal. C) Photo après épandage avec gabarit. D) Éprouvette avant la mise en place des granulats

Les granulats dont la masse a été préalablement enregistrée sont transférés dans un bol et déposés sur le disque d'un mouvement de va-et-vient. La formule qui a été utilisée pour déterminer la quantité de granulats à utiliser est la suivante (ASTM, 2004) :

$$Y = \frac{A\ (202.1X - 15.8)}{100} + \frac{B\ (146.4X - 4.7)}{100} \tag{2.1}$$

Où :

A= Pourcentage de granulats situé entre 10 mm et 6.3 mm, en %;

B= Pourcentage de granulats situé entre 6.3 mm et 5 mm, en %;

X= Densité brute des granulats utilisés;

Y= Quantité de granulats requis pour la réalisation de l'éprouvette, en g.

Les endroits où les granulats sont plus nombreux sont ensuite déplacés à la main pour maximiser le contact entre le granulat et l'émulsion. Selon la méthode d'essai ASTM D7000, l'éprouvette a été compactée immédiatement après la mise en place des granulats à l'aide d'une plaque ayant un rayon de courbure de 550mm et une masse de 7500g. Pour réaliser la compaction, la plaque a été déposée sur l'éprouvette et trois demi-cycles ont étés effectués sur le disque. Les demi-cycles ont été effectués en levant un côté de la plaque et en le laissant tomber en prenant soin de ne pas appliquer de pressions supplémentaires sur l'éprouvette. La plaque de compaction a été ensuite tournée à 90° pour refaire trois demi-cycles et la masse de l'éprouvette totale a été enregistrée. La Figure 2.4 démontre l'étape des granulats et de leur compaction lors de la fabrication des éprouvettes pour le traitement de surface.

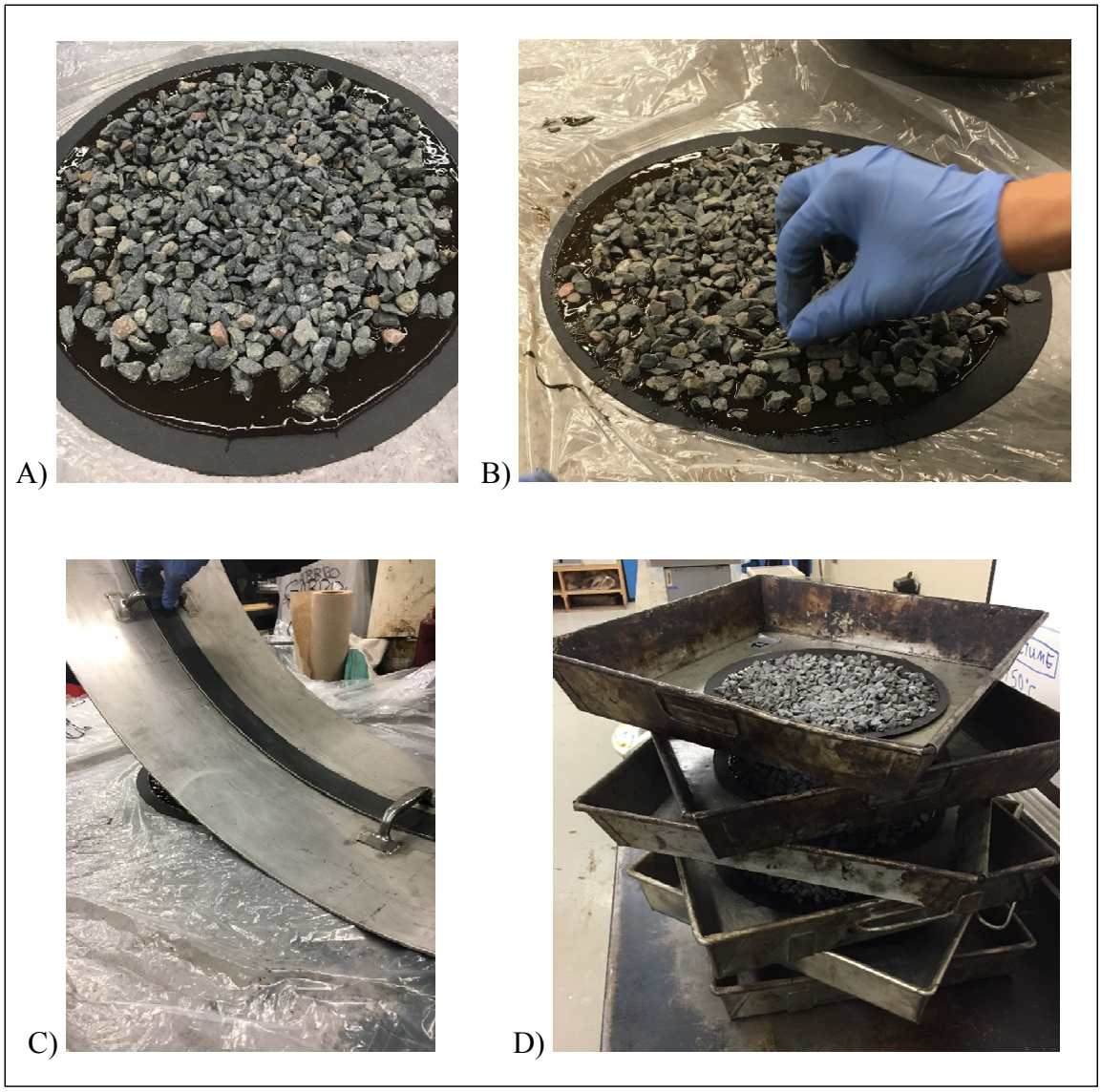


Figure 2.4 Fabrication d'une éprouvette pour l'essai de balayage: mise en place et compaction des granulats – A) Dépôt des granulats sur l'émulsion de bitume. B) Ajustement de la répartition des granulats sur l'éprouvette. C) Compaction de l'éprouvette. D) Cure de l'éprouvette à température pièce

Tous les échantillons ont été ensuite laissés pour faire une cure totale de sept jours. Des premiers essais avec une moins longue période de cure ont montré des problèmes de répétabilité. Le balai utilisé pour l'essai d'arrachement s'imbibait de bitume lors de l'essai et augmentait l'arrachement des échantillons testés après. Deux températures de cures ont été réalisées pour la phase 1. La première cure est une cure à température et humidité ambiantes dans le laboratoire du LCMB. La température et humidité ont été enregistrées deux fois par

jour, soit à 9h00 et à 16h00 et les températures relevées étaient en moyenne 21°C et 50% d'humidité pour la première cure à température pièce. La deuxième cure a été réalisée à l'aide d'une chambre environnementale contrôlée, à 5°C et 50% d'humidité. Cette cure a été sélectionnée. Au total, 16 différents mélanges ont été évalués à l'essai de balayage. Le Tableau 2.5 synthèse les éprouvettes mis à l'essai. Pour chaque mélange, trois éprouvettes ont été soumis à l'évaluation de la résistance à l'arrachement, pour un total de 48.

Tableau 2.5 Types d'éprouvettes mis à l'essai de balayage (arrachement)

Type de granulats	Température de la cure*	Teneurs en fines (%)	Type d'émulsion	Nom
Gabbro	21±2°C	0.0	CRS-2	GA.0,0%-C-21°C
			HFMS-2	GA.0,0%-H-21°C
		0.7	CRS-2	GA.0,7%-C-21°C
			HFMS	GA.0,7%-H-21°C
	5±1°C	0.0	CRS-2	GA.0,0%-C-5°C
			HFMS-2	GA.0,0%-H-5°C
		0.7	CRS-2	GA.0,7%-C-5°C
			HFMS	GA.0,7%-H-5°C
Granite	21±2°C	0.0	CRS-2	GR.0,0%-C-21°C
			HFMS-2	GR.0,0%-H-21°C
		0.7	CRS-2	GR.0,7%-C-21°C
			HFMS	GR.0,7%-H-21°C
	5±1°C	0.0	CRS-2	GR.0,0%-C-5°C
			HFMS-2	GR.0,0%-H-5°C
		0.7	CRS-2	GR.0,7%-C-5°C
			HFMS	GR.0,7%-H-5°C
* l'humidité de la cure est 50% pour toutes les éprouvettes				

Toutes les éprouvettes ont eu une cure de 7 jours dont la masse a été enregistrée quotidiennement pour évaluer son évolution. Après la cure, les éprouvettes ont été pesées et mises à la verticale. À l'aide des doigts, les granulats ont été flattés et le surplus de granulats a été enlevé avant de procéder à l'essai de balayage (Figure 2.5). Ensuite, l'échantillon a été fixé sur le malaxeur sans le remonter en attente de la mise à l'essai. Le temps d'attente entre la sortie de l'échantillon et l'essai a été trois minutes pour tous les essais.





Figure 2.5 Fabrication de l'éprouvette pour l'essai
de balayage : préparation des éprouvettes avant l'essai. –
A) Enlèvement du surplus d'agrégats. B) Essai d'arrachement

Après le temps d'attente, le malaxeur est activé à vitesse #1 pendant 50 secondes, selon la méthode d'essai et le type de malaxeur utilisé. L'éprouvette est récupérée et est remise à la verticale pour enlever les granulats qui ont été arrachés par l'essai. Les granulats ont été frottés avec les doigts et la masse finale de l'éprouvette a été enregistrée.

2.4 Phase 2) Développement d'une méthode de caractérisation des mastics bitumineux des enrobés à l'émulsion

Dans la deuxième phase de l'étude, les efforts ont été concentrés sur les mastics des enrobées à l'émulsion. Afin d'obtenir un mastic se situant dans la zone optimale (Figure 1.30 section 1.3.3), les matériaux à l'émulsion avec une teneur en fines plus élevée que les matériaux de traitement de surface ont été sélectionnés. Possédant une teneur plus élevée, l'influence des fines est davantage observable qu'en étant dans la zone diluée. Cette partie de l'étude s'est déroulée à l'IIT Bombay, à Mumbai, avec des matériaux indiens utilisés dans l'industrie de la construction en Inde. L'indisponibilité des matériaux sur place a fait en sorte que des matériaux différents de la phase 1 ont été utilisés. Toutes les formulations de la phase 2 ont été basées sur les critères du Ministère Indien des Transports (Indian Roads Congrees, 2014).

Des essais au rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) et à l'appareil de tension à double encoche (DENT) ont été réalisés pour caractérisation des mastics selon leurs rigidités et leur aptitude à déformer avant fissuration, respectivement.

2.4.1 Présentation des matériaux

Une seule émulsion de bitume a été utilisée dans la phase 2 de l'étude : Une émulsion cationique à faible taux d'huile, appelée SS-1, de *Hincol India*, à Mumbai (Hincol, 2014). Les émulsions de bitume cationiques à prise lente sont les émulsions les plus communément utilisées pour les enrobés à froid. Le filler inerte utilisé pour cette étude est récupéré à partir des filtres à poussières de la centrale d'enrobage *Supreme* à Navi Mumbai. Le filler récolté a dans un premier temps été mis à l'étuve jusqu'à l'obtention d'une masse constante afin de le sécher.

Deux types de fillers actifs ont été utilisés pour mener à bien cette étude. Le premier filler était de la cendre volante (nommé FA) de classe F généré par la combustion du charbon pulvérisé en centrales thermique. La particularité de la cendre volante classe F est qu'elle contient moins de 10% d'oxyde de calcium (CaO) et que ses deux principaux composants sont la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3). Les particules sont sphériques avec une surface lisse et possèdent des propriétés pouzzolaniques qui permettent d'obtenir des propriétés hydrauliques (Nadaf & Mandal, 2013). Le deuxième filler actif était un Ciment Ordinaire Portland (nommée OPC). Les Tableaux 2.6 et 2.7 présentent les propriétés des fillers actifs et de l'émulsion de bitume respectivement. La Figure 2.6 présente la distribution granulaire des cendres volantes.

Tableau 2.6 Propriétés des fillers actifs
Tiré de Nadaf & Mandal (2013)

Propriétés chimiques		
Composition chimique	Cendre volante classe F, FA (%)	Ciment ordinaire Portland, OPC (%)

Alumine (Al_2O_3)	26.82	4.40
Oxyde de baryum (BaO)	0.07	0.00
Oxyde de calcium (CaO)	1.13	63.10
Oxyde de fer (Fe_2O_3)	5.49	2.70
Pentoxyde de phosphore (P_2O_5)	0.25	0.00
Oxyde de potassium (K_2O)	0.94	0.00
Oxyde de magnésium (MgO)	0.96	2.10
Oxyde de manganèse (MnO)	0.03	0.00
Silice (SiO_2)	61.32	20.30
Trioxyde de souffre (SO_3)	0.08	3.40
Strontiane (SrO)	0.06	0.00
Dioxyde de titane (TiO_2)	1.65	0.00
LOI* (%)	1.23	4.00
* LOI: *Lost On Ignition* (perte au four à ignition en %, à 800°C)		
Propriétés physiques		
Densité (ASTM C188)	2.15	3.15
Retenu au tamis 45 µm (%) (ASTM C430)	55.0	5.0
Surface spécifique (cm^2/g) (ASTM C204)	224	401

Tableau 2.6 Propriétés de l'émulsion de bitume
Tiré de Hincol (2014)

Émulsion de bitume Hincol SS-1	
Résidu sur le tamis 600 µm (% max)	0.05
Viscosité Saybolt Furol 25 ºC (s)	20-100
Temps de rupture (heures)	Moins de 48
Teneur en bitume résiduel par évaporation (% min)	50
Coagulation à basse température (en dessous de 0 ºC)	Oui

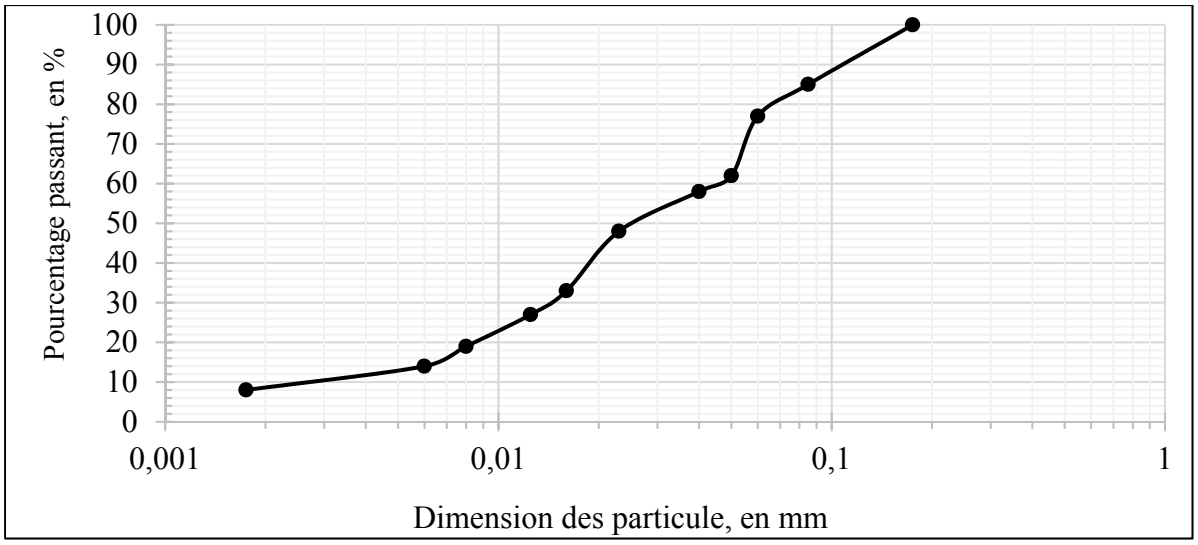


Figure 2.6 Distributions granulaires du filler actif de type cendre volante classes F (FA)
Adaptée de Nadaf & Mandal (2013)

2.4.2 Préparation des éprouvettes

Différentes proportions de fillers actifs et inertes (15-85, 30-70, 45-55 et 60-40) ont été mélangées avec l'émulsion de bitume fournie par *Hincol*. Pour chaque processus de malaxage, le filler inerte a été tamisé au tamis 75 µm afin d'éliminer les plus grosses particules indésirables. Puisqu'il n'y a pas de protocole précis sur la fabrication de mastic bitumineux, deux méthodes de malaxage ont été utilisées pour cette étude, appelées Méthode 1 et Méthode 2 :

Méthode 1 : Pour la première méthode de malaxage, les fillers actifs et inertes ont d'abord été mélangés directement sur le tapis en silicone pour obtenir un mélange homogène. L'émulsion de bitume est ensuite ajoutée et le mastic est mélangé pendant 3 minutes à l'aide d'une tige de verre.

Méthode 2 : Pour la deuxième méthode de malaxage, le filler inerte a tout d'abord été mélangé à l'émulsion de bitume directement sur le tapis en silicone, puis le filler actif a été ajouté progressivement tout en malaxant 3 minutes avec la tige de verre.

2.4.3 Cure des mastics bitumeux

Après malaxage, le mastic sur le tapis de silicone a été recueilli pour créer une boule de mastic. La boule a été ensuite remise sur le tapis pour être répandue à l'aide d'une tige de verre. La baguette de verre a été roulée sur la bille de mastic jusqu'à l'obtention d'un taux de propagation de 2.00 kg/m^2 à 3.00 kg/m^2. Après avoir enregistré le taux d'étalement, les éprouvettes ont été placées sur une surface plane en silicone à température pièce (25 °C) pour une période de 24 heures puis au four à 60 °C pendant 48 heures. Suite à la période de cure, les éprouvettes ont été sorties de l'étuve pour procéder aux essais. La Figure 2.7 présente les étapes de fabrication des éprouvettes.

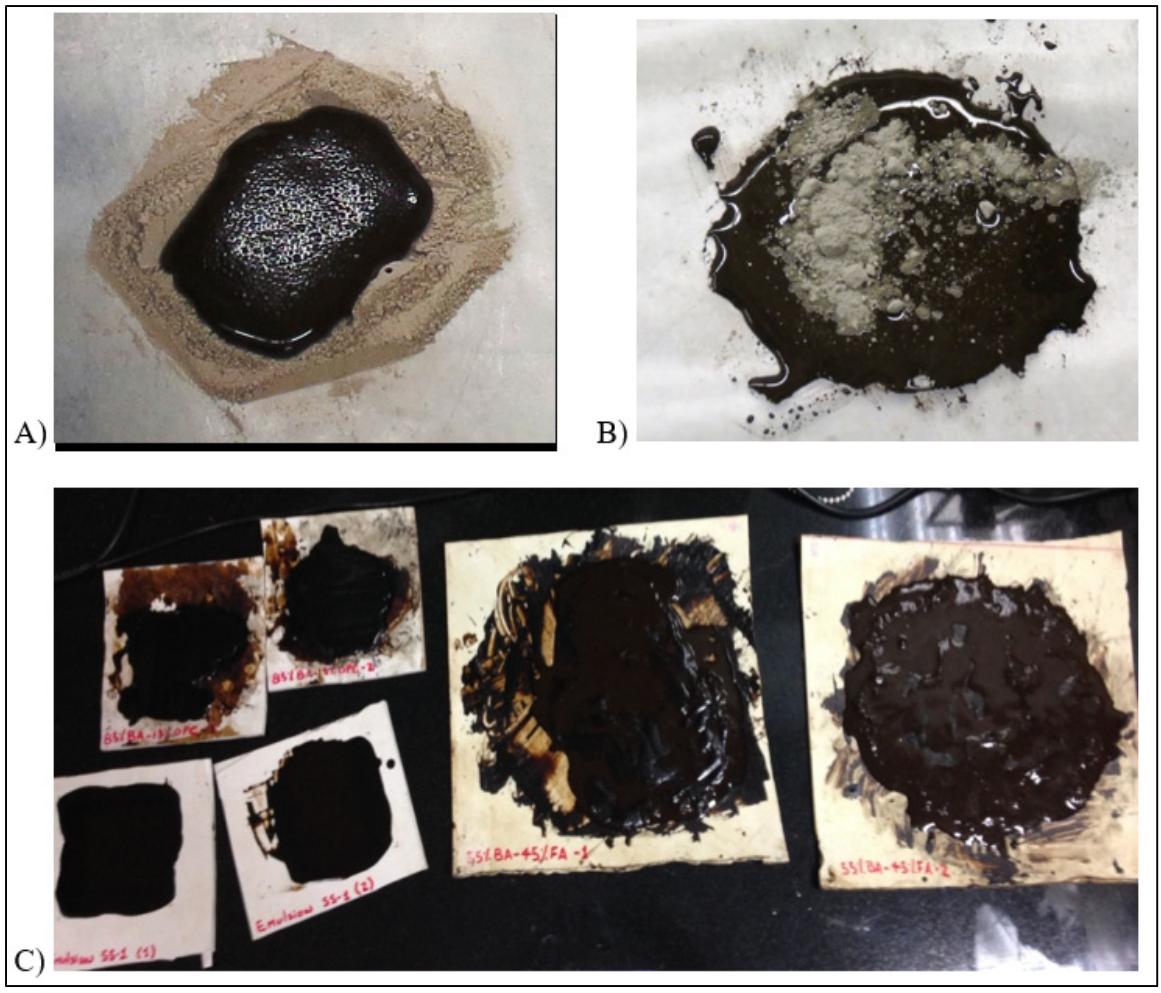


Figure 2.7 Préparation des éprouvettes – A) Les deux fillers sont mélangés ensemble avant l'ajout de l'émulsion (méthode de malaxage 1).
B) Le filler inerte et l'émulsion sont mélangés ensemble avant d'ajouter le filler actif (méthode de malaxage 2).
C) Échantillons après cure.

2.4.4 Composition des mastics bitumineux mis à l'étude

D'après la littérature, la meilleure proportion d'émulsion de bitume à utiliser dans la formulation d'un mastic bitumineux doit représenter environ 50% de la masse totale du mélange (Indian Roads Congrees, 2014). Afin d'évaluer visuellement l'ouvrabilité du matériau, des mastics ont été fabriqués en mélangeant l'émulsion de bitume et le filler inerte basalte à différentes proportions (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 et 80% massique). L'évaluation a

été effectuée visuellement sur la maniabilité du mastic lors de l'étalement. La Figure 2.8 montre trois concentrations de filler différentes. Pour favoriser l'hydratation du filler actif et les manipulations, une proportion de 60% massique par rapport à la masse totale du mastic en émulsion de bitume a été choisie. Le Tableau 2.8 montre la proportion utilisée des composants du mastic bitumineux. Tous les mastics respectent les normes indiennes quant à la proportion des différents fillers dans les enrobés bitumineux à froid (Grilli et al., 2012; Indian Roads Congrees, 2014).

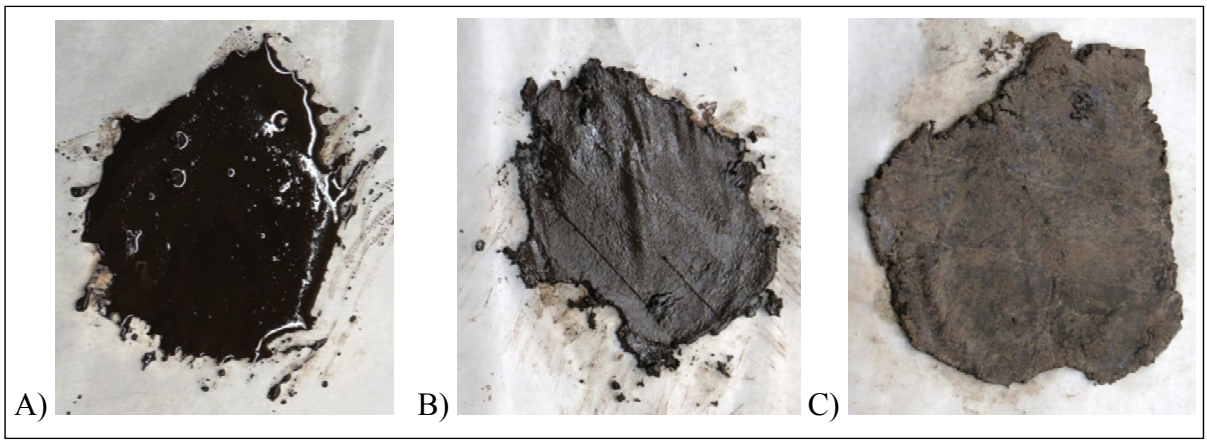


Figure 2.8 Évaluation de la concentration optimale de filler. - A) Concentration de filler à 20%. B) Concentration de filler à 50%. C) Concentration de filler à 70%

Tableau 2.7 Composition des mastics à l'étude

	Rapport massique filler Actif – Inerte			
	15-85	30-70	45-55	60-40
Émulsion SS-1	60%	60%	60%	60%
Filler actif (FA ou OPC)	6%	12%	18%	24%
Filler inerte (basalte)	34%	28%	22%	16%

2.4.5 Dimension des éprouvettes

La masse totale de l'éprouvette destinée à l'évaluation de la rigidité au rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) est de 15g. La partie centrale de l'éprouvette a été prélevée et

placée sur la plaque inférieure du DSR à une température de 80 °C pendant 1 minute. Cette température est la température pour le protocole d'utilisation du DSR de l'IITB. Le mastic a été ensuite comprimé à son espacement spécifique (1 mm) entre les deux plaques du DSR et mis à 60°C pour démarrer l'essai.

Pour l'essai DENT, trois éprouvettes de 125 grammes ont été coulées dans l'objectif de remplir deux moules DENT. Suite à la procédure de cure (24 heures à 25°C et 48 heures à 60°C), les moules DENT ont été remplis de mastic pour être ensuite remis à l'étuve pour une période de 4 heures. Comme présenté à la Figure 2.9, des essais préliminaires ont démontré que sans cette période à l'étuve, l'éprouvette était inutilisable. Les éprouvettes ont été par la suite retirées de l'étuve pendant 2 heures pour finalement être arasées à l'aide d'une lame chauffée. L'arasement assure une bonne dimension des éprouvettes. Avant de procéder à l'essai DENT, toutes les éprouvettes ont été conditionnées au bain-marie pendant 3 heures à la température d'essai.

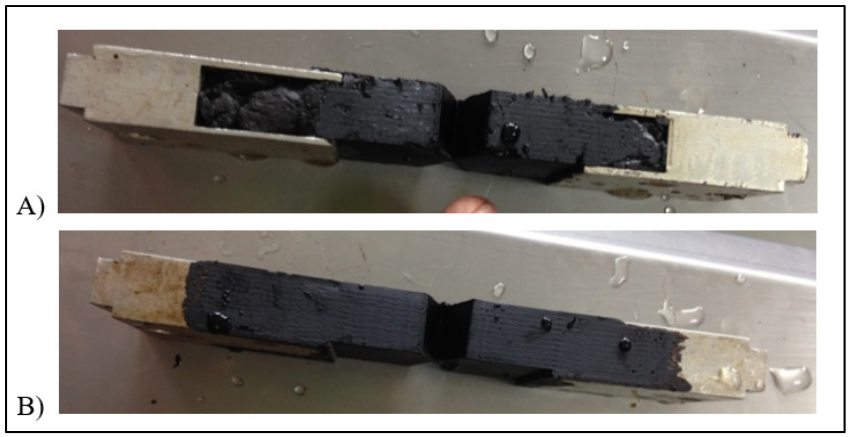


Figure 2.9 Exemple d'éprouvette DENT –
A) Éprouvette avant 4 heures supplémentaires dans
l'étuve à 60°C. B) Éprouvettes après 4 heures à 60°C

Le tableau 2.9 résume les paramètres des équipements DSR et DENT lors des essais. Les paramètres du DSR suivent la méthode pour déterminer le grade de performance PG d'un bitume vieilli au RTFOT selon *Superpave*. La méthode DENT suit l'essai AASTHO LS-299, mais la vitesse de déformation a été ralentie. Des essais préliminaires ont démontré une rupture précoce à une vitesse de 50mm/sec.

Tableau 2.8 Paramètres des appareils DSR et DENT

DSR		DENT	
Nombre d'éprouvettes par essai	3	Nombre d'éprouvettes par essai	2
Épaisseur de l'échantillon, en mm	1.0	Vitesse de déplacement (mm/min)	25
Diamètre de l'échantillon, en mm	25.0	Dimensions des encoches (mm)	5, 10, 15
Température d'essai, en °C	64, 70, 76, 82, 88	Température de l'eau (°C)	15
Fréquence, en rad/s	10.0		

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors du projet et l'analyse est présentée au chapitre 4. Les résultats de la phase 1 sont présentés en premier suivi des résultats de la phase 2. Les données récoltées en laboratoire sont détaillées à l'Annexe VI.

3.1 Phase 1) Évaluation de l'influence des fines sur la résistance à l'arrachement dans les traitements de surface

La phase 1 visait à réaliser des essais selon la méthode d'essai ASTM D7000 (Méthode standard pour l'essai de balayage des échantillons de traitement de surface en émulsion bitumineuse) pour évaluer l'influence des fines dans le traitement de surface. Pour chaque formulation, trois éprouvettes ont été réalisées pour traiter les données. La phase 1 couvre deux items, soit l'évolution de la cure des éprouvettes ainsi que les résultats d'arrachements. Des informations plus détaillées sur les éprouvettes sont présentées à l'annexe V.

3.1.1 Cure des éprouvettes

Lors de leurs cures, les éprouvettes ont été pesées pour observer l'évolution de leurs cures en fonction du temps. En prenant compte de trois éprouvettes par mélange, les courbes ont été obtenues en faisant la moyenne du pourcentage d'eau perdu des éprouvettes. Les Figures 3.1 et 3.2 présentent les résultats de la cure des éprouvettes de traitement de surface pendant sept jours de cure pour le gabbro et le granite respectivement. Pour déterminer l'évaporation en eau des éprouvettes, les formules suivantes ont été utilisées:

$$M_{eau\,(t)} = \left(M_{(t)} - M_{Disque} - M_{ag.}\right) * \%_w * 100 \tag{3.1}$$

$$\%_{d'eau\,évaporé} = 1 - \frac{M_{eau\,(t)}}{M_{eau\,(0)}} * 100 \tag{3.2}$$

Où :

$M_{eau\ (t)}$= Masse d'eau restante dans l'éprouvette à l'instant t, en g;

$M_{(t)}$= Masse de l'éprouvette à l'instant t, en g;

M_{Disque}= Masse du disque asphalté de l'éprouvette, en g;

$M_{ag.}$= Masse sèche des agrégats de l'éprouvette, en g;

$\%_{w}$= Fraction eau dans l'émulsion de bitume de bitume utilisé (sans huile et bitume), en %;

$\%_{d'eau\ évaporé}$e= Pourcentage d'eau évaporée, en %

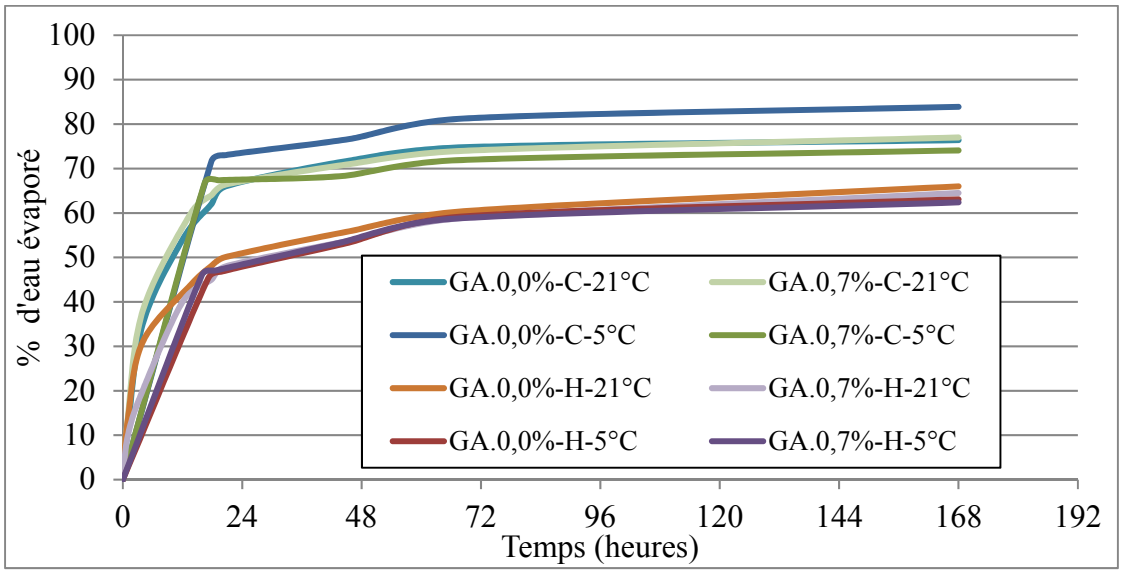


Figure 3.1 Évolutions moyennes (n=3) de la perte en eau lors de la cure des éprouvettes contenant du gabbro

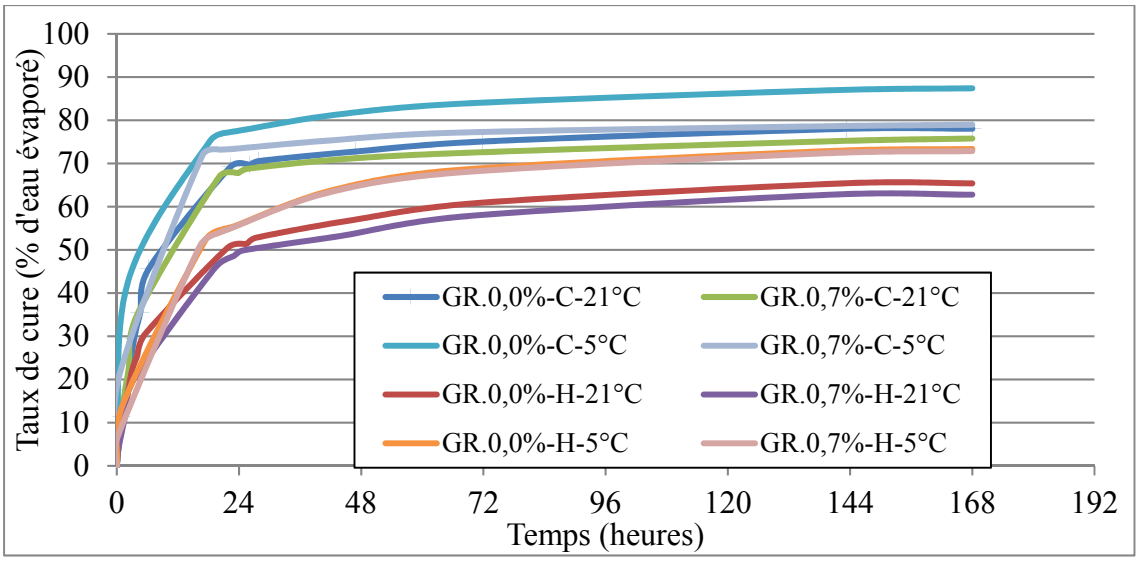


Figure 3.2 Évolution moyenne (n=3) de la perte en eau lors de la cure des éprouvettes contenant du granite

Pour chaque type de granulat, la cure de l'émulsion présente un comportement similaire. Pour les mélanges avec le granulat gabbro (Figure 3.1), les mélanges à l'émulsion cationique (CRS-2) ont curé à plus de 70% sans jamais dépasser 90% et les mélanges à l'émulsion à haute flottabilité (HFMS-2) ont obtenu un taux de cure situé entre 60% et 70% après sept jours (168 heures). Le traitement de surface ayant le plus curé est le mélange GR.0,0%-C-5°C suivi du mélange GA.0,0%-C-5°C avec plus de 85% d'eau évaporé. Les mélanges GR.0,7%-H-21°C et GA.0,7%-H-5°C sont les mélanges ayant le moins curé après sept jours avec moins de 65% d'eau évaporé. Pour tous les mélanges, la cure n'a pas été complétée. L'émulsion curée à la surface semble ralentir la cure en scellant la surface.

3.1.2 Résultats de la résistance à l'arrachement

Après une période de cure de 7 jours, les éprouvettes ont été mises à l'essai de balayage expliqué au Chapitre 2 afin d'évaluer l'arrachement. La Figure 3.3 résume l'ensemble des résultats d'arrachement obtenus à l'essai de balayage. Pour chaque type de mélange, trois éprouvettes ont été réalisées. Les résultats montrent la moyenne des résultats obtenus avec leurs écarts-types. Les masses enregistrées en laboratoire pour déterminer l'arrachement sont

présentées à l'annexe VI. Pour déterminer la résistance à l'arrachement des traitements de surface, les données ont été traitées avec l'équation 1.6 proposée par l'ASTM :

$$\%\ d'arrachement = \left(\frac{A-B}{A-C}\right) \times 100 \times 1.33 = \left(\frac{A-B}{A-C}\right) \times 133 \qquad (3.3)$$

Où :

A= Masse de l'éprouvette avant l'essai, en g;

B= Masse de l'éprouvette après l'essai, en g;

C= Masse du disque asphalté, en g.

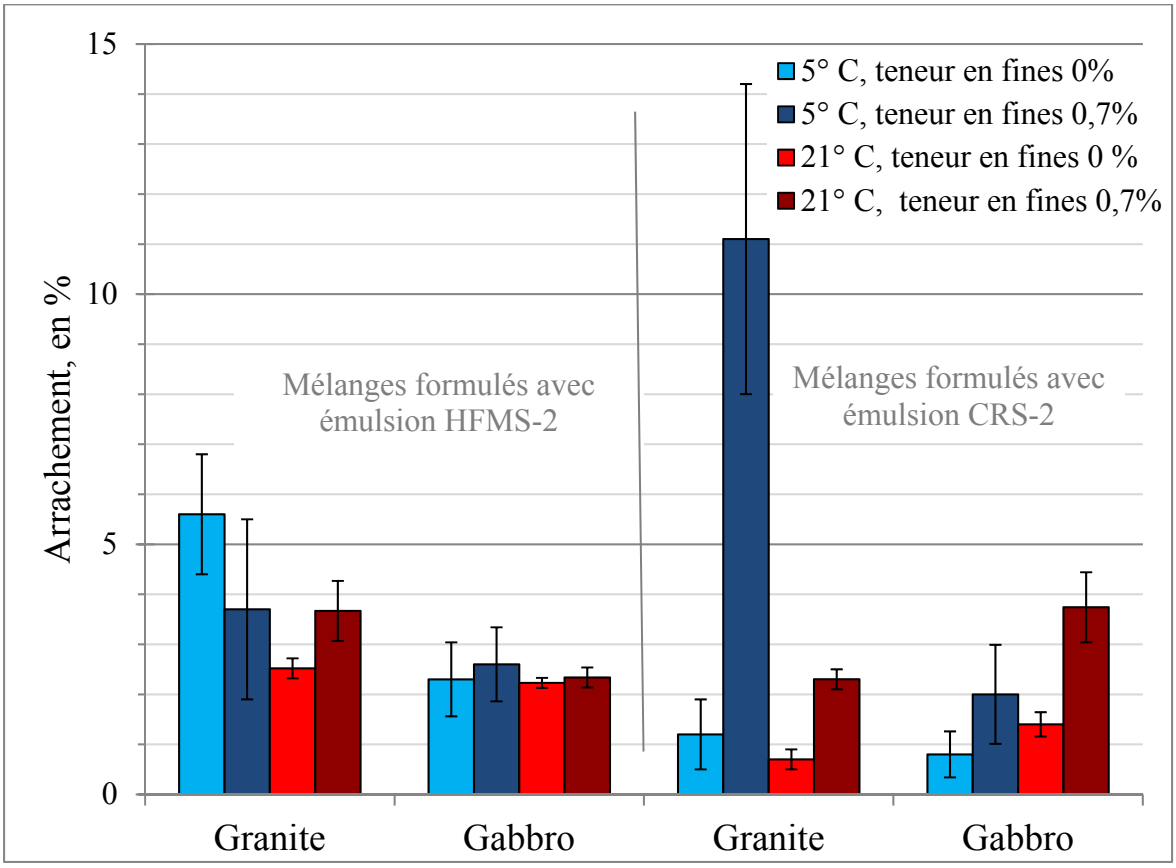


Figure 3.3 Résultats moyens (n=3) d'arrachement obtenus à l'essai de balayage avec écarts-types

Mise à part une exception, tous les résultats obtenus avec l'émulsion de bitume cationique CRS-2 présentent une meilleure résistance à l'arrachement qu'avec l'émulsion HFMS-2.

L'arrachement maximal est obtenu avec le mélange GR.0,7%-C-5°C avec une moyenne de 11.1%. De même, le matériau ayant la meilleure résistance est le mélange GA-0,0%-C-5°C avec 0.8% d'arrachement. Dans l'ensemble, tous les matériaux ont donné de bons résultats, c'est-à-dire que 14 mélanges sur 16 présentent moins de 5% d'arrachement.

3.2 Phase 2 - Développement d'une méthode de caractérisation des mastics bitumineux des enrobés à l'émulsion

Afin d'obtenir une méthode de caractérisation des mastics bitumineux à l'émulsion, la phase 2 fut effectuée. L'évaluation des mastics a été d'abord basée sur la rigidité du matériau en évaluant sa résistance aux déformations à l'aide du rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR). Les essais au DSR ont été réalisés à des températures relativement élevées (64°C, 70°C, 76°C, 82°C et 88°C). Les mastics ont ensuite été évalués en fonction de leur ductilité à l'aide de l'appareil de tension à double rebord (DENT) à une température de 15°C. Cette section présente les résultats obtenus à l'aide du DSR et de l'appareil DENT.

3.2.1 Résultats au DSR

Les sections 3.2.1.1 et 3.2.1.2 présentent les résultats obtenus au DSR. Comme mentionné précédemment, deux méthodes de malaxage ont été utilisées.

3.2.1.1 Méthode de malaxage 1

La méthode de malaxage 1 consistait à mélanger le filler inerte et actif ensemble sur le tapis en silicone jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. Après avoir malaxé les deux fillers, l'émulsion de bitume fut ajoutée au mélange et malaxée à l'aide d'une tige en verre pendant 3 minutes. Les Figures 3.4 et 3.5 présentent les résultats obtenus à l'essai DSR de la cendre volante (FA) et du ciment (OPC) respectivement avec la méthode de malaxage 1. Les courbes ont été réalisées en effectuant une moyenne de 3 éprouvettes testées à 64°C, 72°C, 80°C et 88°C.

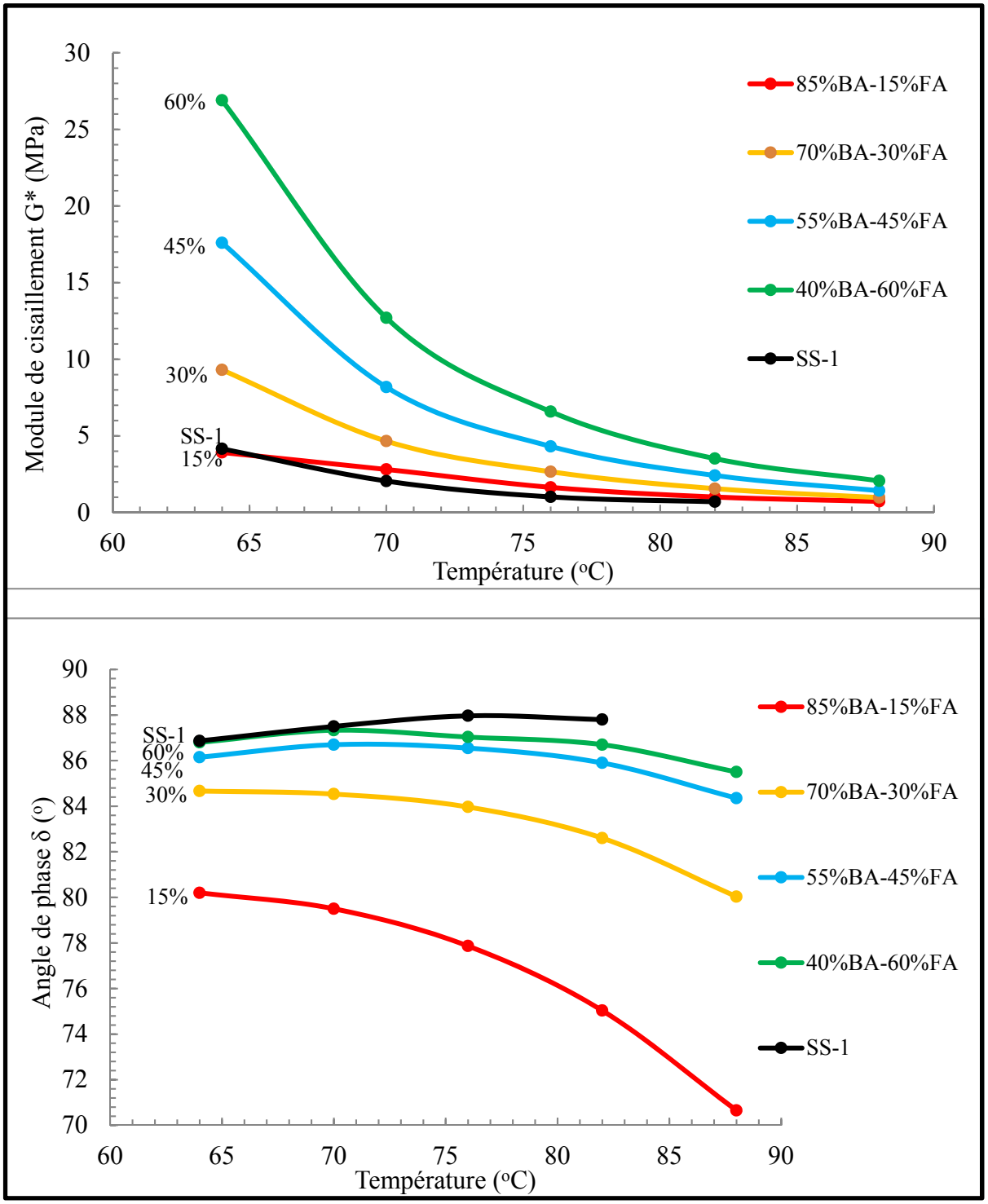


Figure 3.4 Résultats au DSR pour les échantillons avec la cendre volante (FA) avec la méthode de malaxage 1 à 10Hz. Module de cisaillement (en haut) et angle de phase (en bas)

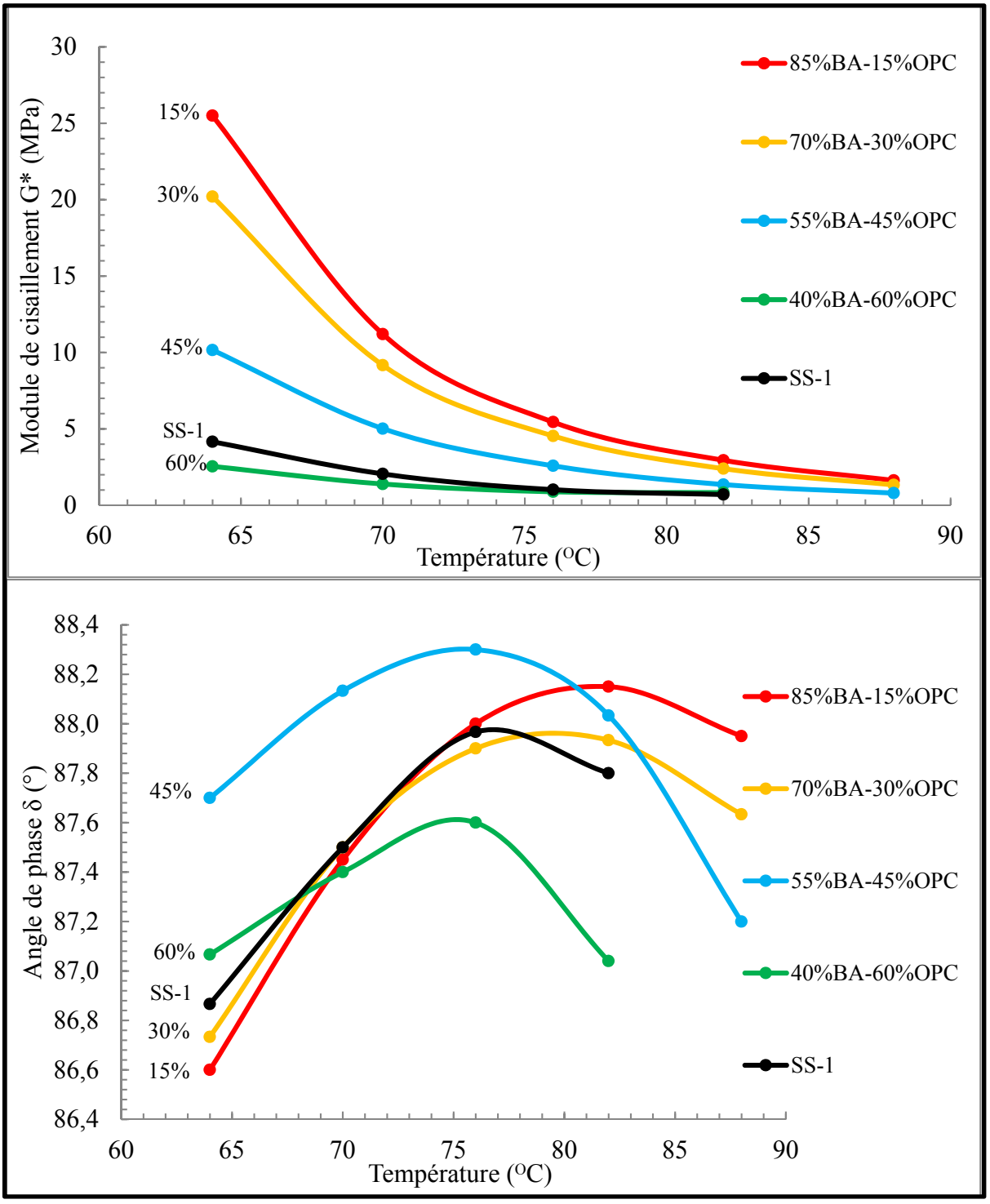


Figure 3.5 Résultats au DSR pour les éprouvettes avec du ciment ordinaire Portland (OPC) avec la méthode de malaxage 1 à 10Hz. Module de cisaillement (en haut) et angle de phase (en bas)

Pour les mélanges à la cendre volante formulée avec la méthode de malaxage 1, les résultats suivent la théorie, i.e. la rigidité du mastic augmente linéairement avec la teneur en filler actif. À 64°C, le mastic ayant la plus forte teneur en cendre volante (40%BA-60%FA) obtient la plus haute rigidité (26.90 MPa) et le mélange avec la plus faible teneur en filler actif (85%BA-15%FA) est légèrement plus rigide (3.92 MPa) que l'émulsion SS-1 mise à l'essai seul.

Par contre, les résultats obtenus avec le ciment OPC contredisent la théorie. La rigidité du matériau décline avec l'augmentation de la teneur en ciment. À 64°C, le mélange avec la plus faible teneur en ciment (85%BA-15%OPC) est celui qui offre la meilleure rigidité (25.50 MPa). De plus, le mélange avec la plus haute teneur en ciment (40%BA-60%OPC) est le mélange avec la plus faible rigidité (2.54 MPa) se situant en dessous de l'émulsion SS-1 testée seule.

3.2.1.2 Méthode de malaxage 2

Pour réaliser cette méthode, comme mentionné précédemment, le filler inerte a premièrement été mélangé à l'émulsion de bitume pour ensuite y ajouter le filler actif graduellement en malaxant avec une tige en verre. Afin d'obtenir un mélange homogène, le mastic a été malaxé pendant 2 minutes après l'ajout du filler actif. Les Figures 3.6 et 3.7 montrent les résultats au rhéomètre à cisaillement dynamique avec la deuxième méthode de malaxage, avec la cendre volante et le ciment Portland respectivement. Les courbes ont été obtenues en effectuant la moyenne sur trois essais à 64°C, 72°C, 80°C et 88°C.

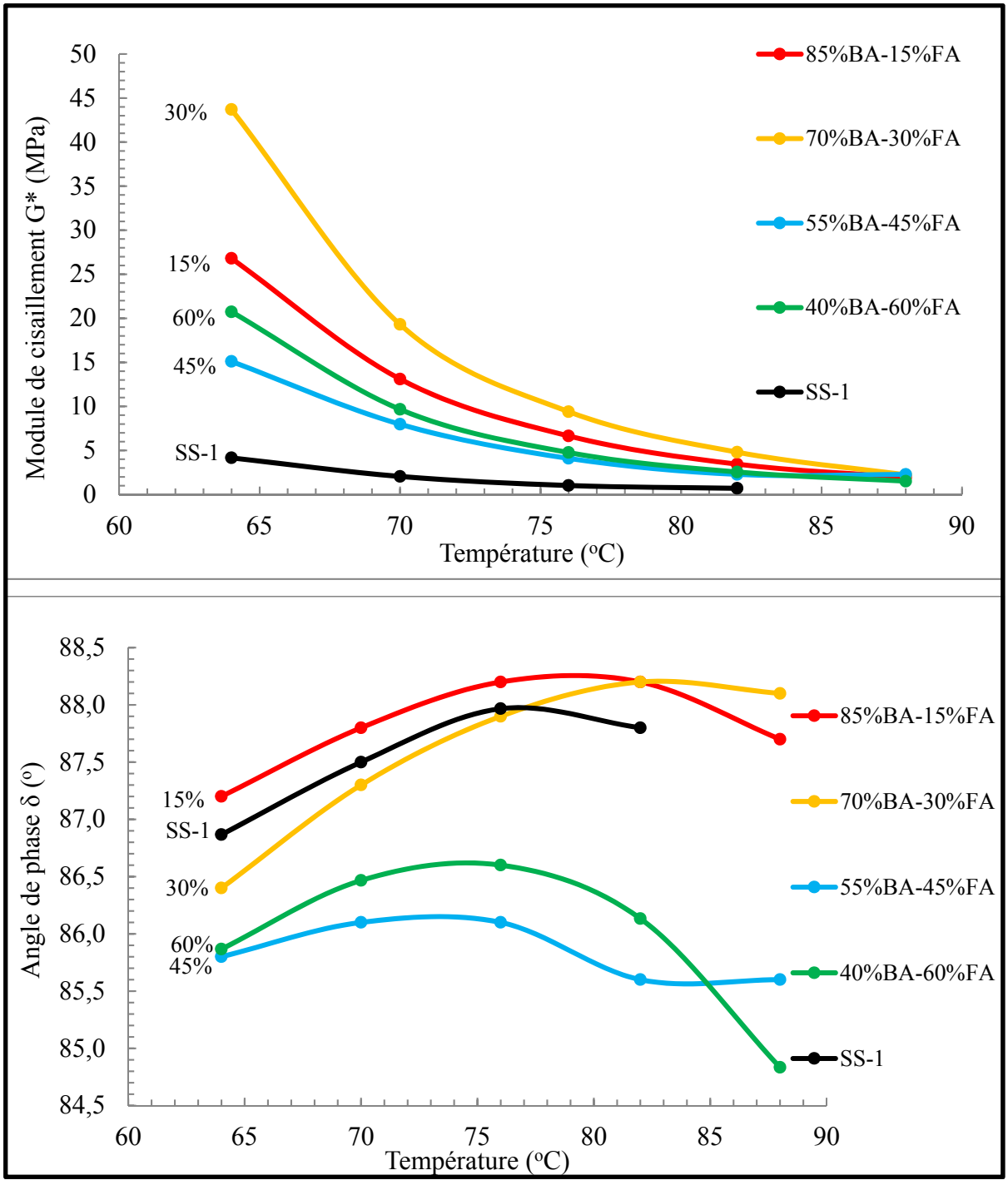


Figure 3.6 Résultats au DSR pour les éprouvettes avec la cendre volante (FA) avec la méthode de malaxage 2 à 10Hz. Module de cisaillement (en haut) et angle de phase (en bas)

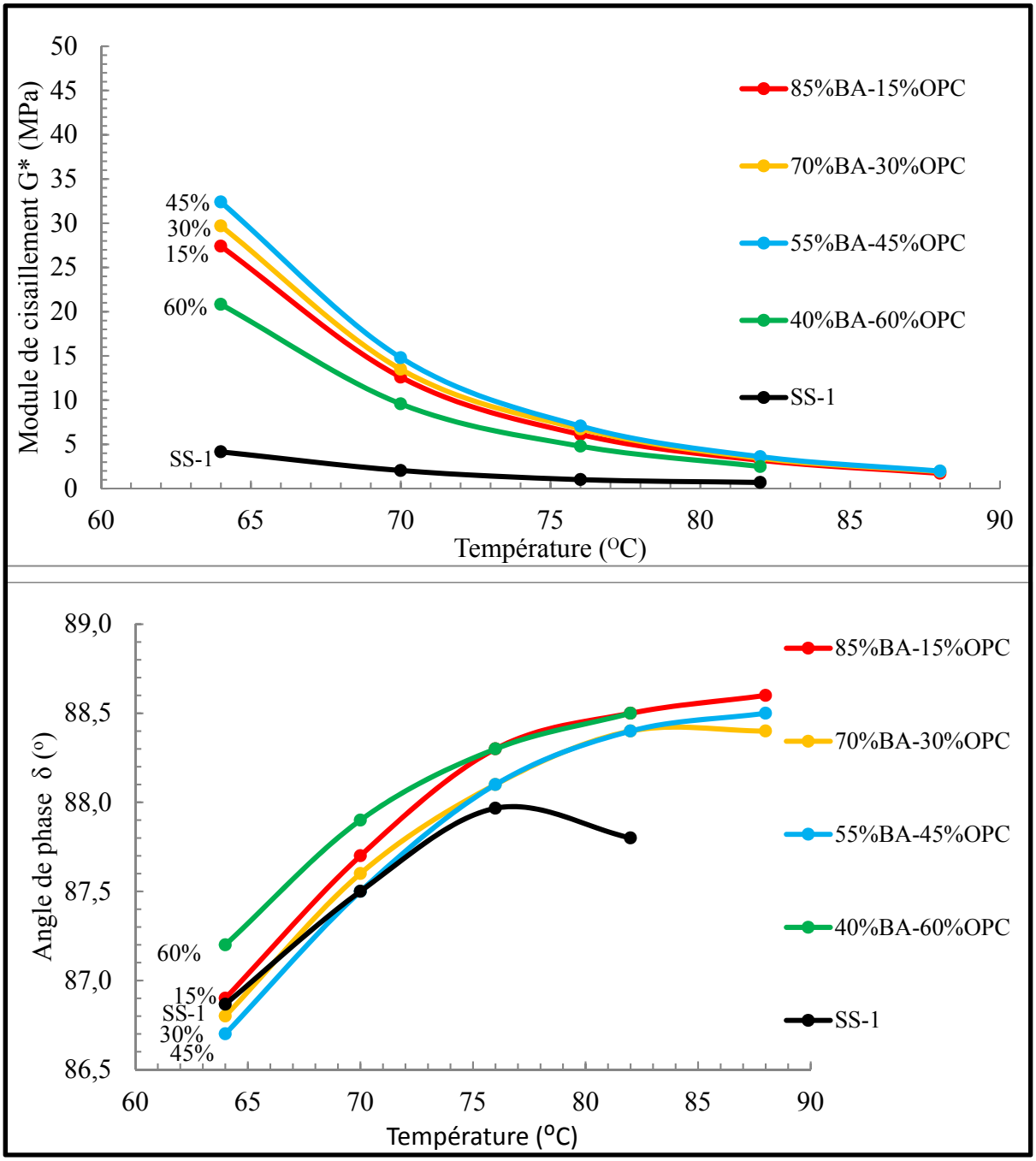


Figure 3.7 Résultats au DSR pour les éprouvettes avec du ciment ordinaire Portland (OPC) avec la méthode de malaxage 2 à 10Hz. Module de cisaillement (en haut) et angle de phase (en bas)

Pour les mastics formulés avec la méthode de malaxage 2, la rigidité est plus élevée que l'émulsion SS-1 mise à l'essai seul. Par contre, certains résultats ne reflètent pas

complètement la théorie. Pour les mélanges formulés avec FA, la rigidité du mastic augmente avec la proportion utilisée de filler actif jusqu'à 30% pour ensuite décliner avec l'ajout de filler actif. À 64°C. Le mastic 70%BA-30%FA a la meilleure résistance de 43.79 MPa et le mastic 55%BA-45%FA présente la pire résistance avec 15.10 MPa. Les mêmes observations se font pour les mélanges avec OPC. Tous les mélanges sont plus rigides que l'émulsion SS-1 seule pour toutes les températures. Le mastic 55%BA-45OPC est le plus rigide avec un module de 32.45 MPa à 64°C et le mastic 40%BA-60%OPC est le mastic avec le plus faible module de 9.59 MPa à 64°C.

3.2.2 Résultat DENT

Afin d'obtenir la résistance à la rupture ductile et l'énergie emmagasinée du matériau, l'essai DENT fut réalisé en utilisant la méthode de malaxage 2. La méthode de malaxage 2 fut choisie, car elle permettait davantage de différencier les mélanges avec les résultats obtenus au DSR. Pour chaque essai, trois éprouvettes ont suivi la même cure que les éprouvettes du DSR : 24 heures à température pièce (25°C), 24 heures dans une étuve ventilée à 60°C ainsi que quatre heures dans le moule DENT, toujours à l'étuve à 60°C. Les essais ont été effectués à 15°C et à une vitesse de sollicitation de 25mm/min. Des essais préliminaires ont démontré qu'une vitesse de charge de 50mm/min était trop élevée pour le mastic. En effet, les éprouvettes à 50mm/min présentaient une rupture immédiatement après le début de l'essai. Les Figures 3.8 et 3.9 présentent les relations force-déplacement pour les éprouvettes de 10mm contenant de la cendre volante (FA) et du ciment portland (OPC) respectivement. Les courbes ont été réalisées en effectuant une moyenne sur deux essais.

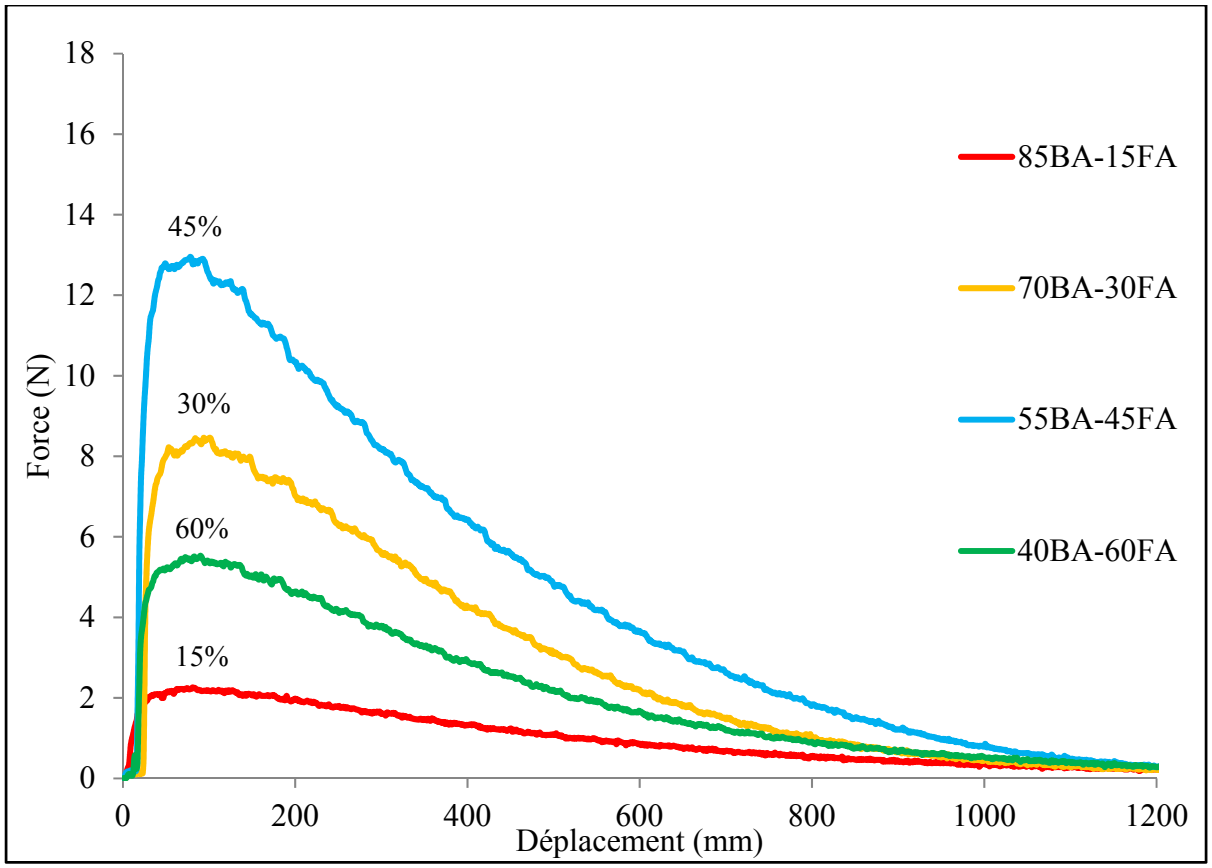


Figure 3.8 Résultats DENT pour les mélanges avec la cendre volante (FA) à une vitesse de sollicitation de 25 mm/min éprouvettes à rebords de 10mm à 15°C

Comme observé sur la Figure 3.8, l'ajout de filler actif influe les performances du mastic. Les résultats des autres dimensions sont présentés à l'Annexe VI. Pour chaque dimension d'éprouvette, le mastic 55%BA-15%FA montre la meilleure résistance en tension et le mastic 85%BA-15%FA montre les performances les plus faibles. La résistance en tension du mastic augmente avec la concentration en cendre volante jusqu'à la concentration de 45% pour ensuite diminuer avec la concentration en filler actif. Pour tous les essais, aucun mastic n'a présenté de rupture fragile reliée au comportement du filler actif.

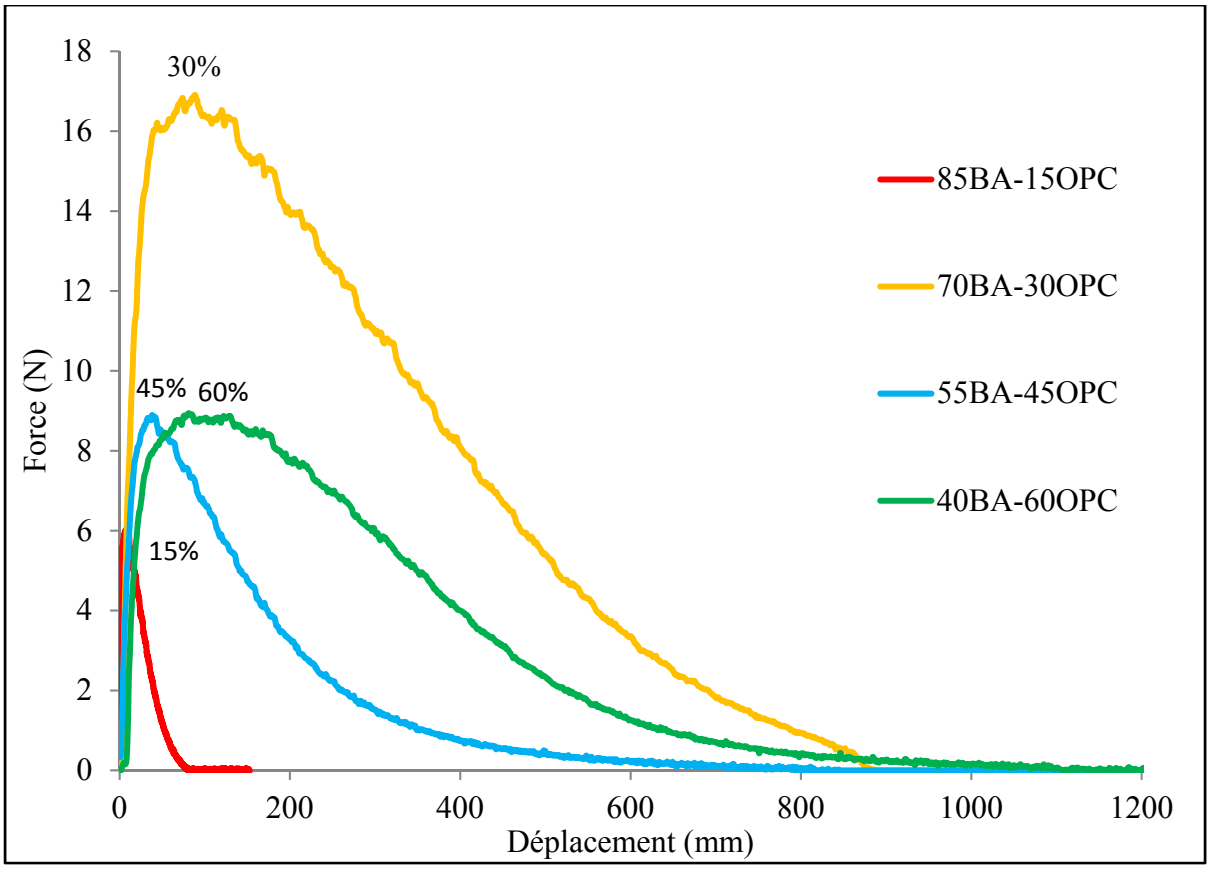


Figure 3.9 Résultats DENT pour les mélanges avec le ciment ordinaire portland (OPC) à une vitesse de sollicitation de 25 mm/min éprouvettes pour des rebords de 10mm à 15°C

Comme il peut être observé à la Figure 3.9, les résultats obtenus avec les mastics formulés avec OPC ont un comportement différent de ceux avec FA. La résistance maximale est obtenue à plus faible déplacement et la pente initiale est plus abrupte. Après avoir atteint le pic (maximum) de chargement, les mélanges ne suivent plus aucune tendance. Les pentes sont pratiquement toutes différentes. Les mastics 55%BA-45%OPC et 70%BA-30%OPC ont une pente décroissante semblable mais le mélange avec 45% d'OPC obtient son pic de chargement plus rapidement. Pour toutes les largeurs de rebords, le mélange 85%BA-15%OPC est celui avec la plus faible résistance. À cette teneur en filler, le matériau semble présenter une rupture fragile.

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1 Phase 1 - Évaluation de l'influence des fines sur la résistance à l'arrachement dans les traitements de surface

La première phase de l'étude a été d'évaluer l'aptitude à résister à l'arrachement des traitements de surface à l'aide de l'essai de balayage. Seize différentes formulations ont été réalisées dans cette phase. Dans l'ensemble des résultats, la théorie a été respectée. Le Tableau 4.1 rappelle l'arrachement moyen obtenu pour chaque formulation avec leur taux de cure au moment de l'essai, à 7 jours. Pour toutes les formulations à l'émulsion cationique à rupture rapide et haute viscosité CRS-2, l'ajout du filler augmente l'arrachement du granulat. La présence de filler mobilise une part importante de l'émulsion ce qui limite donc la disponibilité de bitume pour l'adhérence sur les granulats. En ajoutant une proportion de 0.7% de filler aux granulats, l'arrachement du couple Gabbro/CRS-2 augmente de 1.3% avec une cure de 25°C et de 1.2% pour une cure de 5°C. Le filler affecte l'enrobage des granulats et réduit l'adhésion mécanique en empêchant le bitume de recouvrir les granulats. Pour le couple granite/CRS-2, l'ajout de 0.7% de filler aux granulats augmente de 1.6% et 9.9% l'arrachement pour des températures de cure de 25°C et 5°C respectivement. La réaction entre le filler granite et l'émulsion de bitume CRS-2 semble affecter davantage l'adhésion. En effet, la forte teneur en silice du granite augmente possiblement la vitesse de rupture de l'émulsion de bitume dû à une plus grande différence de pH entre le filler et l'émulsion. Ainsi, l'interaction électrostatique est augmentée et l'adhésion est favorisée. Cette interaction peut être observée avec l'éprouvette GR.0,0%-C-21°C qui présente deux fois moins d'arrachement que GA.0,0%-C-21°C. De plus, le filler ayant une plus grande surface spécifique augmente la surface de contact et accélère la rupture. La rupture accélérée empêche probablement le bitume de pénétrer correctement dans les pores du granulat ainsi diminuant l'adhésion mécanique. L'addition des forces des différentes interactions d'adhésion reste cependant plus faible avec la présence de filler. De plus, le taux de cure des couples Granite/CRS-2 est plus élevé pour les deux conditions de cure lorsqu'il y a présence

de filler. Pour les éprouvettes placées en chambre environnementale, la position des éprouvettes dans la chambre a pu affecter la cure des spécimens. Les éprouvettes près des ventilateurs étaient plus exposées au vent ce qui accélère la cure.

Tableau 4.1 Résultats d'arrachement moyen et taux de cure des éprouvettes de traitement de surface

# Éprouvette	Arrachement moyen (en %)	Taux de cure moyen (en %)	# Éprouvette	Arrachement moyen (en %)	Taux de cure moyen (en %)
GA.0,0%-C-21°C	1.4	82	GA.0,0%-H-21°C	2.2	68
GA.0,7%-C-21°C	3.7	78	GA.0,7%-H-21°C	2.3	67
GA.0,0%-C-5°C	0.8	78	GA.0,0%-H-5°C	2.3	67
GA.0,7%-C-5°C	2.0	77	GA.0,7%-H-5°C	2.6	66
GR.0,0%-C-21°C	0.7	79	GR.0,0%-H-21°C	2.5	68
GR.0,7%.C-21°C	2.3	88	GR.0,7%.H-21°C	3.7	62
GR.0,0%-C-5°C	1.2	87	GR.0,0%-H-5°C	5.6	72
GR.0,7%.C-5°C	11.1	89	GR.0,7%.H-5°C	3.7	72

Pour les formulations réalisées avec l'émulsion de bitume à rupture moyenne, à haute flottabilité et à haute viscosité HFMS-2, le filler affecte moins l'arrachement des granulats. En observant les résultats du couple Gabbro/HFMS-2, l'ajout de 0.7% de filler aux granulats augmente l'arrachement de 0.1% et 0.3% lorsque l'échantillon est soumis à une cure de 21°C et 5°C respectivement. La rupture ralentie de l'émulsion HFMS-2 semble permettre une meilleure pénétration du bitume dans les granulats, et ce, même avec l'ajout de filler augmentant ainsi l'interaction mécanique. De plus, le pH de l'émulsion de 11.4 réagit moins avec les granulats à forte teneur en silice. L'interaction électrostatique est donc plus forte lorsque l'émulsion à haute flottabilité entre en contact avec le granulat gabbro qu'avec le granulat granite, d'où les résultats moins performants des formulations avec le couple Granite/HFMS-2. L'ajout de 0.7% de filler aux granulats augmente l'arrachement de 1.2% avec une cure de 21°C, mais la diminue de 1.9% lorsque l'échantillon est exposé à une cure de 5°C. Les résultats obtenus à 5°C pour le couple Granite/CRS-2 contredisent la théorie. Il semble que l'émulsion à haute flottabilité réagit davantage avec le filler granite lorsqu'il est exposé à une cure de 5°C. Des liaisons semblent se former entre le liant et le granulat

augmentant ainsi l'adhésion du mélange. Une étude plus approfondie des conditions de cures avec une plus forte teneur en filler pourrait y répondre.

4.2 Phase 2 - Développement d'une méthode de caractérisation des mastics bitumineux des enrobés à l'émulsion

Comme présenté à la Figure 3.4, il est possible d'observer une augmentation de la rigidité du mélange avec la teneur en cendres volantes. Le mélange 85BA-15FA a la même rigidité que l'émulsion seule. Ceci est peut-être dû aux proportions volumétriques du mélange. En effet, les densités des matériaux utilisés peuvent avoir un impact majeur sur les résultats de rigidité. Le mélange ne se retrouve pas encore dans la zone optimale de concentration de filler, et les particules n'interagissent pas ensemble. Un impact réel commence à s'observer lorsqu'une proportion massique de 30% de cendres volantes est utilisée. En dessous de cette proportion, le mastic se retrouve probablement dans la zone diluée. Par contre, les résultats de la Figure 3.5 ne suivent pas cette tendance. En effet, la rigidité diminue avec la proportion de ciment utilisée. Encore une fois, la distribution granulaire peut affecter les résultats. De plus, le mélange 40BA-60OPC a une rigidité plus faible que celle de l'émulsion seule. L'utilisation d'une teneur trop élevée en ciment pourrait donc avoir un impact négatif. La Figure 4.1 présente les moyennes des rapports de module de cisaillement entre le mastic et le résiduel de l'émulsion de bitume en fonction de la teneur en filler actif. Pour toutes les températures mises à l'essai pour l'émulsion (64°C, 70°C, 76°C et 82°C), la moyenne de rigidité de ces derniers est comparée avec la moyenne obtenue avec les mêmes températures pour chaque teneur en filler actif. Le ratio de rigidité d'un mastic est donc obtenu en divisant sa moyenne de rigidité à celle du résiduel de l'émulsion seule. Un mastic avec un ratio en dessous 1 indique donc une rigidité inférieure à celle de l'émulsion seule.

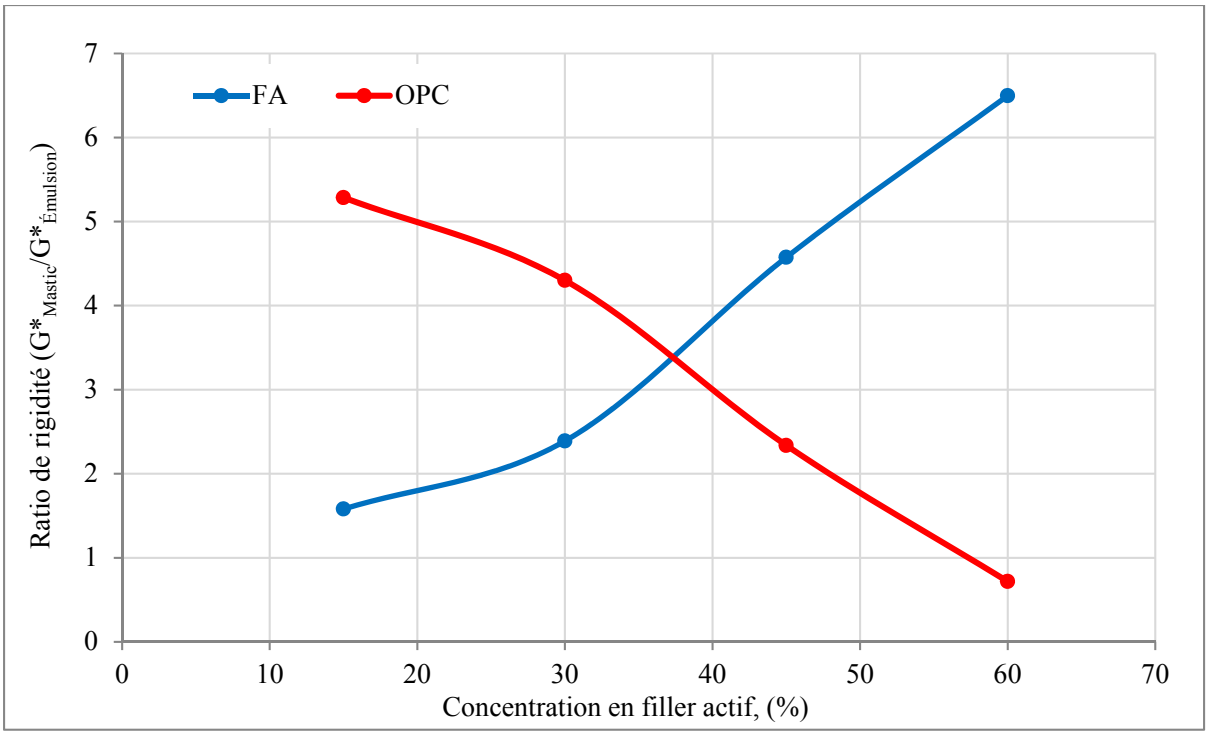


Figure 4.1 Ratios de rigidité (mastic/émulsion) avec la méthode de malaxage 1 à 10 Hz sur une moyenne avec les résultats obtenus aux températures 64°C, 70°C, 76°C et 82°C

Comme il est possible d'observer à la Figure 4.1, la rigidité de tous les mélanges ayant de la cendre volante augmente avec la concentration en filler actif et la tendance est inverse pour le mélange contenant du ciment Portland. Pour les deux types de fillers, la pente des courbes présentées est moins prononcée à faible teneur en filler actif et la pente augmente à partir d'un dosage de 30% de filler actif, pour les deux types de filler. Pour les deux courbes, aucune teneur en filler actif ne présente de plateau (optimum), mais il semble être au-dessus de 60% pour les mélanges avec FA et au-dessous de 15% pour les mélanges avec OPC. En outre, la rigidité des mélanges avec OPC décroît presque linéairement avec l'augmentation de la proportion d'OPC dans le mastic. De plus, les résultats d'angle de phase à la Figure 3.4 montrent que l'émulsion SS-1 a le comportement le plus visqueux suivi du mélange contenant la plus forte concentration en FA. Pour tous les mastics contenant la cendre volante, le matériau tend vers un comportement élastique avec l'augmentation de la teneur en filler inerte (BA) et de la température. Le mélange 85%BA-15FA est le mélange qui est le

plus affecté par l'augmentation de la température; l'angle de phase diminue de 10° pour une augmentation de température de 24°C. Les différences d'angle de phase entre les résultats obtenus pour les mélanges 40%BA-60%FA et 85%BA-15%FA sont de 6.6° et 14.9° pour des températures de 64°C et 88°C respectivement. Pour les mélanges avec OPC présentés à la Figure 3.5, les mélanges ne suivent pas du tout la même tendance que ceux formulés avec la cendre volante. Par contre, tous les mélanges suivent une même tendance entre eux : l'angle de phase augmente avec la température jusqu'à une certaine température et diminue par la suite. De plus, la concentration de ciment n'influe pas de manière significative l'angle de phase.

La deuxième méthode de malaxage consistait à mélanger l'émulsion de bitume avec le filler inerte en premier lieu pour ensuite ajouter graduellement le filler actif tout en mélangeant à l'aide de la tige de verre. Les Figures 3.6 et 3.7 présentent les résultats obtenus au DSR en utilisant la deuxième méthode de malaxage pour la cendre volante et le ciment Portland respectivement. Pour tous les mélanges, la rigidité des matériaux est plus élevée que le résiduel de l'émulsion mise à l'essai seul. La méthode de malaxage 2 laisse croire qu'elle offre de meilleures conditions de cure et l'ajout de filler actif augmente la rigidité comme attendu. De plus, un optimum est observé à la Figure 4.2 qui présente le ratio de rigidité de la méthode de malaxage 2. Les courbes de la Figure 4.2 ont été réalisées en suivant les indications de la Figure 4.1.

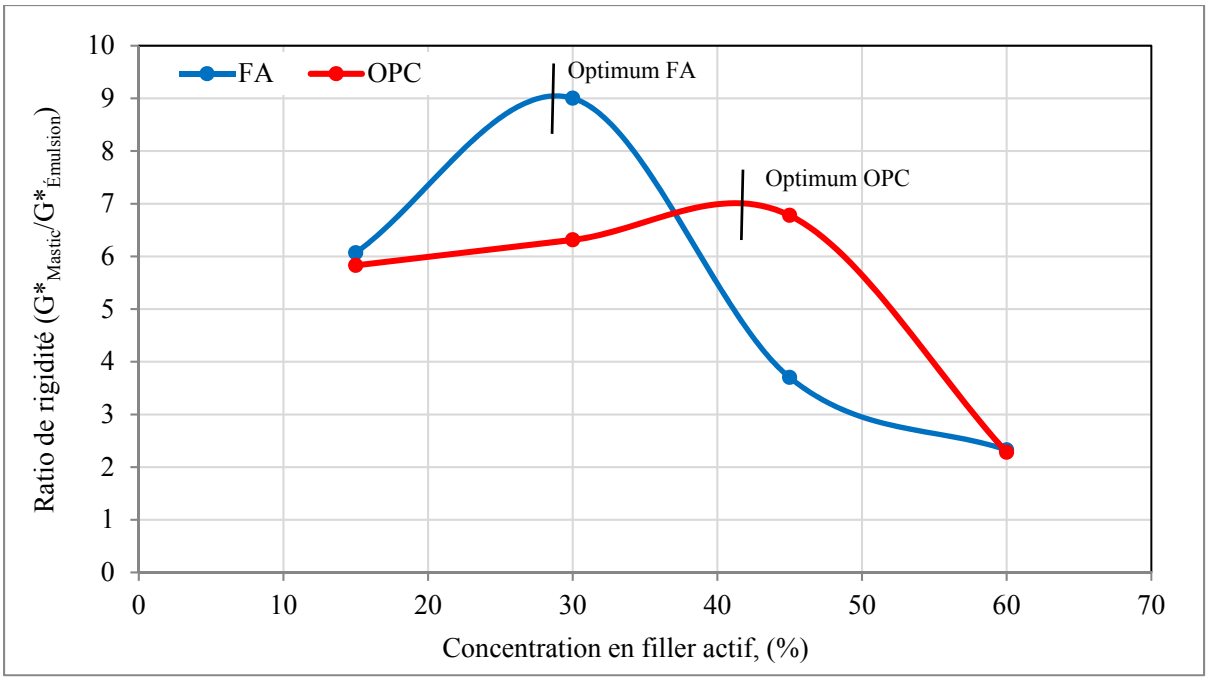


Figure 4.2 Ratios de rigidité (mastic/émulsion) avec la méthode de malaxage 2 à 10 Hz sur une moyenne avec les résultats obtenus aux températures 64°C, 70°C, 76°C et 82°C

Pour cette méthode de malaxage, les résultats montrent que la plus haute rigidité se situe à une concentration de 30% pour les mélanges contenant de la cendre volante et de 45% pour les mélanges au ciment Portland. Les mélanges au ciment Portland demeurent avec un ratio de rigidité au-dessus de six pour les concentrations de 15 à 40% tout en ayant une faible augmentation. Au-delà de 40%, la rigidité du mastic OPC descend avec la concentration du ciment. Pour les mastics FA, la rigidité augmente d'abord avec la concentration en cendre volante jusqu'à une teneur de 30% et diminue ensuite avec la concentration. Pour les deux courbes, la pente du déclin après l'optimum est semblable. Dans l'ensemble, la méthode de malaxage 2 avantage la rigidité du mastic bitumineux à l'émulsion.

Afin d'avoir une meilleure idée de la composition des mastics à l'étude, les proportions massiques et volumiques ont été réalisées. Pour déterminer l'hydratation de filler actif, une absorption en eau de 0.50% (% massique) a été estimée. Pour faciliter les calculs, la teneur en air des tous les mastics a été estimée à 0,0%. De plus, d'autres hypothèses ont été posées

pour les calculs et sont présentées au Tableau 4.2. Les proportions massiques, l'absorption en eau et le rapport eau/liant des mastics à l'étude sont présentés au Tableau 4.3.

Tableau 4.2 hypothèses pour l'analyse de la composition des mastics

Élément inconnu	Hypothèse
Densité du filler inerte (basalte)	3.00
Absorption du filler inerte (basalte), en %	0.50
Fraction bitume de l'émulsion de bitume, en %	50.0
Densité de l'émulsion de bitume	1.01
Densité de la phase aqueuse de l'émulsion	1.01
Densité du résiduel de l'émulsion de bitume	1.01
Teneur en air du mastic, en %	0.0

Tableau 4.3 Proportion massique des mastics bitumineux à l'étude

Mélange	Proportion massique (%)				Absorption en eau (%)	Rapport E/L***
	Émulsion de bitume*		Filler actif	Filler inerte		
	Partie bitume	Partie aqueuse**				
85%BA-15%FA	30	30	6	34	1.79	4.70
70%BA-30%FA	30	30	12	28	1.47	2.38
55%BA-45%FA	30	30	18	22	1.16	1.60
40%BA-60%FA	30	30	24	16	0.84	1.22
85%BA-15%OPC	30	30	6	34	1.79	4.70
70%BA-30%OPC	30	30	12	28	1.47	2.38
55%BA-45%OPC	30	30	18	22	1.16	1.60
40%BA-60%OPC	30	30	24	16	0.84	1.21

* Pour tous les mélanges, l'émulsion de bitume compose 60% massique des mastics;
** La partie aqueuse est composée d'eau, d'acides et d'émulsifiants;
*** Rapport entre l'eau après absorption du filler inerte et la teneur en filler actif. Indicateur d'hydratation du liant (ciment ou cendre volante).

Afin de pouvoir transformer les proportions massiques en volumiques, les calculs ont été réalisés pour une quantité de 100g de mastic. Le volume obtenu de chaque composant est ensuite divisé par le volume total du mastic pour obtenir leurs fractions volumiques. Le tableau 4.4 présente les proportions volumiques des mastics à l'étude de la phase 2.

Tableau 4.4 Proportions volumiques des mastics à l'étude de la phase 2

Mélange	Proportion volumique (%)			
	Émulsion de bitume*		Filler actif	Filler inerte
	Partie bitume	Partie aqueuse**		
85%BA-15%FA	40.4	40.4	3.8	15.4
70%BA-30%FA	40.4	40.0	7.5	12.1
55%BA-45%FA	39.5	39.5	11.1	9.9
40%BA-60%FA	39.1	39.1	14.7	7.1
85%BA-15%OPC	40.9	40.9	2.6	15.6
70%BA-30%OPC	40.9	40.9	5.3	12.9
55%BA-45%OPC	41.0	41.0	7.9	10.1
40%BA-60%OPC	41.0	41.0	10.5	7.5

* Pour tous les mélanges, l'émulsion de bitume compose 60% massique des mastics;
** La partie aqueuse est composée d'eau, d'acides et d'émulsifiants.

Les proportions volumiques montrent que l'émulsion de bitume prend en réalité près de 80% du volume total des éprouvettes. En effet, la proportion utilisée de filler actif n'est pas égale entre la cendre volante et le ciment dû à leur différence de densité. Peut-être que cette différence a pu avoir une influence sur les résultats, et ce pour les deux méthodes de malaxage. Une section dans les recommandations abordera l'approche volumique des éprouvettes des futures recherches.

CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce document avaient pour objectif de procéder à l'étude des particules fines dans les mélanges bitumineux à base d'émulsion. Pour y arriver, une première phase a été réalisée visant à évaluer l'impact des fines à l'arrachement des granulats pour les matériaux de traitement de surface. Deux sources granulaires ont d'abord été caractérisées et deux émulsions de bitume ont été utilisées pour vérifier leur affinité avec les différents granulats. Ensuite, 16 formulations ont été mises à l'essai de balayage pour caractériser l'aptitude à l'arrachement des matériaux de traitement de surface. La deuxième phase a été axée sur le développement d'une méthode de caractérisation des mastics bitumineux à l'émulsion. La méthode de caractérisation visait à déterminer les propriétés rhéologiques du mastic bitumineux à différentes températures et de définir leur ductilité. Pour cette phase, 8 formulations ont été testées aux essais DSR et DENT. La phase 1 fut réalisée à l'École de Technologie à Montréal et la phase 2 a eu lieu à *l'Indian Institute of Technologie of Bombay*, à Mumbai. Chaque partie du travail a respecté les critères de la province et du pays où la recherche avait lieu respectivement.

Les travaux ont permis de conclure que la norme établie sur les traitements de surface par le MTQ devrait ajouter une section réservée aux conditions exposées par le traitement de surface (type et volume de trafic, caractéristiques de substrat et conditions météorologiques) modifiant les taux de pose des granulats de l'émulsion. En laboratoire, le TS3 a montré d'excellentes performances, et ce même pour le couple du granulat granite et de l'émulsion de bitume HFMS-2. Les critères de la norme concernant les propriétés intrinsèques et extrinsèques des granulats semblent offrir au traitement de surface une forte résistance à l'arrachement. En respectant la granulométrie, tous les granulats ont un enrobage suffisant pour résister à l'arrachement sans enfoncer complètement dans l'émulsion de bitume. Mis à part une exception, l'arrachement augmente avec l'ajout de filler. Par contre, il faudrait avoir une teneur plus élevée que la teneur maximale autorisée par le MTQ pour avoir un impact majeur. De plus, un essai visant à évaluer l'arrachement du couple granulat-émulsion aurait avantage à être ajouté à la norme pour y inclure une propriété mécanique au matériau.

La méthode de caractérisation des mastics bitumineux à l'émulsion n'a cependant pas donné des conclusions convaincantes. Dépendamment de la méthode de malaxage sélectionnée, les résultats n'ont pas du tout la même tendance. Pour avoir une certaine linéarité, il est important de suivre les étapes de fabrication. De plus, les résultats obtenus avec le filler actif OPC ont donné l'inverse des ceux anticipés : la résistance du mastic décroît avec l'augmentation de la teneur en OPC. Afin d'avoir la même hydratation pour tous les mélanges, l'eau aurait pu être ajoutée aux mélanges. Aucune conclusion ne peut être tirée de l'essai DENT. Il est à noter que le point zéro de l'appareil DENT était décalé de quelques millimètres et que ce décalage peut avoir biaisé les résultats.

En conclusion, ce projet permet de cibler les points importants des futures recherches traitant les matériaux à l'émulsion de bitume. Afin de mieux connaître le comportement des matériaux bitumineux à l'émulsion, L'ÉTS doit réaliser un travail sur l'équipement de fabrication d'émulsion Emulbitume pour être apte à fabriquer leurs propres mélanges. Un travail pourra ensuite être porté concernant l'influence des composantes de l'émulsion de bitume sur les différents types de mélanges bitumineux. En ce qui à trait au traitement de surface, des cycles de gels-dégels pourraient y être ajoutés pour adapter davantage les éprouvettes aux climats du Québec. La création d'un essai visant à évaluer l'encastrement des granulats dans la couche inférieure serait aussi intéressante à développer. Par exemple, cet essai pourrait être effectué sur un *chip seal* posé sur une plaque d'enrobé bitumineux. La texture du traitement de surface serait évaluée avant et après le passage répété d'une charge en forme de roue. Finalement, il serait intéressant de mesurer les proportions volumiques lors de la conception des éprouvettes afin de prendre en considération la proportion des vides des mastics bitumineux.

ANNEXE I

PROCÉDURE DE FABRICATION D'ÉMULSION DE BITUME AVEC L'ÉQUIPEMENT DU LCMB (EMULBITUME)

Cette section est destinée au fonctionnement de la machine à émulsion du LCMB. Elle présente les équipements nécessaires, la fabrication de la phase aqueuse et de l'émulsion de bitume.

Équipements requis à la fabrication des émulsions de bitume (Voir photo)

- De l'eau du robinet ou dé-ionisé;
- Un agitateur mécanique;
- Un sceau en plastique de 4L;
- Une balance (précision 0.00g);
- Une ventilation adéquate;
- Masque protecteur (visière);
- Gants;
- Vêtements longs;
- Chaussures fermées;
- Une étuve;
- Un thermomètre;
- L'émulsifiant préétablie;
- L'acide/base en fonction de l'émulsifiant;
- Un pH mètre;
- Feuille de formule d'émulsion (voir annexe II).

Préparation du savon (la phase aqueuse)

La procédure de préparation du savon dépend principalement de l'émulsifiant utilisé. Il est important de lire la fiche technique de l'émulsifiant et de vérifier sa température de réaction. La procédure ci-dessous est pour la formulation d'une émulsion classique. Il est important de porter les équipements de sécurité requis lors de toutes les manipulations :

1. Dans le récipient en plastique, peser l'émulsifiant. Noter la masse;
2. Selon le type d'émulsifiant utilisé, mettre la quantité requise d'eau à la bonne température. L'eau chaude démarre la réaction de l'émulsifiant. Noter la masse;
3. À l'aide de l'agitateur, mélanger la solution pendant 30 secondes;
4. Ajouter de l'eau à température pièce de façon à avoir une masse cumulative de 2990g, noter la masse.
5. Mélanger la solution pendant 30 secondes;
6. À l'aide de pH-mètre, prendre le pH de la solution et le noter;
7. Selon le pH visé, ajouter 5g d'acide ou de base[(1)].
8. Noter la masse et mélanger pendant 15 secondes Prendre la mesure du pH,
9. Ajouter une petite quantité d'acide/base de façon à obtenir le pH visé et répéter étape 8 à chaque ajout. Si la valeur visée du pH est dépassée, ajouter de l'eau. (des exemples sont présentés à l'ANNEXE III).
10. Lorsque le savon est prêt, le transférer soit dans le bac à savon ou dans un récipient en plastique. Il n'est pas recommandé de conserver le savon plus de 1 semaine.

[(1)] D'autres additifs, tels que des solvants ou des latex peuvent être ajoutés au savon, mais il est important de vérifier le pH entre chaque ajout.

Procédure de fabrication d'émulsion de bitume sans chambre de pression

Les 22 étapes suivantes montrent la procédure d'ouverture et les manipulations à effectuer afin de fabriquer l'émulsion de bitume sans l'usage de la chambre de pression. La chambre de pression permet d'émulsionner des bitumes plus durs en augmentant la température d'ébullition.

1. Ouvrir le courant;
2. Vérifier les arrêts d'urgence (trois boutons) du contrôle et de la mini-usine (Figure A I-1);
3. Appuyer sur démarrer (bouton bleu) sur le panneau de contrôle;
4. Après le téléchargement, appuyer sur le bouton ***Next*** **R9**;
5. Attendre le téléchargement de panneau de contrôle (Figure A I-2);
6. Démarrer le chauffage (la touche **R2**);
7. À l'aide des flèches et des chiffres, sélectionner les températures sur le panneau de contrôle et indiquer les bonnes températures dans les deux bennes (bitume et savon), le cordon de la ligne du bitume et la vitesse de l'atomix (Figure A I-3);
8. Appuyer sur la touche **chauffage atomix**;
9. Vérifier le sens des valves de vidange des 2 bacs, s'assurer qu'elles sont fermées (Figure A I-4);
10. Préparer un récipient pour récolter l'émulsion;
11. Attendre la stabilisation de la température;
12. Mettre des sceaux aux endroits susceptibles d'avoir une fuite (Figure A I-5);
13. Vérifier le sens des vannes E3 et B3 pour avoir un chemin continu (voir les flèches sur le panneau de contrôle);
14. Sélectionner le débit du savon (0.00 à 1.00);
15. Incorporer le bitume et le savon dans leurs bacs respectifs (Figure A I-6);
16. Mettre le bras de ventilation au-dessus de la benne à bitume (Figure A I-7);
17. Démarrer la pompe à bitume et la pompe à savon (touches **pompe savon** et **pompe bitume**);
18. Vérifier la vanne de sortie du moulin colloïdale et s'assurer qu'elle ne va pas dans la chambre de pression;

19. Lorsque toutes les températures et les débits sont stables, changer le sens de la **vanne E3** (savon);
20. Lorsque le savon sort de l'émulbitume, démarrer le moulin colloïdal, touche **marche atomix**;
21. Lorsque l'atomix atteint sa vitesse, changer de direction **vanne B3** (bitume);
22. En récupérant le résidu, attendre 5 secondes et changer récipient pour récupérer l'émulsion de bitume.
23. Changer la **vanne B3** (Bitume) et attendre quelques secondes pour nettoyer la machine le mieux possible;
24. Arrêter le moulin et laisser couler le reste de la phase aqueuse;
25. Vider toutes les bennes et arrêter les pompes.

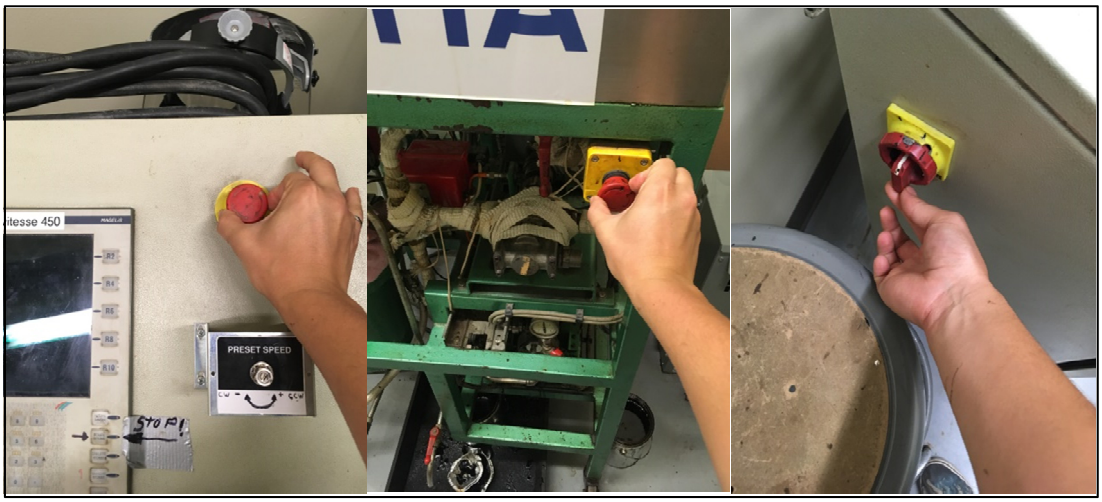


Figure A I-1 Vérification des boutons d'urgence

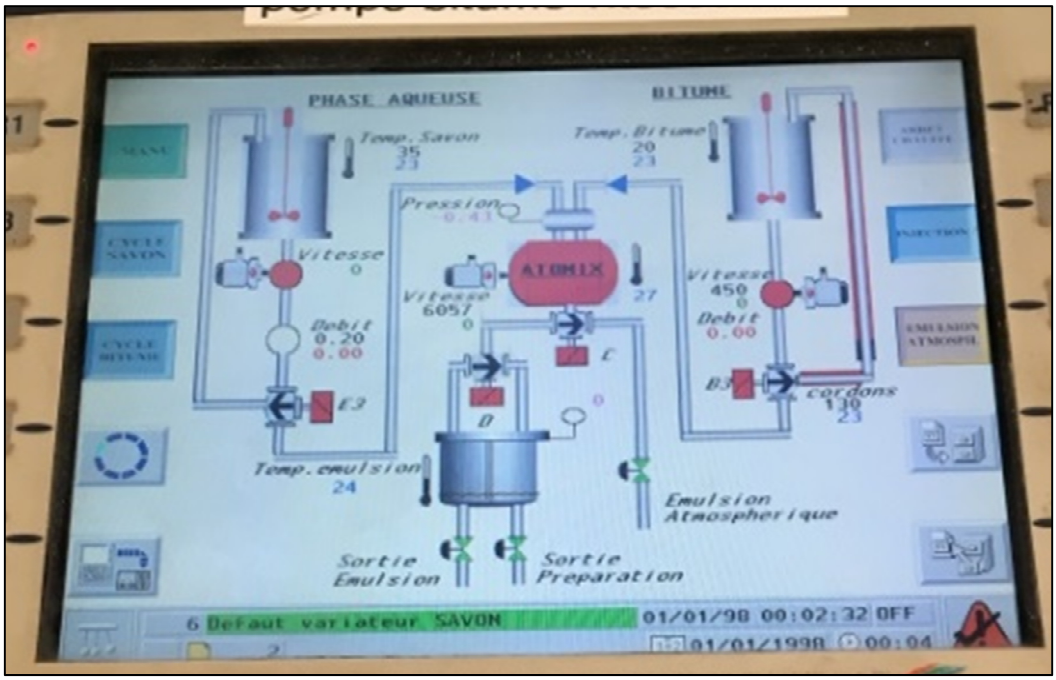


Figure A I-2 Panneau de contrôle après téléchargement

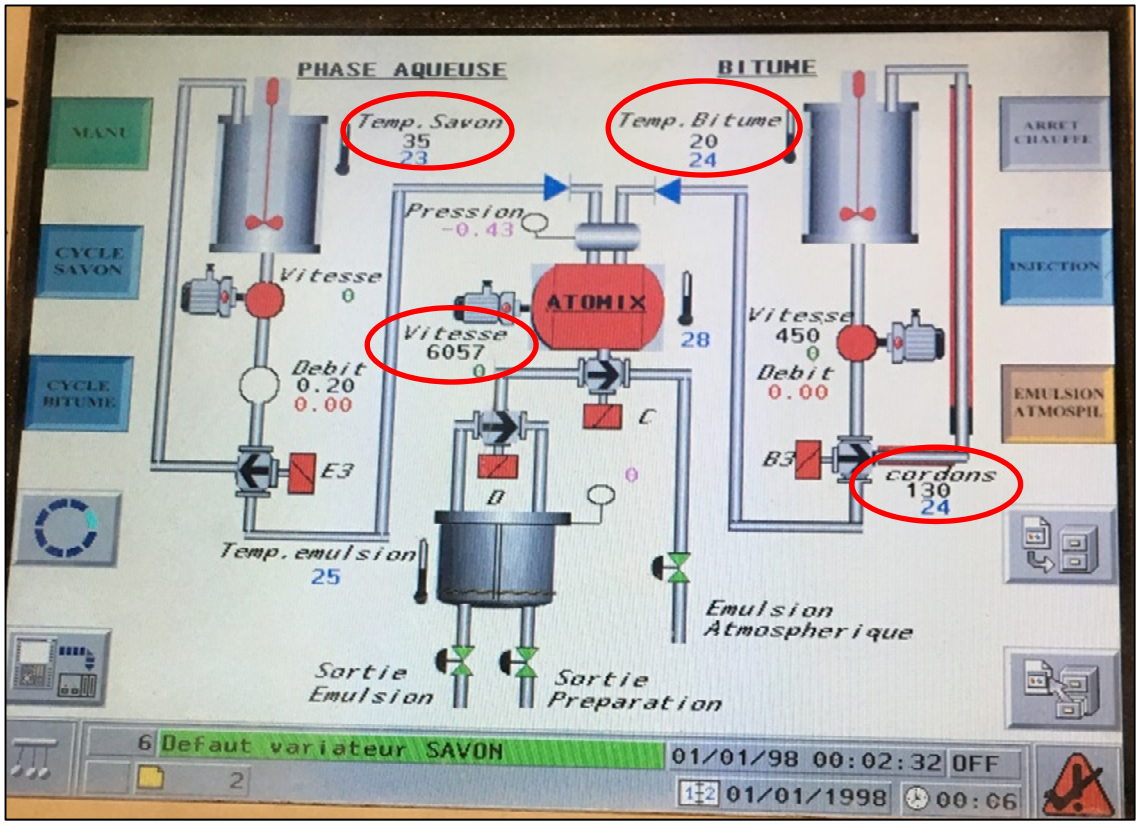


Figure A I-3 Détermination de la température et de la vitesse, en °C et RPM. 1) Température de la benne à savon. 2) Température du cordon du bitume (le tuyau). 3) Température de la benne à bitume. 4) Vitesse de l'atomix.

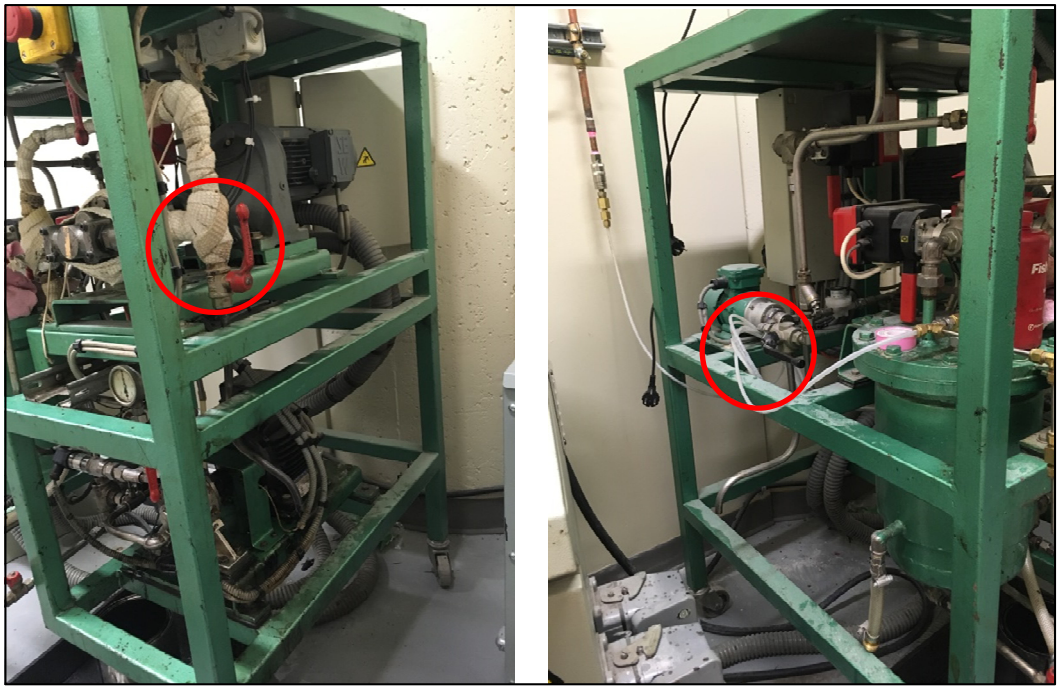


Figure A I-4 Position des deux valves de vidage

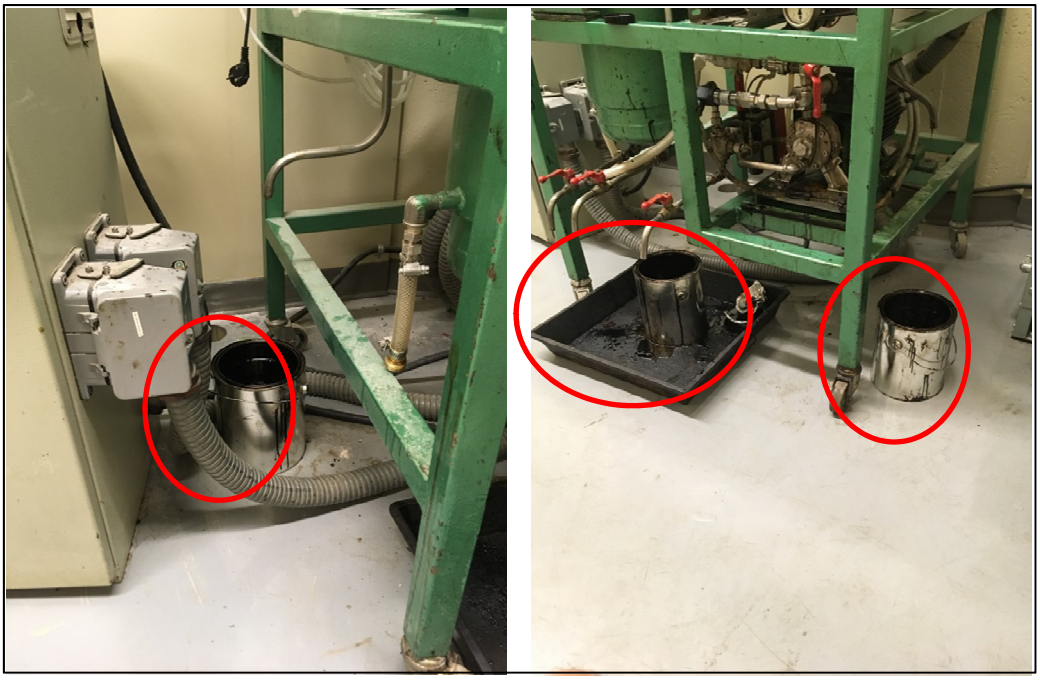


Figure A I-5 Emplacements des risques de fuites



Figure A I-6 Benne à savon (gauche) et benne à bitume (droite)



Figure A I-7 Ventilation de
la benne à bitume

ANNEXE II

FEUILLE DE FORMULATION POUR LES ÉMULSIONS DE BITUME AVEC ÉMULBITUME

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Equipements	
Emulsifiant :		Date production savon	Malaxeur	☐
Acide/Base :		Type d'émulsion	Thermomètre	☐
Eau :		Numéro d'échantillon	Agitateur mecanique	☐
Polymère :		Paramètres		
Latex :		Proportion massique bitume visé (%)	Sceau plastique	☐
Autres ajouts :		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :	pH mètre	☐
		Ph visé: / Dosage emulsifiant (%):		

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre	Note
Masse de l'émusifiant (g) :				
Masse de l'eau chaude (g)			Temp. (°C)	Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)			pH :	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)			pH :	Mélanger 15 sec
			pH :	Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :	
			pH :	
			pH :	
Masse total du savon (g) :				

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :		Grade PG de bitume	
Température benne savon (°C) :		Type de fluxant	
Température refroidissement (°C) :		Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	
Pression (kPa) :		Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	
Débit savon (0 à 1) :		Température théorique de l'émulsion à la sorti	
Vitesse pompe bitume (RPM) :			
Vitesse de l'aomix (RPM)			

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	
Test au ciment, %	ASTM D6935	
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	

Note:	Essais réalisé par :	
	Date production :	

Figure-A II-1 Feuille type de fabrication d'émulsion de bitume

ANNEXE III

FORMULATION D'ÉMULSIONS AVEC L'ÉQUIPEMENT DU LCMB ÉMULBITUME

Cette section présente les feuilles de formulation utilisées pour la fabrication des émulsions avec l'équipement Émulbitume. Au total, 2 types d'émulsions ont été fabriquées. La première est une émulsion cationique à rupture lente et à faible viscosité (CSS-1) et la deuxième est une émulsion cationique à rupture rapide et à haute viscosité (CRS-2). Les deux types d'émulsions ont été sélectionnées principalement à cause de la disponibilité des émulsifiants au laboratoire du LCMB. De plus, l'objectif de fabriquer les émulsions de bitume était de permettre la possibilité de modifier et de comparer les émulsions afin de mieux comprendre l'impact des différents composants. Au total, 25 émulsions ont été réalisées en modifiant les paramètres tels que les débits, les températures, les composants et la vitesse du moulin colloïdal.

Calibration

Les débits de la phase aqueuse et du bitume ont été étalonnés en pesant la masse écoulée après 1 minute à différents débits paramétrés. Le Tableau-A III-1 présente l'étalonnage de la phase aqueuse avec de l'eau sans l'utilisation de la chambre de pression. Tous les essais ont été réalisés à une température de 40°C.

Tableau-A III-1 Calibration de la pompe de la phase aqueuse

Indice de la pompe (Émulbitume)	Masse recueillie (g/min)	Débit massique (Kg/h)	Moyenne (Kg/h)
1.00	3053.6	183.2	182.5
	3032.2	181.9	
	3037.0	182.2	
0.75	2422.0	145.3	143.9
	2385.0	143.1	
	2388.4	143.3	
0.50	1763.3	105.8	104.9
	1720.1	103.2	
	1762.8	105.8	
0.25	1110.0	66.6	65.5
	1086.8	65.2	
	1080.6	64.8	
0.15	780.8	46.8	49.5
	762.2	45.7	
	731.4	43.9	
0.10	626.4	37.6	38.4
	631.6	37.9	
	660.4	39.6	

La pompe à bitume ne peut pas être modifiée à partir du programme d'Émulbitume. Des modifications ont donc été réalisées sur l'appareil. Un appareil permettant de modifier le voltage a été ajouté. La pompe à bitume fonctionne à pleine vitesse lorsque le voltage est au maximum et à vitesse minimum lorsque le voltage est au minimum. Pour déterminer la température de calibration du bitume, un essai de viscosité *brookfield* a été effectué pour connaître la température à laquelle le bitume a une viscosité de 200 mPa*s. Un bitume fluidifié de type *cutback* a été utilisé pour la calibration de la pompe à savon. Une seule vitesse a été réalisée, car à plein régime la pompe a bitume ne fournit pas assez pour la force de la pompe à savon. Le Tableau-A III-2 présente les résultats obtenus de la calibration de la pompe à savon. Les essais ont été effectués à une température pour avoir 200 mPa*s (60 °C).

Tableau-A III-2 Calibration de la pompe à bitume

Masse recueillie (g/min)	Débit massique (Kg/h)	Moyenne (Kg/h)
741,5	44,5	44,5
785,6	47,1	
796,3	47,8	
802,2	48,1	
811,9	48,7	
828,3	49,7	
819,3	49,2	
822,1	49,3	

La Figure-A III-1 présente l'évolution de la vitesse des débits en fonction de l'indice indiqué sur l'Émulbitume.

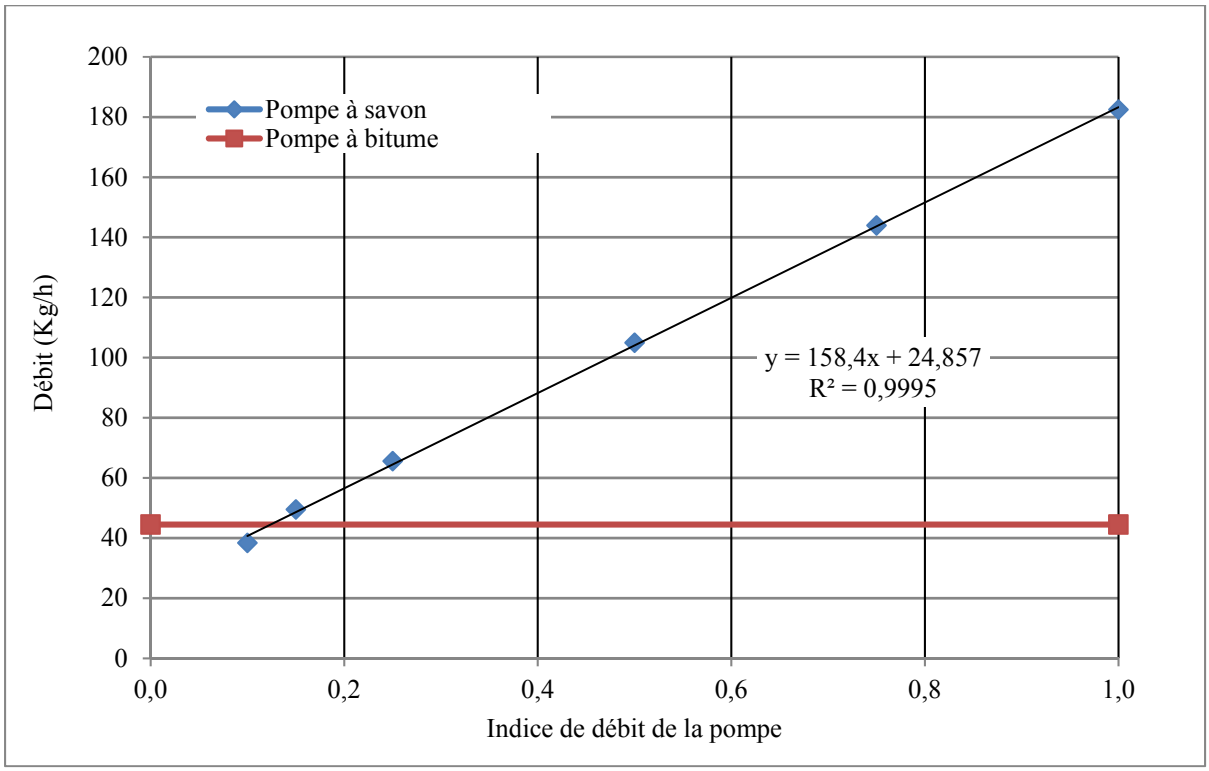


Figure-A III-1 Débit des pompes de l'Émulbitume en fonction de leur indice

Afin d'obtenir une émulsion avec 50% de bitume et 50% de savon, il faut mettre l'indice du savon à 0.12. À partir d'un indice de 0.01, la pompe à savon fournit théoriquement 26.44 Kg/h et l'émulsion sera à 62% massique de bitume. Par contre, en dessous de 0.1, le capteur pour la pompe à savon semble perde ses capacités et la pompe ne fournit plus de savon. Le capteur de la pompe à savon est donc à modifier.

Avant de commencer la fabrication des émulsions, d'autres modifications ont été réalisées tel que le remplacement des gaines isolantes et des fils chauffants. Les températures des sondes ont été vérifiées à l'aide de sondes extérieures. La *Drive* de l'atomix a été modifiée selon les paramètres fournis sur le moteur de l'atobmix. Un décalage fut remarqué entre les valeurs indiquées sur l'Émulbitume et la *Drive.* Le Tableau-A III-3 présente les valeurs réelles de l'atomix. La vitesse maximum de l'atomix a été bloquée à 8500 RPM pour éviter le dépassement des limites du moteur.

Tableau-A III-3 Conversion de vitesse panneau à vitesse réelle

Vitesse entrée sur l'atomix	Vitesse réelle		Vitesse entrée sur l'atomix	Vitesse réelle
250	260		5000	5977
500	561		5250	6278
750	862		5500	6579
1000	1163		5750	6880
1250	1464		6000	7181
1500	1765		6250	7482
1750	2066		6500	7783
2000	2367		6750	8084
2250	2667		7000	8385
2500	2968		7250	8500
2750	3269		7500	8500
3000	3570		7750	8500
3250	3871		8000	8500
3500	4172		8250	8500
3750	4473		8500	8500
4000	4774		8750	8500
4250	5075		9000	8500
4500	5376		9250	8500
4750	5676		9449	8500

Formulation

La prochaine section présente les feuilles ayant servi à la formulation. Pour chaque émulsion, des hypothèses ont été faites pour déterminer la cause d'échec.

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	09-08-2017		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion	CSS		Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-1-001		Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☑
Polymère :	N/A		Proportion massique bitume visé (%)		65		
Latex :	N/A		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :		23	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	N/A	Ph visé: 2	Dosage emulsifiant (%):		0,80	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	32,00	32,00			
Masse de l'eau chaude (g)	500,00	528,45	Temp. (°C)		Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3458,00	3433,55	pH :	10,6	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,00	pH :	2,24	Mélanger 15 sec
			pH :		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4000,00			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	145	Grade PG de bitume	58-28
Température benne savon (°C) :	40	Type de fluxant	N/A
Température cordon chauffant (°C) :	145	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	N/A
Température atomix (°C) :	?	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	145
Débit savon (0 à 1) :	0,2	Température théorique de l'émulsion à la sorti	90,56
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453		
Vitesse de l'aomix (RPM)	8500		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	**80,4**
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	16,2
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: Débit savon trop haut. Température sortie différente	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	09-08-2017

Figure-A III-2 Formulation 1 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**
Acide/Base :	**HCl**
Eau :	**Déminéralisée**
Polymère :	**N/A**
Latex :	**N/A**
Autres ajouts :	**N/A**

Date production savon	09-08-2017
Type d'émulsion	CSS
Numéro d'échantillon	2017-1-002

Paramètres			
Proportion massique bitume visé (%)			65
Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :			23
Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	0,80

Équipements	
Malaxeur	☑
Thermomètre	☑
Agitateur mecanique	☑
Sceau plastique	☑
pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	32,00	32			
Masse de l'eau chaude (g)	500,00	528,45	Temp. (°C)		Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3458,00	3433,55	pH :	10,6	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,00	pH :	2,24	Mélanger 15 sec
			pH :		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4000,00			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	145	Gradc PG dc bitumc	58-28
Tcmpératurc bcnnc savon (°C) :	40	Type de fluxant	N/A
Température cordon chauffant (°C) :	145	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	N/A
Température atomix (°C) :	?	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	145
Débit savon (0 à 1) :	0,3	Température théorique de l'émulsion à la sorti	90,556
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453		
Vitesse de l'aomix (RPM)	8500		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	24,3
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	0
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: Teneur en eau plus faible avec débit plus élevé.... Problème de débitmètre ?	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	09-08-2017

Figure-A III-3 Formulation 2 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	09-08-2017		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion	CSS		Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-1-003		Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☑
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)		65		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :		23	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	**N/A**		Ph visé: 2	Dosage emulsifiant (%):	0,80	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	32,00	32			
Masse de l'eau chaude (g)	500,00	528,45	Temp. (°C)		Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3458,00	3433,55	pH :	10,6	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,00	pH :	2,24	Mélanger 15 sec
			pH :		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4000,00			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	145	Grade PG de bitume	58-28
Température benne savon (°C) :	40	Type de fluxant	N/A
Température cordon chauffant (°C) :	145	Proportion de fluxant (%MASSIQUE bitume)	N/A
Température atomix (°C) :	?	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	145
Débit savon (0 à 1) :	0,4	Température théorique de l'émulsion à la sorti	90,556
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453		
Vitesse de l'aomix (RPM)	8500		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	20,1
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	0
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note:	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	09-08-2017

Figure-A III-4 Formulation 3 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume												
Préparation du Savon												
Ingrédients (Type)			Date production savon		16-08-2017			Équipements				
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion		CSS			Malaxeur	☐			
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon		2017-1-004			Thermomètre	☐			
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres					Agitateur mecanique	☐			
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)				65					
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :					Sceau plastique	☐			
Autres ajouts :	**N/A**		Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):		1,20	pH mètre	☐			
Quantités												
Constituants			**Théorique**		**Réel**		**Valeurs à prendre**			**Note**		
Masse de l'émusifiant (g) :			48,00		48,75							
Masse de l'eau chaude (g)			500,00		512,65		Temp. (°C)			Mélanger 30 sec		
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)			3442,00		3403,21		pH :	10,2		Mélanger 30 sec		
Masse de l'acide/base (g)			6,00		6,20		pH :	2,21		Mélanger 15 sec		
					1,00		pH :	2,07		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base		
							pH :					
							pH :					
							pH :					
Masse total du savon (g) :			4000		3971,81							
Paramètres d'émulbitume (Usine)												
Température benne bitume (°C) :		155			**BITUME**							
Température benne savon (°C) :		30			Grade PG de bitume				58-28			
Température cordon chauffant (°C) :		155			Type de fluxant				N/A			
Température atomix (°C) :		OUI			Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)				N/A			
Débit savon (0 à 1) :		0,3			Température du bitume à viscosité 200 mPa*s				153,99			
Vitesse pompe bitume (RPM) :		453			Température théorique de l'émulsion à la sorti				90,185			
Vitesse de l'aomix (RPM)		8500										
Essais												
Essais sur émulsion de bitume					**Norme**				**Résultat**			
Température à la sortie					-				-			
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS					ASTM D7496				-			
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS					ASTM D7496				-			
Stabilité au stockage, %					ASTM D6930				-			
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %					ASTM D6936				-			
Test au ciment, %					ASTM D6935				-			
Refus au tamis 80 µm, %					ASTM D6933				-			
Résidu par distillation, %					ASTM D6997				-			
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %					ASTM D6997				-			
Essais sur résidue					**Norme**				**Résultat**			
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm					ASTM D5				-			
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz					LC 25-012 et AASHTO-T315				-			
Note: Tout a bouché... mauvais nettoyage					Essais réalisé par :				MAB			
					Date production :				16-08-2017			

Figure-A III-5 Formulation 4 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	16-08-2017		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion	CSS		Malaxeur	☐
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-1-005		Thermomètre	☐
Eau :	**Déminéralisée**	Paramètres				Agitateur mecanique	☐
Polymère :	**N/A**	Proportion massique bitume visé (%)			65		
Latex :	**N/A**	Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :				Sceau plastique	☐
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	1,20	pH mètre	☐

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	48,00	48,75			
Masse de l'eau chaude (g)	500,00	512,65	Temp. (°C)		Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3442,00	3403,21	pH :	10,2	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,20	pH :	2,21	Mélanger 15 sec
		1,00	pH :	2,07	Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	3971,81			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	155	Grade PG de bitume	58-28
Température benne savon (°C) :	30	Type de fluxant	N/A
Température cordon chauffant (°C) :	155	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	N/A
Température atomix (°C) :	OUI	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	153,99
Débit savon (0 à 1) :	0,4	Température théorique de l'émulsion à la sorti	90,185
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453		
Vitesse de l'aomix (RPM)	8500		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	-
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: Bitume non émulsionnée (Séparation des phases à la sortie)	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	16-08-2017

Figure-A III-6 Formulation 5 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume											
Préparation du Savon											
Ingrédients (Type)			Date production savon		18-08-2017			Équipements			
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion		CSS			Malaxeur	☐		
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon		2017-1-006			Thermomètre	☐		
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres					Agitateur mecanique	☐		
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)			65					
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :					Sceau plastique	☐		
Autres ajouts :	**N/A**		Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	1,20		pH mètre	☐		
Quantités											
Constituants		**Théorique**		**Réel**		**Valeurs à prendre**			**Note**		
Masse de l'émusifiant (g) :		48,00		48,75							
Masse de l'eau chaude (g)		500,00		512,65		Temp. (°C)			Mélanger 30 sec		
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)		3442,00		3403,21		pH :	10,2		Mélanger 30 sec		
Masse de l'acide/base (g)		6,00		6,20		pH :	2,21		Mélanger 15 sec		
				1,00		pH :	2,07		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base		
						pH :					
						pH :					
						pH :					
Masse total du savon (g) :		4000		3971,81							
Paramètres d'émulbitume (Usine)											
Température benne bitume (°C) :		155		**BITUME**							
Température benne savon (°C) :		30		Grade PG de bitume					58-28		
Température cordon chauffant (°C) :		155		Type de fluxant					N/A		
Température atomix (°C) :		OUI		Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)					N/A		
Débit savon (0 à 1) :		0,5		Température du bitume à viscosité 200 mPa*s					153,99		
Vitesse pompe bitume (RPM) :		453		Température théorique de l'émulsion à la sorti					90,185		
Vitesse de l'aomix (RPM)		8500									
Essais											
Essais sur émulsion de bitume					**Norme**				**Résultat**		
Température à la sortie					-				-		
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS					ASTM D7496				-		
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS					ASTM D7496				-		
Stabilité au stockage, %					ASTM D6930				-		
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %					ASTM D6936				-		
Test au ciment, %					ASTM D6935				-		
Refus au tamis 80 µm, %					ASTM D6933				-		
Résidu par distillation, %					ASTM D6997				-		
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %					ASTM D6997				-		
Essais sur résidue					**Norme**				**Résultat**		
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm					ASTM D5				-		
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz					LC 25-012 et AASHTO-T315				-		
Note: Séparation des phases					Essais réalisé par :				MAB		
					Date production :				18-08-2017		

Figure-A III-7 Formulation 6 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	28-08-2017		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion	CSS		Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-1-007		Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☑
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)		65		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :		22	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	1,00	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	40,00	40,51			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	301,41	Temp. (°C)	67	Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3650,00	3655,08	pH :	10,8	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,36	pH :	2,10	Mélanger 15 sec
			pH :		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4003,36			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	130	Grade PG de bitume	58-28
Température benne savon (°C) :	35	Type de fluxant	Diesel
Température cordon chauffant (°C) :	130	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	5
Température atomix (°C) :	OUI	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	128
Débit savon (0 à 1) :	0,2	Température théorique de l'émulsion à la sorti	80,741
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453		
Vitesse de l'aomix (RPM)	9000		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	**73**
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	-
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: Savon a arreté de couler (perte de débit). bouché la machine...	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	28-08-2017

Figure-A III-8 Formulation 7 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume											
Préparation du Savon											
Ingrédients (Type)			Date production savon		01-09-2017			Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion		CSS			Malaxeur	☐
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon		2017-1-008			Thermomètre	☐
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres					Agitateur mecanique	☐
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)				65		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :					Sceau plastique	☐
Autres ajouts :	**N/A**		Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):		1,00	pH mètre	☐
Quantités									
Constituants		**Théorique**	**Réel**		**Valeurs à prendre**			**Note**	
Masse de l'émusifiant (g) :		40,00	40,01						
Masse de l'eau chaude (g)		300,00	307,56		Temp. (°C)			Mélanger 30 sec	
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)		3650,00	3667,88		pH :	10,8		Mélanger 30 sec	
Masse de l'acide/base (g)		6,00	6,70		pH :	1,99		Mélanger 15 sec	
					pH :			Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base	
					pH :				
					pH :				
					pH :				
Masse total du savon (g) :		4000	4022,15						
Paramètres d'émulbitume (Usine)									
Température benne bitume (°C) :		140			**BITUME**				
Température benne savon (°C) :		40			Grade PG de bitume			58-28	
Température cordon chauffant (°C) :		140			Type de fluxant			Diesel	
Température atomix (°C) :		OUI			Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)			4	
Débit savon (0 à 1) :		0,2			Température du bitume à viscosité 200 mPa*s			134	
Vitesse pompe bitume (RPM) :		453			Température théorique de l'émulsion à la sorti			88,148	
Vitesse de l'aomix (RPM)		9000							
Essais									
Essais sur émulsion de bitume					**Norme**			**Résultat**	
Température à la sortie					-			-	
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS					ASTM D7496			-	
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS					ASTM D7496			-	
Stabilité au stockage, %					ASTM D6930			-	
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %					ASTM D6936			-	
Test au ciment, %					ASTM D6935			-	
Refus au tamis 80 µm, %					ASTM D6933			-	
Résidu par distillation, %					ASTM D6997			-	
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %					ASTM D6997			-	
Essais sur résidue					**Norme**			**Résultat**	
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm					ASTM D5			-	
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz					LC 25-012 et AASHTO-T315			-	
Note: Bitume bouille (beaucoup de bulles); Crémage à la sortie					Essais réalisé par :			MAB	
					Date production :			01-09-2017	

Figure-A III-9 Formulation 8 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	04-09-2017		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion	CSS		Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-1-009		Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☑
Polymère :	N/A		Proportion massique bitume visé (%)		65		
Latex :	N/A		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :		22	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	N/A		Ph visé: 2	Dosage emulsifiant (%):	1,20	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	48,00	50,78			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	319,25	Temp. (°C)	90	Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3642,00	3659,65	pH :	10,8	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,39	pH :	2,15	Mélanger 15 sec
Acide/Base :	0,00	2,11	pH :	1,95	Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4038,18			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	145	Grade PG de bitume	52-28
Température benne savon (°C) :	35	Type de fluxant	-
Température cordon chauffant (°C) :	145	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Température atomix (°C) :	OUI	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	145
Débit savon (0 à 1) :	0,25	Température théorique de l'émulsion à la sorti	87,963
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453		
Vitesse de l'aomix (RPM)	9250		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	-
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: Séparation à la sortie... Machine bouchée	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	04-09-2017

Figure-A III-10 Formulation 9 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume											
Préparation du Savon											
Ingrédients (Type)			Date production savon		12-sept-17			Équipements			
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion		CSS			Malaxeur	☑		
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon		2017-1-010			Thermomètre	☑		
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres					Agitateur mecanique	☑		
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)			65					
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :			22		Sceau plastique	☑		
Autres ajouts :	**N/A**		Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	1,20		pH mètre	☑		
Quantités											
Constituants		**Théorique**		**Réel**		**Valeurs à prendre**			**Note**		
Masse de l'émusifiant (g) :		48,00		50,78							
Masse de l'eau chaude (g)		300,00		319,25		Temp. (°C)	90		Mélanger 30 sec		
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)		3642,00		3659,65		pH :	10,8		Mélanger 30 sec		
Masse de l'acide/base (g)		6,00		6,39		pH :	2,15		Mélanger 15 sec		
				2,11		pH :	1,95		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base		
						pH :					
						pH :					
						pH :					
Masse total du savon (g) :		4000		4038,18							
Paramètres d'émulbitume (Usine)											
Température benne bitume (°C) :		145		**BITUME**							
Température benne savon (°C) :		35		Grade PG de bitume					52-28		
Température cordon chauffant (°C) :		145		Type de fluxant					-		
Température atomix (°C) :		OUI		Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)					0		
Débit savon (0 à 1) :		0,25		Température du bitume à viscosité 200 mPa*s					145		
Vitesse pompe bitume (RPM) :		453		Température théorique de l'émulsion à la sorti					87,963		
Vitesse de l'aomix (RPM)		9250									
Essais											
Essais sur émulsion de bitume					**Norme**				**Résultat**		
Température à la sortie					-				-		
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS					ASTM D7496				-		
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS					ASTM D7496				-		
Stabilité au stockage, %					ASTM D6930				-		
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %					ASTM D6936				-		
Test au ciment, %					ASTM D6935				-		
Refus au tamis 80 µm, %					ASTM D6933				-		
Résidu par distillation, %					ASTM D6997				-		
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %					ASTM D6997				-		
Essais sur résidue					**Norme**				**Résultat**		
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm					ASTM D5				-		
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz					LC 25-012 et AASHTO-T315				-		
Note: Arret du moulin après l'introduction du bitume... tout bouché					Essais réalisé par :				MAB		
					Date production :				12-sept-17		

Figure-A III-11 Formulation 10 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	21-sept-17		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4900**		Type d'émulsion	CRS-2 ou CMS-2		Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-1-011		Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**	Paramètres				Agitateur mecanique	☑
Polymère :	**N/A**	Proportion massique bitume visé (%)			70		
Latex :	**N/A**	Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :			22	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	0,25	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	10,00	10,63			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	305,35	Temp. (°C)	92,5	Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3680,00	3687,217	pH :	9,65	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	5,70	pH :	2,49	Mélanger 15 sec
		2,23	pH :	2,1	Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
		2,38	pH :	1,94	
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4013,51			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	145		
Température benne savon (°C) :	35	Grade PG de bitume	52-28
Température cordon chauffant (°C) :	145	Type de fluxant	-
Température atomix (°C) :	OUI	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Débit savon (0 à 1) :	0,25	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	145
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453	Température théorique de l'émulsion à la sorti	94,231
Vitesse de l'aomix (RPM)	9250		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	**82,5**
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	-
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: Séparation à la sortie....	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	21-09-2017

Figure-A III-12 Formulation 11 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	15-sept-17		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion	CSS		Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-1-012		Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☑
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)		69		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (^{o}C) :		22	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	**N/A**		Ph visé: 2	Dosage emulsifiant (%):	1,20	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	48,00	45,52			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	301,4	Temp. (^{o}C)		Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3642,00	3686	pH :		Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	5,11	pH :	2,42	Mélanger 15 sec
		2,29	pH :	2,07	Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
		1,45	pH :	1,98	
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4041,77			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (^{o}C) :	159		
Température benne savon (^{o}C) :	45	Grade PG de bitume	64-28
Température cordon chauffant (^{o}C) :	159	Type de fluxant	-
Pression (kPa) :	300	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Débit savon (0 à 1) :	0,25	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	159
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453	Température théorique de l'émulsion à la sorti	105,05
Vitesse de l'aomix (RPM)	9250		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	
Viscosité Saybolt Furol à 25^{o}C, SFS	ASTM D7496	
Viscosité Saybolt Furol à 50^{o}C, SFS	ASTM D7496	
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	
Test au ciment, %	ASTM D6935	
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25^{o}C, 100g, dmm	ASTM D5	
G*/sin (δ), 64^{o}C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	

Note: Bitume bouillait, séparation	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	15-sept-17

Figure-A III-13 Formulation 12 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)		Date production savon	15-nov-17	Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**	Type d'émulsion	CSS	Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**	Numéro d'échantillon	2017-1-013	Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**	Paramètres		Agitateur mecanique	☑
Polymère :	**N/A**	Proportion massique bitume visé (%)	69		
Latex :	**N/A**	Température de l'eau $T_{pièce}$ (^{o}C) :	22	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé: 2	Dosage emulsifiant (%): 1,20	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	48,00				
Masse de l'eau chaude (g)	300,00		Temp. (^{o}C)		Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3642,00		pH :		Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00		pH :		Mélanger 15 sec
			pH :		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000				

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (^{o}C) :	159		
Température benne savon (^{o}C) :	45	Grade PG de bitume	64-28
Température cordon chauffant (^{o}C) :	159	Type de fluxant	-
Pression (kPa) :	300	Proportion de fluxant (%$_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Débit savon (0 à 1) :	0,25	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	159
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453	Température théorique de l'émulsion à la sorti	105,05
Vitesse de l'aomix (RPM)	9250		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	
Viscosité Saybolt Furol à 25^{o}C, SFS	ASTM D7496	
Viscosité Saybolt Furol à 50^{o}C, SFS	ASTM D7496	
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	
Test au ciment, %	ASTM D6935	
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25^{o}C, 100g, dmm	ASTM D5	
G*/sin (δ), 64^{o}C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	

Note: Chambre pression bouché	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	15-nov-17

Figure-A III-14 Formulation 13 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	15-nov-17		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion	CSS		Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-01-14		Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☑
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)		69		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :		22	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	0,80	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	32,00	31,42			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	320,17	Temp. (°C)		Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3658,00	4051,7	pH :	10,6	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,94	pH :	2,20	Mélanger 15 sec
			pH :		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4410,23			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	159	Grade PG de bitume	64-28
Température benne savon (°C) :	45	Type de fluxant	-
Température cordon chauffant (°C) :	159	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Pression (kPa) :	300	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	159
Débit savon (0 à 1) :	0,75	Température théorique de l'émulsion à la sorti	105,05
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453		
Vitesse de l'aomix (RPM)	9250		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	-
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: Séparation dans chambre de pression	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	15-nov-17

Figure-A III-15 Formulation 14 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)		Date production savon	15-nov-17	Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**	Type d'émulsion	CSS	Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**	Numéro d'échantillon	2017-1-015	Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**	Paramètres		Agitateur mecanique	☑
Polymère :	**N/A**	Proportion massique bitume visé (%)	69		
Latex :	**N/A**	Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :	22	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé: 2	Dosage emulsifiant (%): 0,80	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	32,00	31,42			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	320,17	Temp. (°C)		Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3658,00	4051,7	pH :	10,6	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,94	pH :	1,98	Mélanger 15 sec
			pH :		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4410,23			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	159		
Température benne savon (°C) :	45	Grade PG de bitume	64-28
Température cordon chauffant (°C) :	159	Type de fluxant	-
Pression (kPa) :	300	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Débit savon (0 à 1) :	1	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	159
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453	Température théorique de l'émulsion à la sorti	105,05
Vitesse de l'aomix (RPM)	9250		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	
Test au ciment, %	ASTM D6935	
Refus au tamis 80 μm, %	ASTM D6933	
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	46,23
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	

Note: Mauvaise manipulations, tout à bouché	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	15-nov-17

Figure-A III-16 Formulation 15 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	20-nov-17		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4900**		Type d'émulsion	CRS-2 ou CMS-2		Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-1-016		Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☑
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)		60		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :		40	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	0,20	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	6,00	6,01			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	299,64	Temp. (°C)	76	Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	2684,00	2690,6	pH :	9,3	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	5,10	pH :	2,06	Mélanger 15 sec
			pH :		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	3000	3001,35			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	165		
Température benne savon (°C) :	50	Grade PG de bitume	64-34
Température cordon chauffant (°C) :	165	Type de fluxant	-
Pression (kPa) :	100	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Débit savon (0 à 1) :	0,3	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	165
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453	Température théorique de l'émulsion à la sorti	99,286
Vitesse de l'aomix (RPM)	9250		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	-
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: Belle émulsions à la sortie, trop haute teneur en eau	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	20-nov-17

Figure-A III-17 Formulation 16 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	30-nov-17		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4900**		Type d'émulsion	CRS-2 ou CMS-2		Malaxeur	☑
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2017-1-017		Thermomètre	☑
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☑
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)		61		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :		39	Sceau plastique	☑
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	0,20	pH mètre	☑

Quantités

Constituants	**Théorique**	**Réel**	**Valeurs à prendre**		**Note**
Masse de l'émusifiant (g) :	6,00	6,34			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	303,9	Temp. (°C)	75,5	Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	2684,00	2684,5	pH :	9,0	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	4,97	pH :	3,10	Mélanger 15 sec
		1,40	pH :	2,6	Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
		1,42	pH :	2,3	
		1,2	pH :	2,11	
			pH :		
Masse total du savon (g) :	3000	3003,73			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	165		
Température benne savon (°C) :	45	Grade PG de bitume	64-34
Température cordon chauffant (°C) :	165	Type de fluxant	-
Pression (kPa) :	100	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Débit savon (0 à 1) :	0,3	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	165
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453	Température théorique de l'émulsion à la sorti	97,662
Vitesse de l'aomix (RPM)	9250		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	**Norme**	**Résultat**
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	-
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note:Pas de savon dans le mélange…Débit insufisant?	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	30-nov-17

Figure-A III-18 Formulation 17 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	01-mars-18		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion	CSS		Malaxeur	☐
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2018-01-01		Thermomètre	☐
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☐
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)		69		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (^{o}C) :			Sceau plastique	☐
Autres ajouts :	**N/A**		Ph visé: 2,00	Dosage emulsifiant (%):	1,20	pH mètre	☐

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	48,00	48,05			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	300,3	Temp. (^{o}C)	59,5	Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3642,00	3645	pH :	10,8	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,00	pH :	2,30	Mélanger 15 sec
		0,99	pH :	2,18	Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
		1,52	pH :	2,05	
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000	4001,86			

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (^{o}C) :	159		
Température benne savon (^{o}C) :	45	Grade PG de bitume	64-28
Température cordon chauffant (^{o}C) :	159	Type de fluxant	-
Pression (kPa) :	150	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Débit savon (0 à 1) :	0,35	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	159
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453	Température théorique de l'émulsion à la sorti	105,05
Vitesse de l'aomix (RPM)	9000		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25^{o}C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50^{o}C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	55,4
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	0
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25^{o}C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64^{o}C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: Sa fonctionne!!!! Faible teneur en bitume mais le meilleur jusqu'à présent!	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	01-mars-18

Figure-A III-19 Formulation 18 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	01-mars-18		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4819**		Type d'émulsion	CRS ou CMS		Malaxeur	☐
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2018-01-02		Thermomètre	☐
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☐
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)		69		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :			Sceau plastique	☐
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	0,20	pH mètre	☐

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	8,00	10			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	310,3	Temp. (°C)	67	Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3682,00	3683	pH :	9,9	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,22	pH :	2,50	Mélanger 15 sec
		9,07	pH :	2,15	Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000				

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	159	Grade PG de bitume	64-28
Température benne savon (°C) :	45	Type de fluxant	-
Température cordon chauffant (°C) :	159	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	0
Pression (kPa) :	150	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	159
Débit savon (0 à 1) :	0,35	Température théorique de l'émulsion à la sorti	105,05
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453		
Vitesse de l'aomix (RPM)	9000		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	-
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	-
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	-

Note: l'émulsion a rupture après 4 jours	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	01-mars-18

Figure-A III-20 Formulation 19 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	05-mars-18		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4819**		Type d'émulsion	CRS ou CMS		Malaxeur	☐
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2018-01-03		Thermomètre	☐
Eau :	**Déminéralisée**	Paramètres				Agitateur mecanique	☐
Polymère :	**N/A**	Proportion massique bitume visé (%)			69		
Latex :	**N/A**	Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :				Sceau plastique	☐
Autres ajouts :	**N/A**	Ph visé:	2	Dosage emulsifiant (%):	0,20	pH mètre	☐

Quantités

Constituants	Théorique	Réel	Valeurs à prendre		Note
Masse de l'émusifiant (g) :	8,00	8,48			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	301,9	Temp. (°C)	59,4	Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3682,00	3681,64	pH :	9,4	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,24	pH :	2,15	Mélanger 15 sec
		1,46	pH :	2,04	Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000				

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	145		
Température benne savon (°C) :	33,5	Grade PG de bitume	64-28
Température cordon chauffant (°C) :	150	Type de fluxant	D
Pression (kPa) :	0	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	2
Débit savon (0 à 1) :	0,25	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	145
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453	Température théorique de l'émulsion à la sorti	92,229
Vitesse de l'aomix (RPM)	9000		

Essais

Essais sur émulsion de bitume	Norme	Résultat
Température à la sortie	-	
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	
Test au ciment, %	ASTM D6935	
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	

Note: lémulsifiant à été mis dans l'eau chaude (>65 degrée C), rupture à la sortie	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	05-mars-18

Figure-A III-21 Formulation 20 Émulbitume

Formulation émulsion de bitume

Préparation du Savon

Ingrédients (Type)			Date production savon	20-mars-18		Équipements	
Émulsifiant :	**Redicote E-4868**		Type d'émulsion	CSS		Malaxeur	☐
Acide/Base :	**HCl**		Numéro d'échantillon	2018-03-01		Thermomètre	☐
Eau :	**Déminéralisée**		Paramètres			Agitateur mecanique	☐
Polymère :	**N/A**		Proportion massique bitume visé (%)		60		
Latex :	**N/A**		Température de l'eau $T_{pièce}$ (°C) :			Sceau plastique	☐
Autres ajouts :	**N/A**		Ph visé: 2	Dosage emulsifiant (%):	1,00	pH mètre	☐

Quantités

Constituants	**Théorique**	**Réel**	**Valeurs à prendre**		**Note**
Masse de l'émusifiant (g) :	40,00	39,95			
Masse de l'eau chaude (g)	300,00	300	Temp. (°C)		Mélanger 30 sec
Masse de l'eau $T_{PIÈCE}$ (g)	3650,00	3662,7	pH :	10,5	Mélanger 30 sec
Masse de l'acide/base (g)	6,00	6,11	pH :	2,15	Mélanger 15 sec
			pH :		Dépendant du pH visé, ajouter des petites quantités d'eau $T_{PIÈCE}$ ou d'acide / base
			pH :		
			pH :		
			pH :		
Masse total du savon (g) :	4000				

Paramètres d'émulbitume (Usine)

		BITUME	
Température benne bitume (°C) :	160		
Température benne savon (°C) :	40	Grade PG de bitume	58-28
Température cordon chauffant (°C) :	160	Type de fluxant	-
Pression (kPa) :	0	Proportion de fluxant ($\%_{MASSIQUE}$ bitume)	-
Débit savon (0 à 1) :	0,2	Température du bitume à viscosité 200 mPa*s	150
Vitesse pompe bitume (RPM) :	453	Température théorique de l'émulsion à la sorti	91,429
Vitesse de l'aomix (RPM)	9000		

Essais

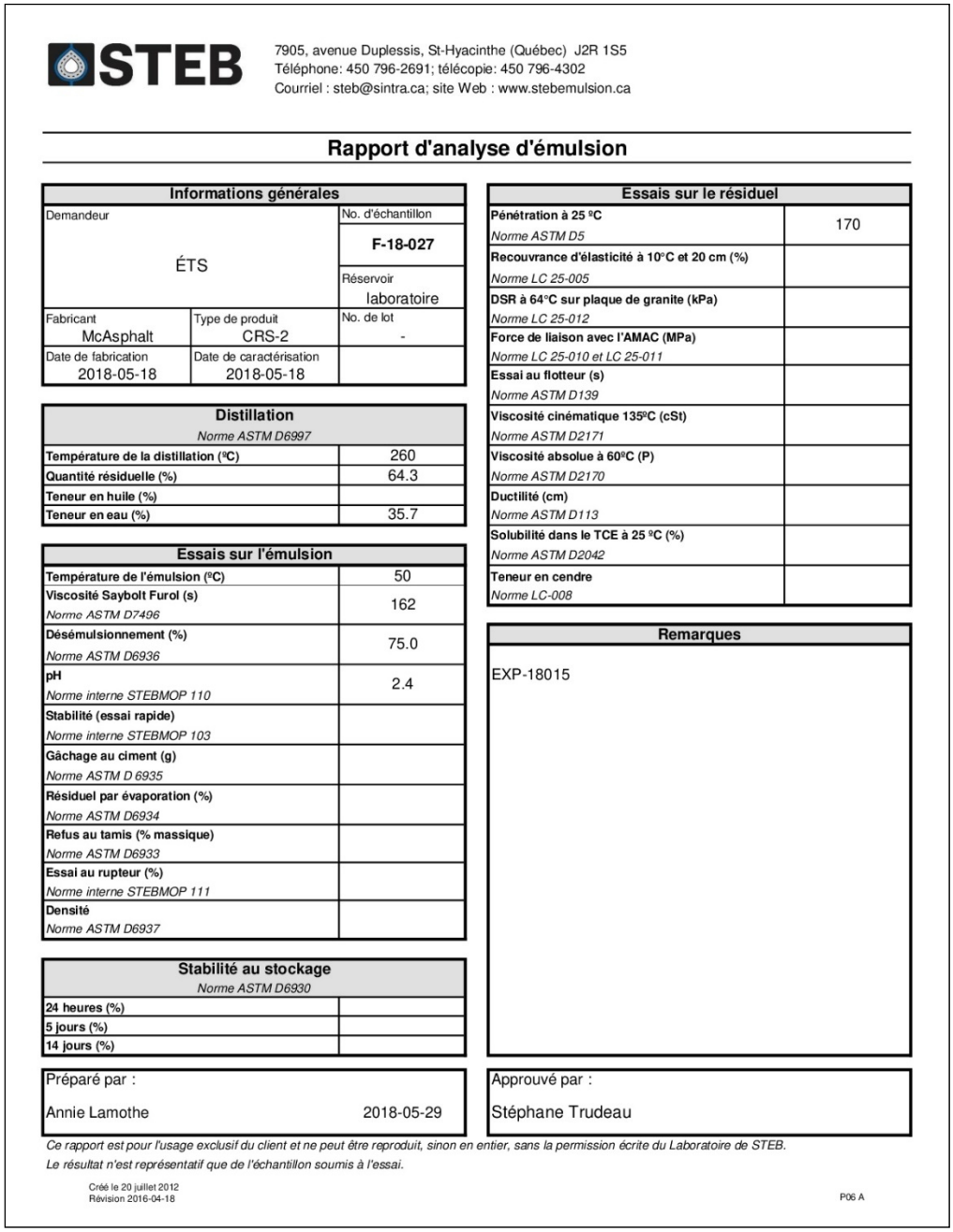
Essais sur émulsion de bitume	**Norme**	**Résultat**
Température à la sortie	-	-
Viscosité Saybolt Furol à 25°C, SFS	ASTM D7496	-
Viscosité Saybolt Furol à 50°C, SFS	ASTM D7496	-
Stabilité au stockage, %	ASTM D6930	-
Désémulsionnement 35ml, 0.02 N $CaCl_2$, %	ASTM D6936	-
Test au ciment, %	ASTM D6935	-
Refus au tamis 80 µm, %	ASTM D6933	-
Résidu par distillation, %	ASTM D6997	-
Huile distiller par rapport volume d'émulsion, %	ASTM D6997	-
Essais sur résidue	**Norme**	**Résultat**
Pénétration à l'aiguille, 25°C, 100g, dmm	ASTM D5	
G*/sin (δ), 64°C, 10 hz	LC 25-012 et AASHTO-T315	

Note: Rupture à la sortie, bulles	Essais réalisé par :	MAB
	Date production :	20-mars-18

Figure-A III-22 Formulation 21 Émulbitume

ANNEXE IV

FICHES TECHNIQUES DES ÉMULSIONS DE BITUME



STEB

7905, avenue Duplessis, St-Hyacinthe (Québec) J2R 1S5
Téléphone: 450 796-2691; télécopie: 450 796-4302
Courriel : steb@sintra.ca; site Web : www.stebemulsion.ca

Rapport d'analyse d'émulsion

Informations générales		
Demandeur: ÉTS		No. d'échantillon: F-18-027
		Réservoir: laboratoire
Fabricant: McAsphalt	Type de produit: CRS-2	No. de lot: -
Date de fabrication: 2018-05-18	Date de caractérisation: 2018-05-18	

Distillation (Norme ASTM D6997)	
Température de la distillation (ºC)	260
Quantité résiduelle (%)	64.3
Teneur en huile (%)	
Teneur en eau (%)	35.7

Essais sur l'émulsion	
Température de l'émulsion (ºC)	50
Viscosité Saybolt Furol (s) *Norme ASTM D7496*	162
Désémulsionnement (%) *Norme ASTM D6936*	75.0
pH *Norme interne STEBMOP 110*	2.4
Stabilité (essai rapide) *Norme interne STEBMOP 103*	
Gâchage au ciment (g) *Norme ASTM D 6935*	
Résiduel par évaporation (%) *Norme ASTM D6934*	
Refus au tamis (% massique) *Norme ASTM D6933*	
Essai au rupteur (%) *Norme interne STEBMOP 111*	
Densité *Norme ASTM D6937*	

Stabilité au stockage (Norme ASTM D6930)	
24 heures (%)	
5 jours (%)	
14 jours (%)	

Essais sur le résiduel	
Pénétration à 25 ºC *Norme ASTM D5*	170
Recouvrance d'élasticité à 10°C et 20 cm (%) *Norme LC 25-005*	
DSR à 64°C sur plaque de granite (kPa) *Norme LC 25-012*	
Force de liaison avec l'AMAC (MPa) *Norme LC 25-010 et LC 25-011*	
Essai au flotteur (s) *Norme ASTM D139*	
Viscosité cinématique 135ºC (cSt) *Norme ASTM D2171*	
Viscosité absolue à 60ºC (P) *Norme ASTM D2170*	
Ductilité (cm) *Norme ASTM D113*	
Solubilité dans le TCE à 25 ºC (%) *Norme ASTM D2042*	
Teneur en cendre *Norme LC-008*	

Remarques

EXP-18015

Préparé par : Annie Lamothe 2018-05-29

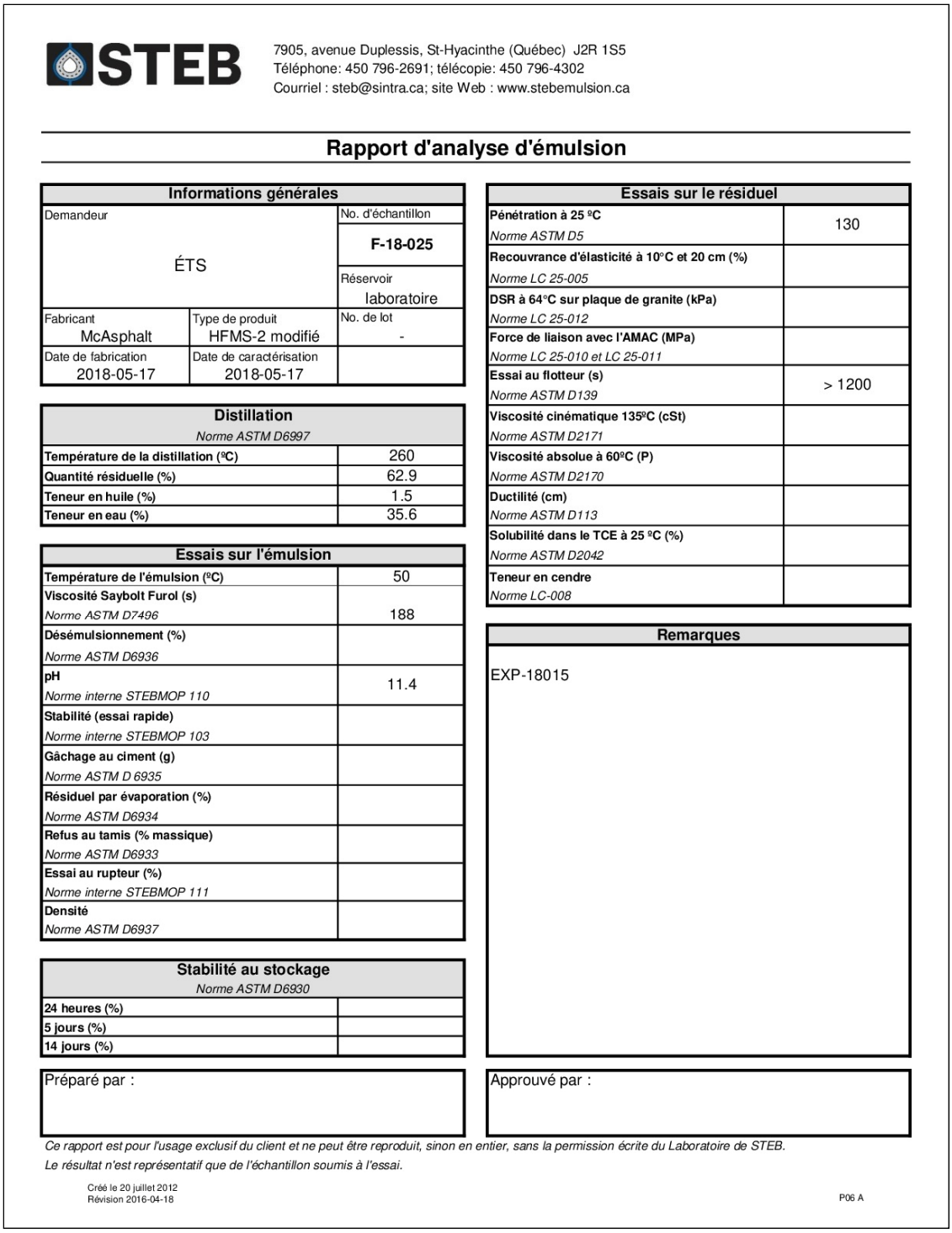
Approuvé par : Stéphane Trudeau

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit, sinon en entier, sans la permission écrite du Laboratoire de STEB.
Le résultat n'est représentatif que de l'échantillon soumis à l'essai.

Créé le 20 juillet 2012
Révision 2016-04-18

P06 A

Figure-A IV-1 Émulsion de bitume CRS-2 McAsphalt



STEB

7905, avenue Duplessis, St-Hyacinthe (Québec) J2R 1S5
Téléphone: 450 796-2691; télécopie: 450 796-4302
Courriel : steb@sintra.ca; site Web : www.stebemulsion.ca

Rapport d'analyse d'émulsion

Informations générales		
Demandeur: ÉTS		No. d'échantillon: F-18-025
		Réservoir: laboratoire
Fabricant: McAsphalt	Type de produit: HFMS-2 modifié	No. de lot: -
Date de fabrication: 2018-05-17	Date de caractérisation: 2018-05-17	

Distillation (Norme ASTM D6997)	
Température de la distillation (ºC)	260
Quantité résiduelle (%)	62.9
Teneur en huile (%)	1.5
Teneur en eau (%)	35.6

Essais sur l'émulsion	
Température de l'émulsion (ºC)	50
Viscosité Saybolt Furol (s) *Norme ASTM D7496*	188
Désémulsionnement (%) *Norme ASTM D6936*	
pH *Norme interne STEBMOP 110*	11.4
Stabilité (essai rapide) *Norme interne STEBMOP 103*	
Gâchage au ciment (g) *Norme ASTM D 6935*	
Résiduel par évaporation (%) *Norme ASTM D6934*	
Refus au tamis (% massique) *Norme ASTM D6933*	
Essai au rupteur (%) *Norme interne STEBMOP 111*	
Densité *Norme ASTM D6937*	

Stabilité au stockage (Norme ASTM D6930)	
24 heures (%)	
5 jours (%)	
14 jours (%)	

Essais sur le résiduel	
Pénétration à 25 ºC *Norme ASTM D5*	130
Recouvrance d'élasticité à 10°C et 20 cm (%) *Norme LC 25-005*	
DSR à 64°C sur plaque de granite (kPa) *Norme LC 25-012*	
Force de liaison avec l'AMAC (MPa) *Norme LC 25-010 et LC 25-011*	
Essai au flotteur (s) *Norme ASTM D139*	> 1200
Viscosité cinématique 135ºC (cSt) *Norme ASTM D2171*	
Viscosité absolue à 60ºC (P) *Norme ASTM D2170*	
Ductilité (cm) *Norme ASTM D113*	
Solubilité dans le TCE à 25 ºC (%) *Norme ASTM D2042*	
Teneur en cendre *Norme LC-008*	

Remarques

EXP-18015

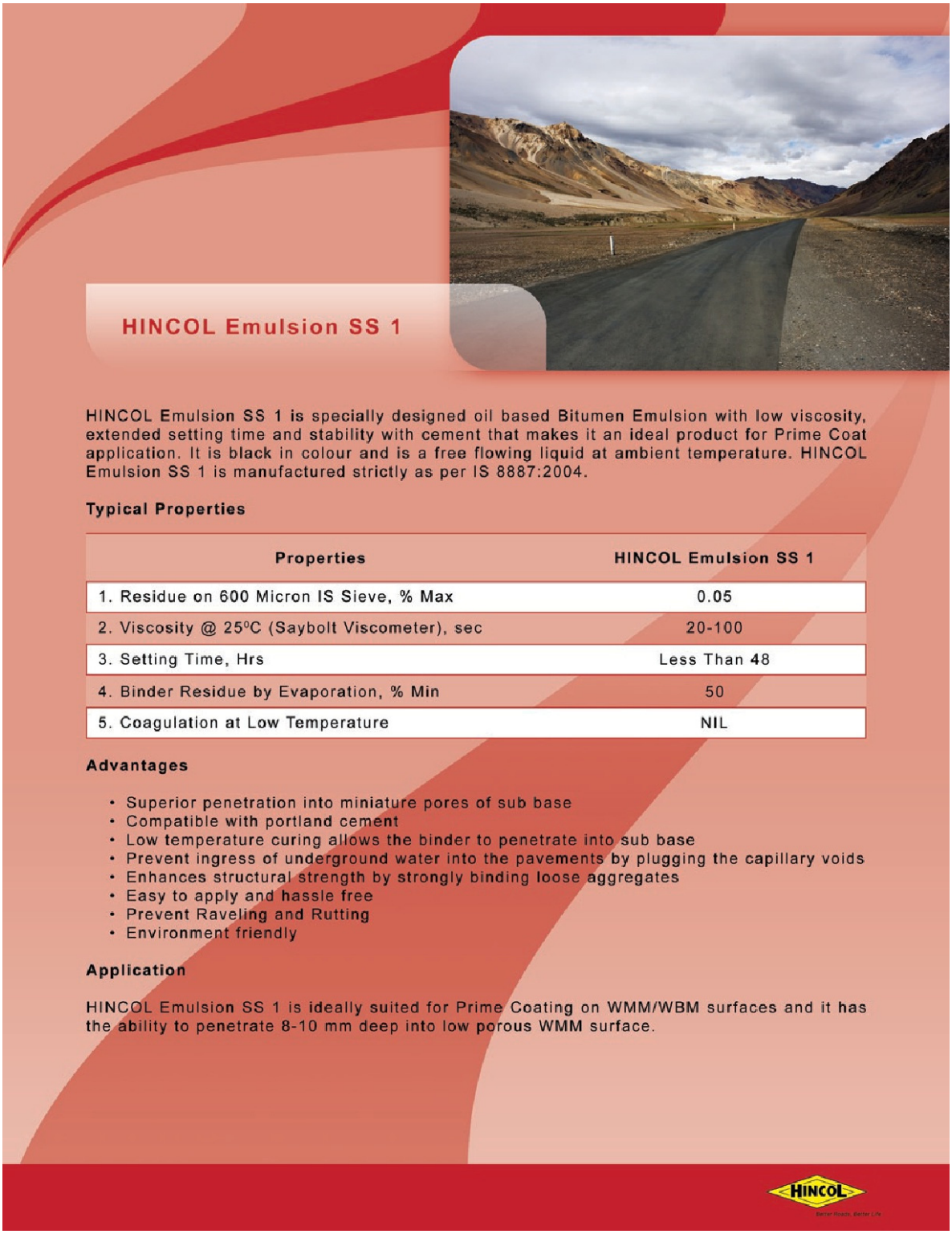
Préparé par :

Approuvé par :

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit, sinon en entier, sans la permission écrite du Laboratoire de STEB.
Le résultat n'est représentatif que de l'échantillon soumis à l'essai.

Créé le 20 juillet 2012
Révision 2016-04-18
P06 A

Figure-A IV-2 Émulsion de bitume HFMS-2 McAsphalt



HINCOL Emulsion SS 1

HINCOL Emulsion SS 1 is specially designed oil based Bitumen Emulsion with low viscosity, extended setting time and stability with cement that makes it an ideal product for Prime Coat application. It is black in colour and is a free flowing liquid at ambient temperature. HINCOL Emulsion SS 1 is manufactured strictly as per IS 8887:2004.

Typical Properties

Properties	HINCOL Emulsion SS 1
1. Residue on 600 Micron IS Sieve, % Max	0.05
2. Viscosity @ 25°C (Saybolt Viscometer), sec	20-100
3. Setting Time, Hrs	Less Than 48
4. Binder Residue by Evaporation, % Min	50
5. Coagulation at Low Temperature	NIL

Advantages

- Superior penetration into miniature pores of sub base
- Compatible with portland cement
- Low temperature curing allows the binder to penetrate into sub base
- Prevent ingress of underground water into the pavements by plugging the capillary voids
- Enhances structural strength by strongly binding loose aggregates
- Easy to apply and hassle free
- Prevent Raveling and Rutting
- Environment friendly

Application

HINCOL Emulsion SS 1 is ideally suited for Prime Coating on WMM/WBM surfaces and it has the ability to penetrate 8-10 mm deep into low porous WMM surface.

HINCOL

Figure-A IV-2 Émulsion de bitume SS-1 Hincol

ANNEXE V

PHASE 1) PRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS

La prochaine section présente les échantillons utilisés pour la réalisation des essais d'arrachement des traitements de surface basée sur la méthode d'essai ASTM D7000. Le type d'émulsion de bitume et d'agrégats, le teneur en fine du mélange et la condition de cure y sont présentés. Pour chaque formulation, trois échantillons ont été réalisés. Les masses de chaque composant ont été enregistrées pour déterminer le taux de liant résiduel de chaque échantillon. Les échantillons 1 à 8 et 9 à 16 sont présentés au tableau A IV-1 et A IV-2 respectivement.

Tableau -A V-1 Présentation des échantillons de l'essai d'arrachement 1 à 8 pour la phase 1

# d'échantillon	Type d'émulsion	Type d'agrégat	Teneur en fines (%)	Température cure	Masse disque (g)	Masse Pan (g)	Masse agrégats (g)	Masse total (g)	Masse émulsion (g)	Masse du résiduel (g)	Taux de pose du liant (Kg/m^2)	Taux liant curé (Kg/m2)
1,1	CRS-2	Gabbro	0	21±2	39,6	0	506	604,9	59,3	38,1	0,96	0,62
1,2					39,4	0	499,2	607,6	69,0	44,4	1,12	0,72
1,3					41,3	0	505,8	606,7	59,6	38,3	0,97	0,62
2,1	HFMS-2	Gabbro	0	21±2	41,2	0	505,4	609,5	62,9	39,6	1,02	0,64
2,2					39	0	504,4	602,5	59,1	38,0	0,96	0,62
2,3					39,7	0	505,5	614,6	69,4	44,6	1,13	0,72
3,1	CRS-2	Gabbro	0,7	21±2	39,8	2018,7	494,7	2613,8	60,6	39,0	0,98	0,63
3,2					39,7	2021,3	494,9	2617,5	61,6	39,6	1,00	0,64
3,3					38,9	2174,7	495,3	2774,8	65,9	42,4	1,07	0,69
4,1	HFMS-2	Gabbro	0,7	21±2	39,5	2491,4	494,7	3086,5	60,9	38,3	0,99	0,62
4,2					38,7	2674,1	495,1	3274	66,1	42,5	1,07	0,69
4,3					39,3	2691,4	495,4	3294,4	68,3	43,9	1,11	0,71
5,1	CRS-2	Granite	0	21±2	40,2	2174,2	427,2	2710,3	68,7	44,2	1,12	0,72
5,2					41,1	2248,6	427,9	2787,6	70,0	45,0	1,14	0,73
5,3					40,7	2640,9	427,3	3189,3	80,4	51,7	1,31	0,84
6,1	HFMS-2	Granite	0	21±2	42,3	2141,8	426,5	2682,9	72,3	45,5	1,17	0,74
6,2					40,0	2516,1	427,4	3057	73,5	47,3	1,19	0,77
6,3					41,8	2024,3	428,4	2563,9	69,4	44,6	1,13	0,72
7,1	CRS-2	Granite	0,7	21±2	41,4	2167,9	426,9	2710,3	74,1	47,6	1,20	0,77
7,2					40,9	2018,9	426,9	2562,2	75,5	48,5	1,23	0,79
7,3					40,0	2690,9	426,4	3238,4	81,1	52,1	1,32	0,85
8,1	HFMS-2	Granite	0,7	21±2	41,5	2673,7	426,5	3219,1	77,4	48,7	1,26	0,79
8,2					41,8	2539,1	426,9	3088	80,2	51,6	1,30	0,84
8,3					40,6	2194,7	430	2741,5	76,2	49,0	1,24	0,80

Tableau -A V-2 Présentation des échantillons de l'essai d'arrachement 9 à 16 pour la phase 1

# d'échantillon	Type d'émulsion	Type d'agrégat	Teneur en fines (%)	Température cure	Masse disque (g)	Masse Pan (g)	Masse agrégats (g)	Masse total (g)	Masse émulsion (g)	Masse du résiduel (g)	Taux de pose du liant (Kg/m^2)	Taux liant curé (Kg/m^2)
9,1	CRS-2	Granite	0	7±2	40,6	0	427,4	536,7	68,7	44,2	1,12	0,72
9,2					42,2	0	424,1	555	88,7	57,0	1,44	0,93
9,3					39,2	0	425,9	532,6	67,5	43,4	1,10	0,70
10,1	HFMS-2	Granite	0	7±2	39,8	0	423,8	543,2	79,6	50,1	1,29	0,81
10,2					41,1	0	425,5	543,5	76,9	49,4	1,25	0,80
10,3					40,3	0	426,8	557,6	90,5	58,2	1,47	0,95
11,1	CRS-2	Granite	0,7	7±2	40,1	0	427,4	546,6	79,1	50,9	1,28	0,83
11,2					40,5	0	424,2	544,1	79,4	51,1	1,29	0,83
11,3					41,6	0	425,8	539,7	72,3	46,5	1,17	0,75
12,1	HFMS-2	Granite	0,7	7±2	40,7	0	423,7	549,8	85,4	53,7	1,39	0,87
12,2					39,4	0	426,5	540,9	75,0	48,2	1,22	0,78
12,3					40,8	0	426,5	539,9	72,6	46,7	1,18	0,76
13,1	CRS-2	Gabbro	0	7±2	41,0	0	476,6	601	83,4	53,6	1,35	0,87
13,2					41,3	0	475,1	600	83,6	53,8	1,36	0,87
13,3					42,1	0	473,1	603,3	88,1	56,6	1,43	0,92
14,1	HFMS-2	Gabbro	0	7±2	41,7	0	494,6	614,9	78,6	49,4	1,28	0,80
14,2					43	0	495,3	613,9	75,6	48,6	1,23	0,79
14,3					41,3	0	495,2	608,5	72,0	46,3	1,17	0,75
15,1	CRS-2	Gabbro	0,7	7±2	41,75	0	506,2	626,1	78,2	50,3	1,27	0,82
15,2					42,2	0	506,9	633,8	84,7	54,5	1,38	0,88
15,3					41,9	0	506,1	637	89,0	57,2	1,45	0,93
16,1	HFMS-2	Gabbro	0,7	7±2	42,3	0	505,8	625,9	77,8	48,9	1,26	0,79
16,2					42	0	506	614,9	66,9	43,0	1,09	0,70
16,3					41,5	0	505,9	612,9	65,5	42,1	1,06	0,68

ANNEXE VI

ESSAIS EN LABORATOIRE

Les prochains tableaux présentent les résultats obtenus lors des essais en laboratoire pour la réalisation de ce mémoire. La liste d'essais des deux phases de cette étude est présentée au Tableau-A VI-1 et les données récoltées en laboratoire sont ensuite détaillées. Six granulométries ont été réalisées dans cette étude : 1 granulométrie de chaque granulat avant transformation (2) et après (2). De plus, le filler de chaque type de granulat créé à l'aide du concasseur et du pulvérisateur a été analysé. Toute la caractérisation des granulats s'est effectuée après leur transformation, soit le tamisage et le lavage des granulats pour la recomposition de la granulométrie.

Tableau-A VI-1 essais de laboratoire réalisés

	Essai	Méthode d'essai
Phase 1	Analyse granulométrique	LC 21-040
	Densité, absorption	LC 21-067
	Fragmentation	LC 21-100
	Micro-Deval	LC 21-070
	Los Angeles	LC 21-400
	Plate et allongé	LC 21-265
	Affinité bitume-granulat	LC 25-009
	Arrachement	ASTM D7000
Phase 2	Rigidité de cisaillement (DSR)	AASHTO T315
	DENT	AASHTO TP113

Tableau-A VI-2 Analyse granulométrie Granite – Avant transformation

Gros granulat							
Essai 1				Essai 2			
Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparée (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant	Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparée (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant
28	0	0	100%	28	0	0	100%
20	0	0	100%	20	0	0	100%
14	0	0	100%	14	0	0	100%
10	39,7	39,7	92%	10	66,8	66,8	87%
6,3	332,5	372,2	25%	6,3	259,8	326,6	34%
5	126,1	498,3	0%	5	122,3	448,9	10%
Total	**498,3**			**Total**	**448,9**		
Gros fin							
Essai 1				Essai 2			
Masse du passant 5 mm (g) :			**49**	Masse du passant 5 mm (g) :			**49**
Masse de la prise d'essai (g) :			**49**	Masse de la prise d'essai (g) :			**49**
Masse après lavage (g) :			**42**	Masse après lavage (g) :			**41**
Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparé (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant	Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparé (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant
5	0	0	100,0%	5	0	0	100,0%
2,5	34,2	34,2	30,2%	2,5	30,9	30,9	36,9%
1,25	3,4	37,6	23,3%	1,25	2,9	33,8	31,0%
0,63	1	38,6	21,2%	0,63	1,3	35,1	28,4%
0,315	0,7	39,3	19,8%	0,315	0,8	35,9	26,7%
0,16	0,8	40,1	18,2%	0,16	0,8	36,7	25,1%
0,08	1,4	41,5	15,3%	0,08	2	38,7	21,0%
Plat	7,2			Plat	8,2		
Total	**48,7**			**Total**	**46,9**		

Tableau-A VI-3 Combiné granulaire Granite – Avant transformation

Combiné			
Ouverture des tamis (mm)	% Passant (Essai 1)	% Passant (Essai 2)	Moyenne
28	100%	100%	100,0%
20	100%	100%	100,0%
14	100%	100%	100,0%
10	92,7%	86,6%	89,7%
6,3	32,0%	34,4%	33,2%
5	9,0%	9,8%	9,4%
2,5	2,7%	3,6%	3,2%
1,25	2,1%	3,1%	2,6%
0,63	1,9%	2,8%	2,3%
0,315	1,8%	2,6%	2,2%
0,16	1,6%	2,5%	2,0%
0,08	1,4%	2,1%	1,7%

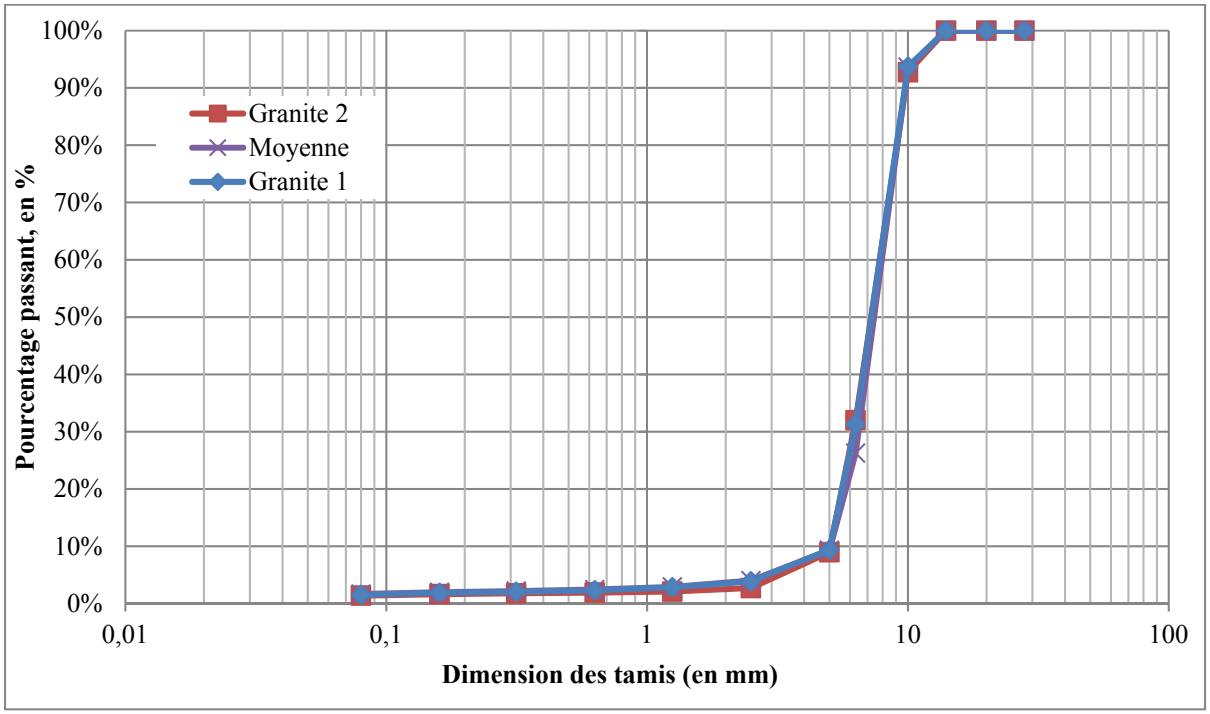


Figure-A VI-1 Combiné granulaire Granite – Avant transformation

Tableau-A VI-4 Analyse granulométrie Gabbro – Avant transformation

Gros granulat

Essai 1				Essai 2			
Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparée (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant	Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparée (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant
28	0	0	100%	28	0	0	100%
20	0	0	100%	20	0	0	100%
14	0	0	100%	14	0	0	100%
10	48,2	48,2	94%	10	26,1	26,1	93%
6,3	517,6	565,8	24%	6,3	259,2	285,3	24%
5	178	743,8	0%	5	90,9	376,2	0%
Total	**743,8**			**Total**	**376,2**		
Granulat fin							
Essai 1				Essai 2			
Masse du passant 5 mm (g) :			**83,8**	Masse du passant 5 mm (g) :			**39**
Masse de la prise d'essai (g) :			**83,8**	Masse de la prise d'essai (g) :			**39**
Masse après lavage (g) :			**83,8**	Masse après lavage (g) :			**39**
Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparé (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant	Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparé (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant
5	0	0	100,0%	5	0	0	100,0%
2,5	47,6	47,6	43,2%	2,5	23	23	41,0%
1,25	10,1	57,7	31,1%	1,25	4,3	27,3	30,0%
0,63	4,4	62,1	25,9%	0,63	2,2	29,5	24,4%
0,315	2,6	64,7	22,8%	0,315	1	30,5	21,8%
0,16	2,3	67	20,0%	0,16	0,8	31,3	19,7%
0,08	3,1	70,1	16,3%	0,08	1,5	32,8	15,9%
Plat	13,7			Plat	6,2		
Total	**83,8**			**Total**	**39,0**		

Tableau-A VI-5 Combiné granulaire Gabbro – Avant transformation

Combiné

Ouverture des tamis (mm)	% Passant (Essai 1)	% Passant (Essai 2)	Moyenne
28	100,0%	100,0%	100,0%
20	100,0%	100,0%	100,0%
14	100,0%	100,0%	100,0%
10	94,2%	93,7%	93,9%
6,3	31,6%	31,3%	31,5%
5	10,1%	9,4%	9,8%
2,5	4,4%	3,9%	4,1%
1,25	3,2%	2,8%	3,0%
0,63	2,6%	2,3%	2,5%
0,315	2,3%	2,0%	2,2%
0,16	2,0%	1,9%	1,9%
0,08	1,7%	1,5%	1,6%

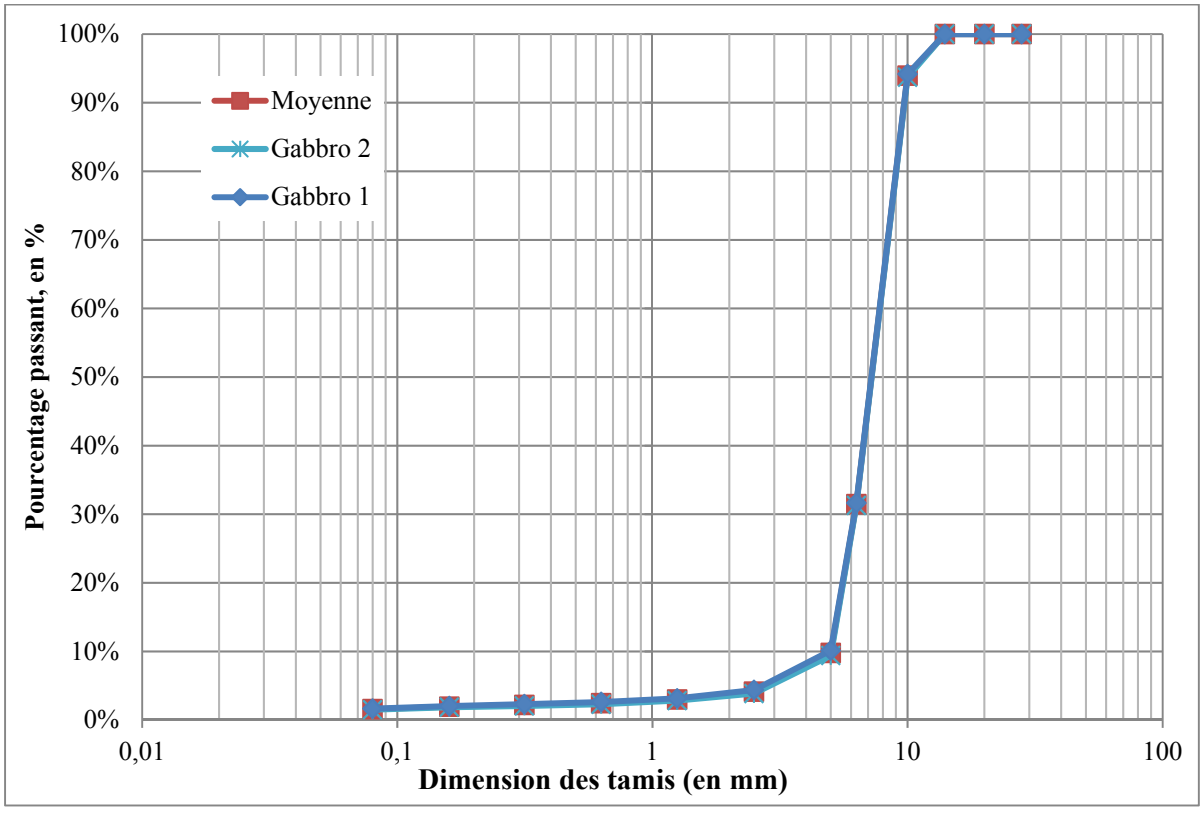


Figure-A VI-2 Combiné granulaire Gabbro – Avant transformation

Tableau-A VI-6 Analyse granulométrie Granite – Après transformation

Essai 1				Essai 2			
Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparée (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant	Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparée (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant
28		0,0	100%	28		0	100%
20	0	0,0	100,0%	20	0	0	100,0%
14	0	0,0	100,0%	14	0	0	100,0%
10	72	72,0	87,4%	10	30,9	30,9	94,7%
6,3	360	432,0	24,5%	6,3	420	450,9	22,3%
5	137,7	569,7	0,4%	5	128,4	579,3	0,2%
2,5	1	570,7	0,3%	2,5	0,3	579,6	0,1%
1,25	1,2	571,9	0,1%	1,25	0,1	579,7	0,1%
0,63	0	571,9	0,1%	0,63	0,1	579,8	0,1%
0,315	0,1	572,0	0,0%	0,315	0	579,8	0,1%
0,16	0	572,0	0,0%	0,16	0	579,8	0,1%
0,08	0,1	572,1	0,0%	0,08	0,1	579,9	0,1%
Plat	0,1			Plat	0,3		
Total	**572,2**			**Total**	**580,8**		

Combiné			
Ouverture des tamis (mm)	% Passant (Essai 1)	% Passant (Essai 2)	Moyenne
28	100%	100%	100,0%
20	100,0%	100,0%	100,0%
14	100,0%	100,0%	100,0%
10	87,4%	94,7%	91,0%
6,3	24,5%	22,3%	23,4%
5	0,4%	0,2%	0,3%
2,5	0,3%	0,1%	0,2%
1,25	0,1%	0,1%	0,1%
0,63	0,1%	0,1%	0,1%
0,315	0,0%	0,1%	0,1%
0,16	0,0%	0,1%	0,1%
0,08	0,0%	0,1%	0,0%

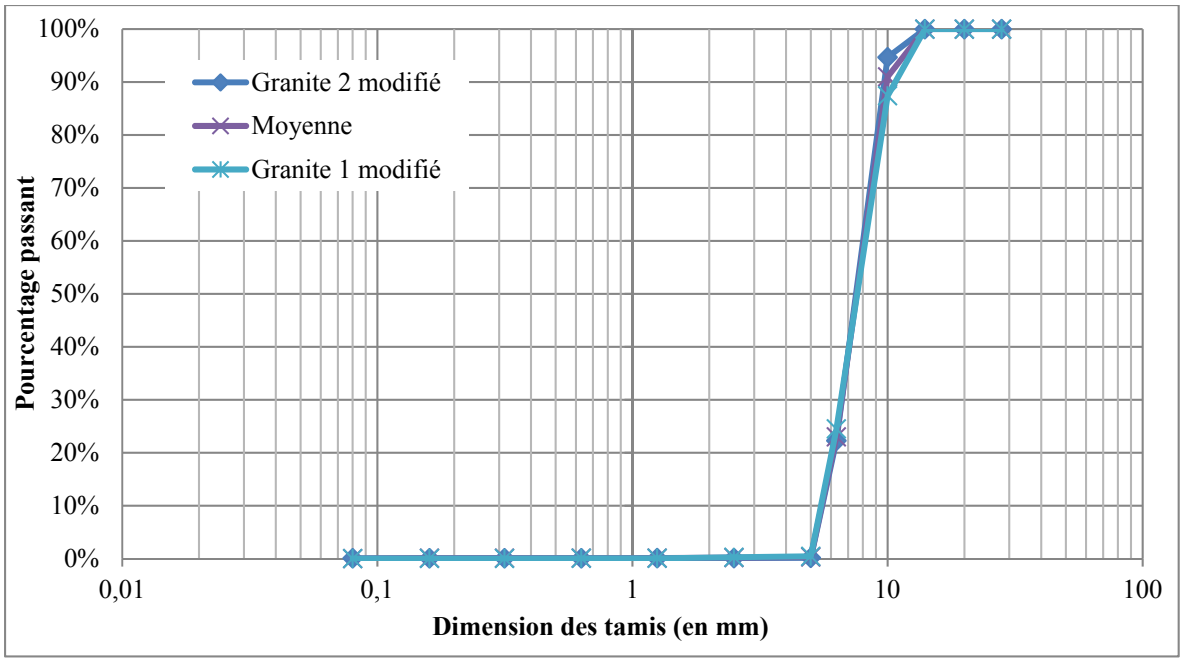


Figure-A VI-3 Analyse granulométrie Granite – Après transformation

Tableau-A VI-7 Analyse granulométrie Gabbro – Après transformation

Essai 1				Essai 2			
Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparée (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant	Ouverture des tamis (mm)	Masse retenue séparée (g)	Masse retenue cumulée (g)	% passant
28		0,0	100%	28		0	100%
20	0	0,0	100,0%	20	0	0	100,0%
14	0	0,0	100,0%	14	0	0	100,0%
10	28,7	28,7	95,1%	10	30,9	30,9	94,7%
6,3	424,8	453,5	22,4%	6,3	420,6	451,5	22,8%
5	128,5	582,0	0,4%	5	128,4	579,9	0,8%
2,5	1,4	583,4	0,2%	2,5	0,3	580,2	0,8%
1,25	0,5	583,9	0,1%	1,25	0,1	580,3	0,7%
0,63	0,2	584,1	0,1%	0,63	0,1	580,4	0,7%
0,315	0,2	584,3	0,1%	0,315	0	580,4	0,7%
0,16	0,1	584,4	0,0%	0,16	0	580,4	0,7%
0,08	0,1	584,5	0,0%	0,08	0,1	580,5	0,7%
Plat	0,1			Plat	0,3		
Total	**584,6**			**Total**	**580,8**		

Combiné			
Ouverture des tamis (mm)	% Passant (Essai 1)	% Passant (Essai 2)	Moyenne
28	100%	100%	100,0%
20	100,0%	100,0%	100,0%
14	100,0%	100,0%	100,0%
10	95,1%	94,7%	94,9%
6,3	22,4%	22,3%	22,3%
5	0,4%	0,2%	0,3%
2,5	0,2%	0,1%	0,2%
1,25	0,1%	0,1%	0,1%
0,63	0,1%	0,1%	0,1%
0,315	0,1%	0,1%	0,1%
0,16	0,0%	0,1%	0,1%
0,08	0,0%	0,1%	0,0%

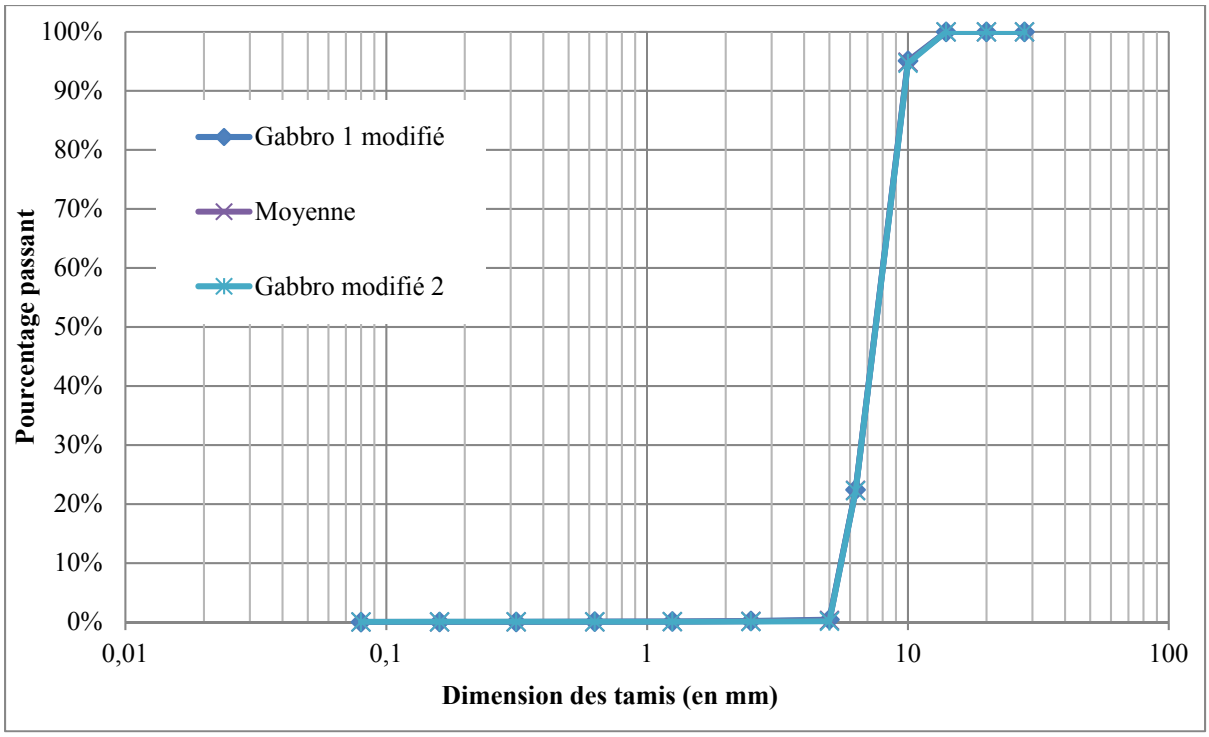


Figure-A VI-4 Analyse granulométrie Gabbro – Après transformation

Tableau-A VI-8 Analyse granulométrie filler Granite – Après concasseur et pulvérisateur

D_{v10} : 0,869 µm; D_{v50} : 12,1 µm; D_{v90} : 57,0 µm; Surface Spécifique : 1957 mm^2/kg					
Classes de taille (µM)	Densité Volume (%)	Classes de taille (µM)	Densité Volume (%)	Classes de taille (µM)	Densité Volume (%)
0,0107	0,000	0,558	1,871	29,177	4,119
0,0121	0,000	0,634	2,208	33,150	4,114
0,0138	0,000	0,720	2,387	37,664	4,077
0,0156	0,000	0,818	2,390	42,792	3,992
0,0178	0,000	0,929	2,245	48,619	3,835
0,0202	0,000	1,056	2,017	55,239	3,580
0,0229	0,000	1,200	1,787	62,761	3,209
0,0260	0,000	1,363	1,618	71,306	2,722
0,0296	0,000	1,548	1,537	81,015	2,142
0,0336	0,000	1,759	1,528	92,047	1,521
0,0382	0,000	1,999	1,563	104,580	0,933
0,0434	0,000	2,271	1,614	118,820	0,454
0,0493	0,000	2,580	1,680	134,999	0,141
0,0560	0,000	2,932	1,784	153,381	0,012
0,0637	0,000	3,331	1,945	174,266	0,000
0,0723	0,000	3,784	2,146	197,994	0,000
0,0822	0,000	4,300	2,367	224,954	0,000
0,0934	0,000	4,885	2,592	255,584	0,000
0,1061	0,000	5,550	2,804	290,385	0,000
0,1205	0,000	6,306	2,993	329,925	0,000
0,1369	0,000	7,165	3,158	374,849	0,000
0,1556	0,000	8,140	3,301	425,889	0,000
0,1768	0,000	9,249	3,429	483,880	0,000
0,2008	0,000	10,508	3,544	549,766	0,000
0,2282	0,000	11,939	3,654	624,624	0,000
0,2593	0,000	13,564	3,758	709,675	0,000
0,2946	0,020	15,411	3,855	806,307	0,000
0,3347	0,232	17,510	3,942	916,096	0,000
0,3802	0,547	19,894	4,013	1040,834	0,000
0,4320	0,964	22,603	4,067	1182,557	0,000
0,4908	1,431	25,680	4,102	1343,578	0,000

Tableau-A VI-9 Analyse granulométrie filler Gabbro – Après concasseur et pulvérisateur

D_{v10} : 0,736 µm; D_{v50} : 10,0 µm; D_{v90} : 51,2 µm; Surface Spécifique : 2389 mm^2/kg					
Classes de taille (µM)	Densité Volume (%)	Classes de taille (µM)	Densité Volume (%)	Classes de taille (µM)	Densité Volume (%)
0,0107	0,000	0,558	2,302	29,177	3,687
0,0121	0,000	0,634	2,574	33,150	3,599
0,0138	0,000	0,720	2,691	37,664	3,510
0,0156	0,000	0,818	2,652	42,792	3,405
0,0178	0,000	0,929	2,486	48,619	3,252
0,0202	0,000	1,056	2,254	55,239	3,019
0,0229	0,000	1,200	2,021	62,761	2,680
0,0260	0,000	1,363	1,837	71,306	2,232
0,0296	0,000	1,548	1,720	81,015	1,701
0,0336	0,000	1,759	1,661	92,047	1,145
0,0382	0,000	1,999	1,631	104,580	0,640
0,0434	0,000	2,271	1,610	118,820	0,258
0,0493	0,000	2,580	1,606	134,999	0,021
0,0560	0,000	2,932	1,661	153,381	0,000
0,0637	0,000	3,331	1,804	174,266	0,000
0,0723	0,000	3,784	2,021	197,994	0,000
0,0822	0,000	4,300	2,289	224,954	0,000
0,0934	0,000	4,885	2,586	255,584	0,000
0,1061	0,000	5,550	2,883	290,385	0,000
0,1205	0,000	6,306	3,152	329,925	0,000
0,1369	0,000	7,165	3,382	374,849	0,000
0,1556	0,000	8,140	3,571	425,889	0,000
0,1768	0,000	9,249	3,723	483,880	0,000
0,2008	0,000	10,508	3,843	549,766	0,000
0,2282	0,007	11,939	3,931	624,624	0,000
0,2593	0,089	13,564	3,987	709,675	0,000
0,2946	0,279	15,411	4,008	806,307	0,000
0,3347	0,587	17,510	3,994	916,096	0,000
0,3802	0,992	19,894	3,946	1040,834	0,000
0,4320	1,453	22,603	3,871	1182,557	0,000
0,4908	1,910	25,680	3,781	1343,578	0,000

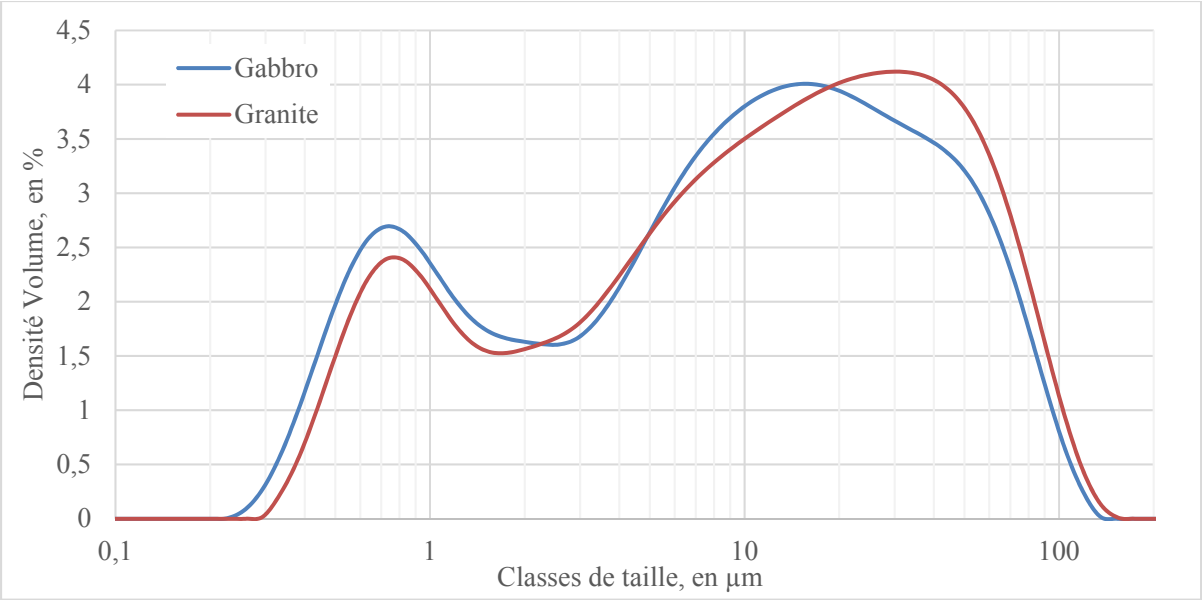


Figure-A VI-5 Courbe granulométrique volumique des fillers

Tableau-A VI-10 Densité, absorption et fragmentation des granulats

Densité – absorption (**LC 21-067**)						
Matériau	Masse SSS, en g	Masse dans l'eau, en g	Masse sec, en g	Densité brute	Densité apparente	Absorption, en %
Granite 1	2544.8	1612.2	2528.4	2.711	2.760	0.6
Granite 2	2191.6	1388.8	2179.4	2.715	2.757	0.6
			Moyenne Granite	2.713	2.758	0.6
Gabbro 1	2400.2	1573.7	2387.5	2.889	2.934	0.5
Gabbro 2	2140.7	1406.1	2130.3	2.900	2.942	0.5
			Moyenne Gabbro	2.894	2.938	0.5

Fragmentation **(LC 21-100)**				
Matériau	Masse des particules fracturées, en g	Masse des particules marginales, en g	Masse des particules non fracturées, en g	Pourcentage de particules fracturée
Granite 1	450,1	10,1	41,9	90,6
Granite 2	445,8	8,4	46,3	89,9
			Moyenne Granite	90.3
Gabbro 1	435,2	15,4	49,7	88,5
Gabbro 2	440,1	12,1	48,4	89,1
			Moyenne Gabbro	88.8

Tableau-A VI-11 Résultats Micro-Deval et Los Angeles

Micro-Deval **(LC 21-070) -** Grade D, 12000 tours				
Matériau	Masse initiale, en g	Masse finale retenue au tamis 1.25mm, en g	Masse de la charge abrasive, en g	Usure, en %
Granite 1	500.2	465.2	2499.5	7.0
Granite 2	501.2	455.3	2500.1	9.2
			Moyenne granite	8.1
Gabbro 1	499.2	459.3	2499.5	8.0
Gabbro 2	498.5	458.1	2500.1	8.1
			Moyenne gabbro	8.0
Los Angeles **(LC 21-400) –** Grade C, 8 boules				
Matériau	Masse initiale, en g	Masse retenue au tamis 1.70mm, en g	Masse de la charge abrasive, en g	Perte, en %
Granite 1	2501.1	1750.3	3329.4	30.0
Granite 2	2498.4	1800.5	3329.5	27.9
			Moyenne granite	29.0
Gabbro 1	2502.3	1803.1	3330.0	27.9
Gabbro 2	2499.2	1762.3	3327.8	29.5
			Moyenne Gabbro	28.7

Tableau-A VI-12 Résultats de l'essai plates et allongées du Granite

Tamis (mm)	Retenu		Particules "allongées"			Particules "plates"		Particules "plates et allongé"	
	m_{ti} (g)	(%)	Masse de la prise d'essai (m_p) (g)	Masse des particules "allongées" (g)	Masse pondérée des particules "allongées" (g)	Masse des particules plates (g)	Masse pondérée des particules plate (g)	Masse des particules plates et allongées (g)	Masse pondérée des particules plates et allongées (g)
37,5	-	0	0	0	0	0	0	0	0
28	-	0	0	0	0	0	0	0	0
20	-	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	66,8	20	66,8	4,8	5	15,9	16	0,8	1
6,3	259,8	80	259,8	5,9	6	61,4	61	3,5	4
Total	326,6			Total	11	Total	77	Total	4

Tableau-A VI-13 Résultats de l'essai plates et allongées du Gabbro

Tamis (mm)	Retenu		Particules "allongées"			Particules "plates"		Particules "plates et allongé"	
	m_{ti} (g)	%	Masse de la prise d'essai (m_p) (g)	Masse des particules "allongées" (g)	Masse pondérée des particules "allongées" (g)	Masse des particules plates (g)	Masse pondérée des particules plate (g)	Masse des particules plates et allongées (g)	Masse pondérée des particules plates et allongées (g)
37,5	-	0	0	0	0	0	0	0	0
28	-	0	0	0	0	0	0	0	0
20	-	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	293	52	293,6	9,67	10	69,55	70	9,67	10
6,3	271	48	271,8	87,87	88	59,56	60	22,85	23
Total	565			Total	11	Total	77	Total	4

Tableau-A VI-14 Essai affinité bitume-granulat
Information des échantillons

Type d'émulsion	Type de granulat	$M_{granulat}$, en g	M_{total}, en g	$M_{bitume\ résiduel}$, en g
CRS-2	Granite	149,99	152,49	2,50
CRS-2	Gabbro	150,02	152,42	2,40
HFMS-2	Granite	150,1	152,26	2,16
HFMS-2	Gabbro	149,98	152,34	2,36

Tableau-A VI-15 Résultats de l'essai affinité bitume-granulat

Niveau d'enrobage, en %	Gabbro & CRS-2		Granite & CRS-2		Gabbro & HFMS-2		Granite & HFMS-2	
	Masse, en g	Proportion, en %	Masse, en g	Proportion, en %	Masse, en g	Proportion, en %	Masse, en g	Proportion, en %
1	80,40	52,9%	127,34	83,7%	50,19	33,0%	2,23	1,5%
0,95	29,46	19,4%	20,77	13,7%	29,29	19,2%	1,06	0,7%
0,9	19,28	12,7%	3,46	2,3%	19,53	12,8%	11,63	7,6%
0,85	9,49	6,2%	0	0,0%	18,86	12,4%	8,3	5,5%
0,8	6,68	4,4%	0,57	0,4%	15,98	10,5%	23,4	15,4%
0,75	5,85	3,8%	0	0,0%	10,04	6,6%	36,2	23,8%
0,7	0,85	0,6%	0	0,0%	2,61	1,7%	18,67	12,3%
0,65	0	0,0%	0	0,0%	2,6	1,7%	7,59	5,0%
0,6	0	0,0%	0	0,0%	0,52	0,3%	13,58	8,9%
0,55	0	0,0%	0	0,0%	0,41	0,3%	4,79	3,2%
0,5	0	0,0%	0	0,0%	1,14	0,7%	16,61	10,9%
0,45	0	0,0%	0	0,0%	1,14	0,7%	6,49	4,3%
0,4	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	1,23	0,8%
0,35	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0,25	0,2%
Enrobage moyen, en%	94.8%		99.9%		90.0%		70.5%	

Tableau-A VI-16 Résultats de l'essai d'arrachement

# échantillon	Masse du disque asphalté, en g	Masse initial de l'échantillon, en g	Masse final de l'échantillon, en g	Perte massique, en %
1,1	39,6	564,5	560,2	1,1
1,2	39,4	558,2	551,5	1,7
1,3	41,3	562,0	557,1	1,3
2,1	41,2	586,4	577,2	2,2
2,2	39,0	559,2	550,1	2,3
2,3	39,7	548,2	540,1	2,1
3,1	39,8	537,2	525,1	3,2
3,2	93,7	546,1	530,0	4,7
3,3	38,9	549,7	537,2	3,3
4,1	39,5	545,0	537,2	2,1
4,2	38,7	560,1	550,1	2,6
4,3	39,3	558,5	549,1	2,4
5,1	40,2	493,4	490,8	0,8
5,2	41,1	497,7	496,5	0,3
5,3	40,7	516,3	513,2	0,9
6,1	42,3	507,5	498,3	2,6
6,2	40,0	516,2	506,4	2,7
6,3	41,8	514,5	506,7	2,2
7,1	41,4	511,2	502,1	2,6
7,2	40,9	509,3	500,9	2,4
7,3	40,0	512,3	505,4	1,9
8,1	41,5	514,8	498,8	4,5
8,2	41,8	518,0	504,8	3,7
8,3	40,6	521,2	511,0	2,8
9,1	40,6	502,9	499,5	1,0
9,2	42,2	518,1	517,0	0,3
9,3	39,2	487,9	480,1	2,3

Tableau-A VI-16 Résultats de l'essai d’arrachement (suite)

# échantillon	Masse du disque asphalté, en g	Masse initial de l’échantillon, en g	Masse final de l’échantillon, en g	Perte massique, en %
10,1	39,8	512,9	486,5	7,4
10,2	41,1	513,3	497,5	4,5
10,3	40,3	526,2	508,6	4,8
11,1	40,1	509,2	472,4	10,4
11,2	40,5	501,9	477,3	7,1
11,3	41,6	497,4	443,1	15,8
12,1	40,7	520,8	497,5	6,5
12,2	39,4	513,5	503,6	2,8
12,3	40,8	515,5	508,7	1,9
13,1	41,0	572,4	569,5	0,7
13,2	41,3	567,6	566,6	0,3
13,3	42,1	571,0	565,5	1,4
14,1	41,7	577,3	564,1	3,3
14,2	43,0	587,9	581,9	1,5
14,3	41,3	584,7	575,7	2,2
15,1	41,8	576,6	570,1	1,6
15,2	42,2	590,6	576,8	3,3
15,3	41,9	588,2	584,0	1,0
16,1	42,3	597,3	587,0	2,5
16,2	42,0	585,2	573,7	2,8
16,3	41,5	575,7	566,0	2,4

	Mdisque	M av essai	M ap essai			
# échanitllon	C	A	B	% mass lost	% cure à l'essai	Taux de pose du liant (Kg/m2)
1,1	39,6	564,5	560,2	1,1	44,2	0,963
1,2	39,4	558,2	551,5	1,7	44,2	1,121
1,3	41,3	562,0	557,1	1,3	0,0	0,968
2,1	41,2	586,4	577,2	2,2	0,0	1,022
2,2	39,0	559,2	550,1	2,3	0,0	0,960
2,3	39,7	548,2	540,1	2,1	0,0	1,127
3,1	39,8	537,2	525,1	3,2	0,0	0,984
3,2	93,7	546,1	530,0	4,7	0,0	1,000
3,3	38,9	549,7	537,2	3,3	0,0	1,070
4,1	39,5	545,0	537,2	2,1	0,0	0,989
4,2	38,7	560,1	550,1	2,6	0,0	1,073
4,3	39,3	558,5	549,1	2,4	0,0	1,109
5,1	40,2	493,4	490,8	0,8	79,5	1,116
5,2	41,1	497,7	496,5	0,3	77,2	1,137
5,3	40,7	516,3	513,2	0,9	77,3	1,306
6,1	42,3	507,5	498,3	2,6	63,0	1,174
6,2	40,0	516,2	506,4	2,7	68,6	1,194
6,3	41,8	514,5	506,7	2,2	64,6	1,127
7,1	41,4	511,2	502,1	2,6	75,6	1,203
7,2	40,9	509,3	500,9	2,4	76,4	1,226
7,3	40,0	512,3	505,4	1,9	75,3	1,317
8,1	41,5	514,8	498,8	4,5	62,7	1,257
8,2	41,8	518,0	504,8	3,7	64,6	1,302
8,3	40,6	521,2	511,0	2,8	61,0	1,238
9,1	40,6	502,9	499,5	1,0	83,6	1,116
9,2	42,2	518,1	517,0	0,3	84,0	1,441
9,3	39,2	487,9	480,1	2,3	94,6	1,096
10,1	39,8	512,9	486,5	7,4	72,5	1,293
10,2	41,1	513,3	497,5	4,5	75,8	1,249
10,3	40,3	526,2	508,6	4,8	71,8	1,470
11,1	40,1	509,2	472,4	10,4	79,3	1,285
11,2	40,5	501,9	477,3	7,1	80,4	1,289

11,3	41,6	497,4	443,1	15,8	77,1	1,174
12,1	40,7	520,8	497,5	6,5	72,6	1,387
12,2	39,4	513,5	503,6	2,8	75,8	1,218
12,3	40,8	515,5	508,7	1,9	70,2	1,179
13,1	41,0	572,4	569,5	0,7	0,0	1,354
13,2	41,3	567,6	566,6	0,3	0,0	1,358
13,3	42,1	571,0	565,5	1,4	0,0	1,431
14,1	41,7	577,3	564,1	3,3	0,0	1,276
14,2	43,0	587,9	581,9	1,5	0,0	1,228
14,3	41,3	584,7	575,7	2,2	0,0	1,169
15,1	41,8	576,6	570,1	1,6	0,0	1,269
15,2	42,2	590,6	576,8	3,3	0,0	1,376
15,3	41,9	588,2	584,0	1,0	0,0	1,445
16,1	42,3	597,3	587,0	2,5	0,0	1,263
16,2	42,0	585,2	573,7	2,8	0,0	1,086
16,3	41,5	575,7	566,0	2,4	0,0	1,064

Tableau-A VI-17 Résultats DSR mix méthode 1
mélange avec cendre volante

Cendre Volante (FA): première méthode de malaxage						
Mix	Température (°C)	G* (MPa)	θ_p (°)	G*/sin(θ_p) (MPa)	$G^*_{Mastic}/G^*_{Émulsion}$	Moyenne des ratios
85%BA-15%FA	64	3,92	80,2	4,92	0,94	1,34
	70	2,81	79,5	2,86	1,37	
	76	1,64	77,8	1,68	1,61	
	82	1,01	75,0	1,05	1,44	
	88	0,72	70,6	0,77		
70%BA-30%FA	64	9,30	84,6	9,33	2,24	2,34
	70	4,66	84,5	4,68	2,27	
	76	2,66	83,9	2,67	2,61	
	82	1,56	82,6	1,57	2,22	
	88	0,97	80,0	0,99		
55%BA-45%FA	64	17,60	86,1	17,64	4,23	3,98
	70	8,18	86,7	8,19	3,99	
	76	4,32	86,5	4,32	4,24	
	82	2,42	85,9	2,42	3,45	
	88	1,43	84,3	1,43		
	94	0,91	81,4	0,92		
40%BA-60%FA	64	26,90	86,8	26,94	6,47	6,04
	70	12,70	87,3	12,71	6,20	
	76	6,59	87,0	6,60	6,47	
	82	3,52	86,7	3,52	5,02	
	88	2,07	85,5	2,07		
	94	1,29	83,1	1,30		

Tableau-A VI-18 Résultats DSR mix méthode 1
mélange avec ciment portland

Ciment Ordinaire Portland (OPC): première méthode de malaxage						
Mix	Température (°C)	G* (MPa)	δ (°)	G*/sin(δ) (MPa)	$G^*_{Mastic}/G^*_{Émulsion}$	Moyenne des ratios
85%BA-15%OPC	64	25,5	86,6	25,6	6,13	5,29
	70	11,2	87,5	11,2	5,46	
	76	5,4	88,0	5,4	5,35	
	82	2,9	88,2	2,9	4,20	
	88	1,6	88,0	1,6		
70%BA-30%OPC	64	20,2	86,7	20,2	4,86	4,30
	70	9,2	87,5	9,2	4,47	
	76	4,5	87,9	4,5	4,46	
	82	2,4	87,9	2,4	3,41	
	88	1,3	87,6	1,3		
55%BA-45%OPC	64	10,2	87,7	10,2	2,44	2,34
	70	5,0	88,1	5,0	2,45	
	76	2,58	88,3	2,58	2,54	
	82	1,35	88,0	1,35	1,93	
	88	0,80	87,2	0,80		
40%BA-60%OPC	64	2,54	87,0	2,55	0,61	0,84
	70	1,39	87,4	1,41	0,68	
	76	0,88	87,6	0,88	0,87	
	82	0,83	87,0	0,83	1,19	

Tableau-A VI-19 Résultats DSR mix méthode 2
mélange avec cendre volante

Cendre Volante (FA): deuxième méthode de malaxage						
Mix	Température (°C)	G* (MPa)	δ (°)	G*/sin(δ) (MPa)	$G^*_{Mastic}/G^*_{Émulsion}$	Moyenne des ratios
85%BA-15%FA	64	26,80	87,20	26,832	6,45	6,07
	70	13,10	87,80	13,110	6,39	
	76	6,64	88,20	6,647	6,53	
	82	3,44	88,20	3,442	4,91	
	88	1,94	87,70	1,942		
70%BA-30%FA	64	43,70	86,40	43,70	10,51	9,00
	70	19,30	87,30	19,30	9,41	
	76	9,40	87,90	9,40	9,24	
	82	4,80	88,20	4,80	6,85	
	88	2,23	88,10	2,23		
55%BA-45%FA	64	24,40	86,90	24,40	3.63	3,70
	70	10,80	87,80	10,80	3,89	
	76	5,21	88,30	5,21	4,03	
	82	2,68	88,50	2,68	3,25	
	88	1,46	88,50	1,46		
40%BA-60%FA	64	20,73	85,87	20,73	2,32	2,33
	70	9,66	86,47	9,66	2,32	
	76	4,76	86,60	4,76	2,51	
	82	2,55	86,13	2,55	2,14	
	88	1,51	84,83	1,51		

Tableau-A VI-20 Résultats DSR mix méthode 2
mélange avec ciment portland

Cendre Volante (OPC): deuxième méthode de malaxage						
Mix	Température (°C)	G* (MPa)	δ (°)	G*/sin(δ) (MPa)	$G^*_{Mastic}/G^*_{Émulsion}$	Moyenne des ratios
85%BA-15%OPC	64	27,40	86,90	27,440	6,59	5,83
	70	12,60	87,70	12,610	6,15	
	76	6,12	88,30	6,123	6,01	
	82	3,20	88,50	3,201	4,56	
	88	1,73	88,60	1,731		
70%BA-30%OPC	64	29,70	86,80	29,75	7,15	6,31
	70	13,50	87,60	13,51	6,59	
	76	6,75	88,10	6,75	6,63	
	82	3,43	88,40	3,43	4,89	
	88	1,93	88,40	1,93		
55%BA-45%OPC	64	32,40	86,70	32,45	7,80	6,78
	70	14,80	87,50	14,81	7,22	
	76	7,07	88,10	7,07	6,95	
	82	3,61	88,40	3,61	5,15	
	88	1,98	88,50	1,98		
40%BA-60%OPC	64	20,83	87,20	20,86	5,01	4,49
	70	9,58	87,90	9,59	4,67	
	76	4,80	88,30	4,80	4,71	
	82	2,50	88,50	2,50	3,57	
	88	1,41	88,57	1,41		

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AASHTO. (2010). *Determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)*. AASHTO T315-10. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2015). *Standard method of test for determination of asphalt binder resistance to ductile failure using Double-Edge-Notched Tension (DENT) test*. AASHTO TP113-15. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2016). *Standard specification for perfomance-graded asphalt binder*. AASHTO M320-16. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials.

Accolas, M. & Robrier, A. (2010). L'étude d'une émulsion: la mayonnaise. Repéré à http://tpe1ere-gastronomiemoleculaire.e-monsite.com/pages/etude-des-recettes/l-etude-d-une-emulsion-la-mayonnaise.html

Acott, S. M. (1980). The stabilisation of sand by a foamed bitumen: a laboratory and field performance study.

Adams, J. M. (2014). *Development of a Performance-Based Mix Design and Performance-Related Specification for Chip Seal Surface Treatments* (North Carolina State University, Raleigh, North Carolina).

AMCO. (2015). Propriétés physique des fluides. Repéré le 08 mars 2018 à http://www.amcotec.org/bibinfo.php

ASTM. (2004). *Standard test method for sweep test of bituminous emulsion surface treatment samples.* ASTM D7000-08 West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials.

ASTM. (2009a). *Standard pratice for identifying cationix emulsified asphalts*. ASTM D7402-09. West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials.

ASTM. (2009b). *Standard pratice for recovering residue from emulsified asphalt using low temperature evaporation technique*. ASTM D7497-09. West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials.

ASTM. (2011). *Standard test method for viscosity of emulsified asphalt by saybolt furol viscometer*. ASTM D7496-11 West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials.

ASTM. (2012). *Standard practice for effect of water on bituminous-coated aggregate using boiling water*. ASTM D3625-12 West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials.

ASTM. (2015). *Standard test methods for rheological properties of non-newtonian materials by rotationa viscometer*. ASTM D2196-15. West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials.

Ball, G. F. A., Patrick, J. E., & Herrington, P. R. (2005). *Factors affecting multiple chipseal layer instability*. Land Transport New Zealand.

Basu, S., Nandakumar, K., & Masliyah, J. H. (1998). Effect of NaCl and MIBC/kerosene on bitumen displacement by water on a glass surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *136*(1-2), 71-80.

Baumgardner, G. L. (2006). Asphalt emulsion Manufacturing Today and Tommorrow. *Transportation Research Circular, E-C102*, 16-25.

Biswas, P. P., sahis, M. K., Majumder, D., Seal, C., & Mandal, G. (2016). Characterization of Mastic Asphalt with Cold Mix. *International Journal Of Scientific & Engineering Research, 7*, 931-936.

Bowering, R. H. (1970). Bowering, R. H. "Upgrading marginal road-building materials with foamed bitumen. *Highway engineering in Australia*.

Bowering, R. H., & Martin, C. L. (1971). Foamed bitumen production and application of mixture evaluation and performance of pavements. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 45*, p. 453-477.

Brockus, A. C., & Hunter, O. K. (1996). *Chip-seal Design Using an Expert System* (Rapport nº No. FHWA/NY/SR-96/122).

Buss, A., Guriguis, M., Claypool, B., Gransberg, D., & Williams, C. (2016). *Chip seal design and specification: final report* (Rapport nº SPR 777). Washington, DC: États-Unis: Oregon Department of Transportation.

Carter, A., Gandi, A., & Singh, D. (2017). Rheological behavior of cold recycled asphalt materials with different contents of recycled asphalt pavements. *Innov. Infrastruct. Solut., 2:45*.

Chailleux, E., & Hammoum, F. (2014). La structure chimique des bitumes pétroliers. *L'actualité chimique, 385*(La journal de la Société Chimique de France), 2.

Corté, J.-F., & Benedetto, H. D. (2004). *Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants*. France: Lavoisier S.A.S.

David R. Jones, I. (1993). SHRP Materials Reference Library: Asphalt cements: A concise Data Compilation. *Strategic Highway Research Program, SHRP-A-645*.

Du, S. (2014). Interaction mechanism of cement and asphalt emulsion in asphalt emulsion mixtures. *Materials and Structures, 47*(7), 1149-1159.

Dupasquier, M. L., Nazari, A., Fontaine-Vive, F., Fernandez, X., & Golebiowski, J. (2016). Formulation cosmétique, les émulsions. Repéré le 24 janvier 2016 à http://ressources.unisciel.fr/formulation_cosmetique/co/formulations_1.html

Durand, G., Poirier, J.-e., Richard, F., & Lenfant, M. (2011). Formulation des émulsions: Influence des conditions de fabrication.

Eastoe, J. (2003). *Surfactant Chemistry*.

Emery, J. (2009). *Cold in-place asphalt recycling, full depth recycling and hot in-place recycling* presented at Summer Winter Integrated Field Technologies (SWIFT), ¸Niagara Falls, Canada.

Eurobitume. (2015). *The bitumen industry - A global perspective* (3e éd.). Lexington, KY: Asphalt Institute.

Farrar, M. J., Salmans, S. L., & Planche, J.-P. (2013). Recovery and Laboratory Testing of Asphalt Emulsion Residue: Application of the Simple Aging Test (SAT) and 4 mm DSR. *Transportation Research Board (TRB), 1*(2370), 69-75.

Fernades, M. R. S., Forte, M. M. C., & Leite, L. F. M. (2008). Rheological evaluation of polymer-modified asphalt binder. *Materials Research, 11*(3), 381-386.

Fond, C. (2016). IUT: Les produits noirs ou liants hydrocarbonés. Université de Stasbourg.

Furlong, S., James, A., Kalinowski, E., & Thompson, M. (1999). Water enclosed within the droplets of bitumen emulsions and it's relation to viscosity changes during storage. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 152*, 147-153.

Garilli, E., Autelitano, F., Godenzoni, C., Graziani, A., & Giuliani, F. (2016). Early age evolution of rheological properties of over-stabilized bitumen emulsion-cement pastes. *Constrution and building Materials, 125 (2016) 352-360*.

Ghimire, B. C. (2015). *Low temperature testing of Ontario hot mix asphalt and rheological testing of recovered binder* (Queen's University, Kingston, Ontario, Canada).

Ghomari, F., & Bendi-Ouis, A. (2008). Science des matériaux de construction: Analyse granulométrique. *Université Aboubekr Belkaid*, 16 p.

Gibson, N. (2005). Modified Asphalt Research Activities at FHWA's Turner-Fairbank Highway Research Center. In *Pavement Materials snd Construction Team, AMAP Conf*.

Gingras, J.-P., Tanguy, P. A., Mariotti, S., & Chaverot, P. (2005). Effect of process parameters on bitumen emulsions. *Chemical Engineering and Processing, 44*, 979-986.

Godenzoni, C., Graziani, A., & Corinaldesi, V. (2016). The Influence Mineral Additions on the Failure Properties of Bitumen Emulsion Mortars. Dans B. W. Chabot A., Dave E., Petit C., Tebaldi G. (Ed.), *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and debonding in Pavements* (Vol. 13). Dordrecht, Netherlands: Springer International Publishing.

Gransberg, D., & James, D. M. B. (2005). Chip seal best practice. *Transportation Reseach Board, 342*.

Grilli, A., Graziani, A., & Bocci, M. (2012). Compactability and thermal sensitivity of cement-bitumen-treated materials. *Road Materials and Pavement Design, 13*(4), 599-617. doi: 10.1080/14680629.2012.742624

Guery, J. (2006). *Émulsions doubles cristallisables: Stabilité, encapsulation et relargage* (Universté Paris 6, Paris, France).

Guissi, G. (2016). TCH025: Travaux de génie civil. École de Technologie Supérieure.

Gürer, C., Karasahin, M., Çetin, S., & Aktas, B. (2012). Effects of construction-related factors on chip seal performance. *Construction and Building Materials, 35*(1), 605-613.

Hincol. (2014). Hincol emulsion SS-1. Mumbai, India.

Hurley, G. C., & Prowell, B. D. (2005). Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt. *NCAT report*, *5*(6), 1-27.

Ilias, M. (2015). *Development of preformance - Related specification for fresh emulsions used for surface treatments and performance study of chip seal and microsurfacing* (Thèse doctotrale, North Carolina State University, Caroline du Nord, États-Uni).

Indian Roads Congrees. (2014). *Use of cold mix technology in construction and maintenance of roads using bitumen emulsion*. Standard IRC SP 100. Karma Koti Marg, New Delhi.

James, A. (2006). Phosphoric Acid in Emulsions. 2006 ISSA World Congress.

Johnston, J., & King, G. (2012). *Polymer Modified Asphalt Emulsions Composition, Uses, and Specifications for Surface Treatments* (Rapport nº FHWA-CFL/TD-12-004). Federal Highway Administration: National Center for Pavement Preservation.

Kearby, J. P. (1953). Tests and theories on penetration surfaces. *Highway Research Board Proceedings, 32*.

Kucharek, T. (2012). *Affinité bitume-granulat, additifs et techniques d'amélioration* présentée à Formation technique Bitume Québec, Montréal, Qc.

Lachance-Tremblay E., Carter A., Perraton D., (2012), *Hydrated lime and lime kiln dust as additives for CIR and FDR materials treated with asphalt emulsion and foamed asphalt*, 57th CTAA annual conference, Canadian Technical Asphalt Association, Vancouver, Canada

Lamothe, S. (2004). *Enrobé grenu: influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-orniérage* (Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure, Montréal, QC).

Lamothe, S. (2014). *Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-degel et mécaniques* (École de Technologie Supérieure, Montréal, QC).

Lancaster, J., McArthur, L., & Warwick, R. (1994). *VICROADS experience with foamed bitumen stabilisation* presented at 17th ARRB Conference, Gold Coast, Queensland.

Lane, B., Kazmierowski, T., & Alkins, A. E. (2008, September). *Sustainable Pavements – Environmental, Economic and Social Benefits of In-situ Pavement Recycling* presented at Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, Canada.

Law, K. Y. (2014). Definitions for hydrophilicity, hydrophobicity, and superhydrophobicity: getting the basics right.

Lebec, S. (2005a). *Les émulsions de bitume: caractérisitiques fondamentales et propriétés d'usage* présentée à Formation technique Bitume Québec, Montréal, Qc.

Lebec, S. (2005b). *Les émulsions de bitume: Généralités, composition et applcations* présentée à Formation technique Bitume Québec, Montréal, Qc.

LeBec, S. (2012). *Les émulsions de bitume: Formulation et fabrication selon leur usage* présentée à Formation technique Bitume Québec, Montréal, Qc.

LeBec, S. (2015). *Les émulsions de bitume: Généralités, composition et applications* présentée à Formation technique Bitume Québec, Montréal, Qc.

Lee, C. M. (2017). Seal coat and surface treatment manual. *Texas departement of transportation, Austin. Texas*.

Lee, D.-Y. (1964). *The effect of filler on asphalt cement mastics* (doctoral theisis, Iowa State University, Ames, United-States).

Lee, J., & Y, K. (2009). Performance-based uniformity coefficient of chip seal aggregate. *Transportation Reseach Board, 2108*, 53-60.

Little, N., D., Button, J. W., & Epps., J. A. (1983). Structural properties of laboratory mixtures containing foamed asphalt and marginal aggregates. *Transportation Research Record 911*, 104-113.

Lord, A., & Shuler, S. (2008). An Analysis of Two Leading Chip Seal Design Methods. *Fort Collins, Colorado: Colorado State University*.

Maccarrone, S., Holleran, G., Leonard, D. J., & Hey, S. (1994). Pavement Recycling using Foamed Bitumen. *17th ARRB Conference, 17*(Gold Coast, Queensland), pp 349-365.

MacNaughton, J., Landers, S., & Gunter, M. (2012). Development of a Sustainable Road Surfacing Policy for Provincial Highways in New Brunswick. *2012 conference and exhibition of the transportation association of canada-transportation: innovations and opportunities*.

McAsphalt. (2012). *Basic asphalt materials mixture design and testing*. Toronto: McAphalt industries limitied.

Marchal, J. L., Julien, P., & Boussad, N. (1993). Bitumen emulsion testing - towards a better understanding of emulsion behaviour. *Eurobitume Congress, 5th, 1993, Stockholm, Sweden, 1A*, 275-279.

McLeod, N. W. (1969). A general method of design for seal coats and surface treatments. *Transportation Research Board (TRB)*.

MILLER, J. E. (1987). Chip Sealing in New Brunswick. *Transportation Research Record (TRB)*, (1115).

MTMDET. (2018). *Bilan de l'état des chaussées du réseau routier supérieur québécois* (rapport de recherche nº ISBN: 978-2-550-81060-5) Repéré à https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/chaussees/Documents/bilan-chaussees.pdf

MTQ. (2008). *Traitements de surface*. Norme 4101, éd. 2008-12-15, Québec (Qc): Ministère des Transports du Québec, 3p.

MTQ. (2013). *Recueil des méthodes d'essai LC*, éd. 2013-12-15, Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec.

MTQ. (2016). *Bitumes*. Norme 4101, éd. 2017-12-15, Québec (Qc): Ministère des Transports du Québec, 8p.

MTQ. (2017). *Granulats*. Norme 2101, éd. 2017-12-15, Québec (Qc): Ministère des Transports du Québec, 5p.

Nadaf, M. B., & Mandal, J. N. (2013). Experimental studies and analyses for basic characterization of fly ash. Dans *Proceedings of 4th Global engineering - science and technology*. Dhaka, Bangladesh: BIAM Foundation.

Nagelm, H. a., & Al-Busaltan, S. (2013). Fast Curing Cold Mix Asphalt for Highways and Airfield Pavement. *Asphalt Ptofessional, 58*(4), 18-24.

Nassar, A., Al-Ani, M. K. M., & Thom, N. (2016). Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler. *Construction and Building Materials, 114*(2016), 352-363.

Nassar, A., & Thom, N. (2016, July). *Examining the effects of contributory factors on curing of cold bitumen emulsion mixtures* presented at 4th International Chinese European Workshop on Functional Pavement Design, Delft, Netherlands.

Needham, D. (1996). *Developments in bitumen emulsion mixture for roads* (Thèse doctoral, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom).

Nguyen, M. L. (2009). *Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux* (Université de Lyon, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon).

Nobel, A. (2000). *Bitumen emulsion* (Rapport n^{o} 3294).

Nobel, A. (2017). *Introduction to asphalt emulsions*.

Nosseti, A., Pérez-Jiménez, F., Martinez, A., & Miró, R. (2016). Effect of hydrated lime and cement on moisture damage of recycled mixture with foamed bitumen and emulsion. *Transportation Research Board (TRB), 95*(16-5430), 13p.

Perraton, D. (2013). CTN 404: science et technologie des matériaux. École de technologie supérieure.

Perraton, D., & Olard, F. (2013). *MGC-837: Les matériaux bitumineux: Formulation, fabrication et mise en place. École de Technologie Supérieure.*

Potter, J. L., & Church, M. (1976). *The design of sprayed single seals* présentée à Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 8th, 1976, Perth.

Redman, A. (2010). *Emulsion basics* présentée à Midwerstern pavement preservation partnership, Des Moines, Iowa, États-Uni.

Robati, M., Carter, A., & Perraton, D. (2015). New Conceptual Model for Filler Stiffening Effect on Asphalt Mastic of Microsurfacing. *Transportation Research Board (TRB), 27*(11), 51-62. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001264

Roberts, F. L., Engelbrecht, J. C., & Kennedy, T. W. (1984). Evaluation of recycled mixtures using foamed asphalt. In: Asphalt mixtures and performance. . *Transportation Research Record, 968*(Washington, DC: Transportation Research Board.), pp 78-85.

Ruckel, P. J., Acott, S. M., & Bowering, R. H. (1982). Foamed-Asphalt Paving Mixtures: Preparation of Design Mixes and Treatment of Test Specimens. *Transportation Research Record 911,* (TRB, National Research Council, Washington, D. C.), pp. 88-95.

SFERB. (1988). *Syndicat des Fabricants d'Émulsions Routières de Bitume: Les émulsions de bitume - généralité, application* (2 éd.). Lyon, France: Union des syncats de l'industrie routière française.

Shatinawi, S. R., & Kirk, J. V. (1993). Premature asphalt concrete pavement distress caused by moisture-induced damage. *Transportation Reseach Board, 1417*.

Shuler, S. (2013). *Perfomance of chip sealing using local and minimally processed aggregates for preservation of low traffic volume roadways* (Rapport nº CDOT-2013-7). Colorado Department of Transportation - Research: Colorado State University.

Shuler, S., & Lord, A. (2010). Two New Methods to Measure Aggregate Embedment on Chip Seals During Construction.

Sybilski, D., Vanelstraete, A., & Partl, M. N. (2004). Recommendation of RILEM TC 182-PEB on bending beam rheometer measurements of bituminous binders. *RILEM, 37*(182), 539-546.

TalonSebeq. (2014). Retraitement de type II [Présentation PowerPoint]. Repéré à http://www.talonsebeq.com/documentation/

TalonSebeq. (2013). Traitement de surface [Présentation PowerPoint]. Repéré à http://www.talonsebeq.com/documentation/

Tadros, T. (2013). *Emulsion formation and stability* (1 éd.). Weinheim, Allemagne: Wiley-VCH.

Tremblay, G. (2008). *Une stratégie d'intervention efficace pour l'amélioration de la qualité du réseau routier* présentée à Formation technique Bitume Québec, Montréal, Qc.

Towler, J., & Dawson, J. (2008). History of Chipsealing in New Zealand–Hanson to P/17. Dans *1st Sprayed Dealing Conference - cost effective high performance surfacings*. Adelaide, Australia.

Trudeau, S. (2003). *La sélection et les caractéristiques des liants d'accrochage* présentée à Bitume Québec, Montréal, Québec, Canada.

Trudeau, S. (2012). *Introduction aux bitumes* présentée à Formation Technique de Bitume Québec.

Trudeau, S. (2014). *Traitement de surface* présentée à Formation technique Bitume Quebec, Montréal, Canada.

Vega-Zamanillo, A., Calzada-Perez, M. A., & Castro-Fresno, D. (2011). Influence of surface macro-texture and binder dosage on the adhesion between bituminous pavement layers. *Construction and Building Materials, 28*(2012), 187-192.

Wang, Z., & Sha, A. (2010). Micro hardness of interface between cement asphalt emulsion mastics and aggregates. *Materials and Structures, 43*(4), 453-461. doi: 10.1617/s11527-009-9502-2

Wijk, v., Adriaan, & Wood, L. E. (1983). Use of Foamed Asphalt 1n Recycling of an Asphalt Pavement.

White, G. (2016, July). *The contribution of asphalt mastic to shear resistance.* presented at 3th Europhalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic.

Wood, T. J., Janish, D. W., & Gaillard, F. S. (2006). *Minnesota seal coat handbook 2006* (Rapport nº MN/RC-2006-34).

Zealand, T. N. (1981). *Measurement of texture by the sand circle method*. Norme TNZ T/3: 1981. N-Z: Transit New Zealand.

Zealand, T. N. (2005). *Chipsealing in New Zealand* (1ière éd.). Wellington, New Zealand.

Ziyani, L. (2016). *Étude des phénomènes physico-chimiques à l'interface émulsion de bitume/substrat minéral - Application à la formulation de Bétons Bitumineux à*

l'Émulsion (Thèse de doctorat, Université Nantes Angers Le Mans, Nantes, France). Repéré à http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01359295

%