

Influence des conditions de cure en laboratoire sur les
propriétés physiques et mécaniques des matériaux traités au
ciment et au bitume formulés avec de l'émulsion ou de la
mousse de bitume

par

Maher BEN YAHYA

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 2 AVRIL 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Maher Ben Yahya, 2025



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 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. Éric Lachance-Tremblay, directeur de la maîtrise
Professeur au département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Francis Marleau Donais, président du jury
Professeur au département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Perraton, membre du jury
Professeur associé au département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Kevin Bilodeau, membre du jury
Professeur associé au département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure et directeur recherche et développement du Groupe Bauval

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

LE 13 MARS 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, M. Éric Lachance-Tremblay, pour m'avoir offert l'opportunité de rejoindre son équipe et pour son accompagnement tout au long de ce parcours. Grâce à son encadrement et à son soutien, j'ai pu me familiariser avec les normes et les méthodes d'essais québécoises dans le domaine de l'ingénierie des chaussées, ce qui m'a permis de devenir le professionnel que je suis aujourd'hui. Je serai toujours reconnaissant pour cette opportunité. Je tiens également à remercier M. Sébastien Lamothe qui m'a appris les bases de la recherche scientifique, son expérience, ses conseils et son expertise ont contribué de manière significative à la réalisation de ce travail.

Un grand merci aux professeurs Francis Marleau Donais, Daniel Perraton et Kevin Bilodeau pour avoir accepté de faire partie de mon jury et pour le temps précieux consacré à l'évaluation de la qualité de mon travail.

Je tiens également à remercier l'équipe technique, sans qui les résultats présentés dans ce mémoire n'auraient pu voir le jour. Messieurs Juan-Mauricio Rios et Richard Prowt, votre aide cruciale, votre patience et votre gentillesse à chaque étape de ma maîtrise ont été inestimables. J'adresse une reconnaissance particulière à M. Sylvain Bibeau, pour son soutien indéfectible dans la fabrication de mes éprouvettes, toujours avec une bonne humeur communicative et une ingéniosité exemplaire. Merci également à M. Francis Bilodeau, pour son enthousiasme et sa précision dans la réalisation de mes essais.

Je n'oublierai jamais mes collègues, qui ont contribué à rendre cette expérience mémorable par leur bonne humeur et les moments partagés. Merci à Maicon, Marc-André, Alejandro, Carla, Mouhamadou, Théophile, Ali et Alexy, pour les beaux souvenirs.

Je tiens également à exprimer ma gratitude au Groupe Conseil SCT, à Bitume Québec et à la Ville de Prévost, pour leur soutien financier, qui a rendu cette recherche possible.

VIII

Enfin, je remercie du fond du cœur ma famille, qui a toujours été là pour m'aider et m'encourager dans toutes mes démarches. Votre soutien constant m'a porté tout au long de ce parcours.

Influence des conditions de cure en laboratoire sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux traités au ciment et au bitume formulés avec de l'émulsion ou de la mousse de bitume

Maher BEN YAHYA

RÉSUMÉ

Le retraitement en place est une technique de réhabilitation des chaussées bitumineuses qui offre des avantages techniques, économiques et environnementaux, notamment lors de l'ajout des liants hydrauliques et/ou bitumineux. Cette approche permet de réutiliser l'ensemble des matériaux existants in situ, sans chauffage, réduisant ainsi les coûts, les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation de ressources naturelles, tout en augmentant la capacité portante et la durabilité des infrastructures routières. L'ajout de liants (le procédé de retraitement) confère aux matériaux recyclés un comportement évolutif au cours du temps, qui est fonction de la vitesse de mûrissement de ces liants. À son tour, ce mûrissement va dépendre des conditions environnementales (ou de la cure), qui vont avoir un effet déterminant sur la performance à long terme des chaussées réhabilitées.

Cependant, au Québec, les méthodes actuelles de cure en laboratoire ne tiennent pas compte des conditions climatiques et des caractéristiques spécifiques des couches de matériaux recyclés et retraités. De plus, il existe peu de recherches comparant l'effet de l'émulsion de bitume et de la mousse de bitume sur les propriétés des matériaux recyclés et retraités. Ces lacunes limitent le potentiel d'adoption de cette technique et rendent nécessaire le développement d'une méthodologie adaptée pour mieux caractériser ces matériaux formulés en laboratoire et notamment, de mieux reproduire les conditions in situ.

Dans ce contexte, un programme expérimental a été élaboré pour évaluer l'effet des conditions de cure sur les propriétés évolutives des matériaux traités au ciment et au bitume (MTCB). Ces matériaux ont été fabriqués en laboratoire avec de l'émulsion ou de la mousse de bitume, tout en conservant une composition volumétrique identique afin de garantir une comparaison juste. Trois régimes de cure, simulant des combinaisons de température et d'humidité relative représentatives du climat et des pratiques de l'industrie québécoise, ont été étudiés sur une période de 28 jours. Une cure étendue, jusqu'à 90-100 jours, a également été réalisée pour analyser les propriétés à long terme des MTCB.

Les résultats ont montré qu'une cure à haute température et faible humidité relative accélère la perte d'eau et favorise un développement rapide des propriétés mécaniques, tandis qu'une cure sous forte humidité ralentit ce processus. Une variation cyclique entre une humidité ambiante ($\approx 30\%$) et une humidité élevée ($\approx 100\%$) ralentit l'évolution des propriétés à court terme, mais permet une progression continue à long terme. En ce qui concerne le choix des liants, les matériaux formulés avec la mousse de bitume ont présenté des propriétés mécaniques légèrement supérieures à court terme. Toutefois, ces différences s'atténuent après 28 jours. Par ailleurs, les matériaux à la mousse de bitume se sont révélés moins sensibles aux variations d'humidité relative.

Les résultats de ce mémoire offrent de nouvelles perspectives pour optimiser les pratiques de réhabilitation des chaussées au Québec. En proposant une méthodologie expérimentale adaptée aux conditions climatiques locales, cette recherche fournit des données utiles aux concepteurs, notamment sur le comportement à long terme des couches de matériaux recyclés et sur l'influence des variations climatiques en chantier sur leurs propriétés.

Mots-clés : Retraitement en place, matériaux traités au ciment et bitume, émulsion de bitume, Mousse de bitume, ciment, cure, rigidité

Influence of laboratory curing conditions on the physical and mechanical properties of cement and bitumen treated materials mixed with bitumen emulsion or foamed bitumen

Maher BEN YAHYA

ABSTRACT

Full-depth reclamation (FDR) is an asphalt pavement rehabilitation technique that offers significant technical, economic, and environmental advantages, particularly when hydraulic and/or bituminous binders are added. This approach allows the reuse of all existing materials in situ, without heating, thereby reducing costs, greenhouse gas emissions (GHG), and the consumption of natural resources, while enhancing the load-bearing capacity and durability of road infrastructures. The addition of binders (stabilization process) modifies the behavior of recycled materials over time, a process influenced by the curing rate of these binders. In turn, curing depends on environmental conditions, which play a crucial role in the long-term performance of rehabilitated pavements..

However, in Quebec, current laboratory curing methods do not adequately account for climatic conditions and the specific characteristics of recycled pavement layers. Additionally, few studies have compared the effect of bitumen emulsion and foamed bitumen on the properties of stabilized recycled materials. These gaps limit the potential adoption of this technique and highlight the need for an adequate methodology to better characterize laboratory mixtures and improve the simulation of in situ conditions.

In this context, an experimental program was developed to evaluate the effect of curing conditions on the evolving properties of cement-bitumen treated materials (CBTM). These materials were produced in the laboratory using either bitumen emulsion or foamed bitumen while maintaining an identical volumetric composition to ensure a fair comparison. Three curing regimes simulating combinations of temperature and relative humidity representative of Quebec's climate and industry practices were studied over 28 days. An extended curing, up to 90-100 days, period was also conducted to analyze the long-term properties of CBTM.

The results showed that curing at high temperature and low relative humidity accelerates water loss and promotes rapid mechanical development, while curing under high humidity slows this process. A cyclic variation between ambient ($\approx 30\%$) and high ($\approx 100\%$) humidity slows short-term property development but enables continuous long-term progression. Regarding binder selection, materials produced with foamed bitumen demonstrated superior mechanical properties in the short-term. However, these differences disappeared after 28 days. Furthermore, the materials with foamed bitumen proved to be less sensitive to variations in relative humidity.

The findings of this study offer new perspectives for optimizing pavement rehabilitation practices in Quebec. By proposing an experimental methodology adapted to local climatic conditions, this research provides valuable data for designers, particularly regarding the long-

term behavior of recycled material layers and the influence of climatic variations on their properties on field.

Keywords: Full-depth reclamation, cement-bitumen treated materials, bitumen emulsion, foamed bitumen, cement, curing, stiffness

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Définition d'une structure de chaussée bitumineuse	5
1.1.1 Enrobés bitumineux utilisés au Québec	5
1.1.2 Matériaux utilisés dans les fondations de chaussée au Québec	6
1.2 Dégradations dans les chaussées bitumineuses	7
1.3 Entretien et réhabilitation des chaussées au Québec	8
1.3.1 Retraitement en place	9
1.4 Description de la technique de retraitement en place type II	11
1.4.1 Étapes d'un chantier de retraitement en place type II	12
1.5 Matériaux recyclés à froids	13
1.5.1 Liants employés dans la formulation des matériaux recyclés à froids ..	14
1.5.1.1 Liants hydrauliques	14
1.5.1.2 Liants bitumineux	15
1.6 Matériaux traités au ciment et au bitume : Formulation et caractérisation	19
1.6.1 Méthodes de formulation en laboratoire des MTCB	19
1.6.1.1 Méthode Marshall	19
1.6.1.2 Méthode volumétrique : Presse cisaillement giratoire	20
1.6.1.3 Revue des pratiques et des équipements de formulation	24
1.6.2 Effet de différents composants sur les propriétés mécaniques des MTCB	26
1.6.2.1 Effet de la granulométrie et des GBR	27
1.6.2.2 Effet du ciment Portland	29
1.6.2.3 Effet du bitume	30
1.7 Cure des MTCB	34
1.7.1 Cure en laboratoire	35
1.7.1.1 Méthodes de cure	36
1.7.2 Évaluation du régime de cure en laboratoire	40
1.7.2.1 Évaluation des propriétés physiques	40
1.7.2.2 Évaluation des propriétés mécaniques	41
CHAPITRE 2 PROBLEMATIQUE, OBJECTIFS DE RECHERCHE ET STRUCTURE DU MEMOIRE	47
2.1 Problématique de recherche	47
2.2 Objectifs de la recherche	48
2.2 Structure du mémoire	49
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS DE FORMULATION	51
3.1 Méthodologie et programme expérimental	51

3.1.1	Caractérisation des matières premières (Étape 1).....	52
3.1.2	Étude volumétrique (Étape 2)	54
3.1.2.1	Principe et méthode.....	54
3.1.2.2	Résultats des essais de formulation.....	56
3.1.3	Préparation des éprouvettes (Étape 3).....	58
3.1.3.1	Éprouvettes à l'émulsion.....	58
3.1.3.2	Éprouvettes à la mousse.....	59
3.1.4	Cure des éprouvettes (Étape 4)	62
3.1.5	Caractérisation des propriétés physiques et mécaniques (Étape 5)	62
3.1.6	Cure à long terme sous différentes températures et HR (Étape 6).....	64
3.2	Récapitulation des choix méthodologiques	66

CHAPITRE 4 EFFECT OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY ON CEMENT-BITUMEN TREATED MATERIALS PRODUCED IN THE LABORATORY USING BITUMEN EMULSION OR FOAMED BITUMEN 69

4.1	Abstract.....	69
4.2	Introduction.....	70
4.3	Literature review.....	71
4.3.1	Volumetric properties of CBTM.....	73
4.4	Experimental program	76
4.4.1	Objective and Methodology.....	76
4.4.2	Laboratory curing regimes and conditions	77
4.4.3	Materials	79
4.4.4	Mix design and sample preparation	81
4.4.5	Water loss monitoring and mechanical testing program.....	82
4.4.5.1	Indirect tensile strength (ITS)	83
4.4.5.2	Indirect tensile stiffness modulus (ITSM)	83
4.5	Results and analysis	84
4.5.1	Recorded temperature and relative humidity	84
4.5.2	Water loss monitoring from 1 to 28 days.....	85
4.5.3	Indirect Tensile Strength results from 1 to 28 days	87
4.5.4	Indirect Tensile Stiffness Modulus results.....	88
4.5.4.1	Curing time: 1 to 28 days.....	88
4.5.4.2	Curing time: 28 to 90 days.....	90
4.5.5	Correlation between ITS and ITSM results from 1 to 28 days	92
4.5.6	Influence of curing time on ITS and ITSM values	93
4.6	Conclusion	97

CHAPITRE 5 SOMMAIRE DES RÉSULTATS PUBLIÉS ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS NON PUBLIÉS 99

5.1	Sommaire des conclusions de l'article	99
5.2	Cure à long terme pour les matériaux formulés à la mousse de bitume	101
5.2.1	Cure sous le régime à haute température	101

5.2.2	Cure à long terme après les régimes en deux étapes et à humidité cyclique	104
CONCLUSION		107
RECOMMANDATIONS		111
ANNEXE I	DÉTAILS DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS	113
ANNEXE II	DÉTAILS DES ESSAIS DE DENSITÉ ET D'ABSORPTION	115
ANNEXE III	FICHE TECHNIQUE DE L'ÉMULSION DE BITUME EMPLOYÉE	117
ANNEXE IV	FICHE TECHNIQUE DU BITUME EMPLOYÉ POUR LA FABRICATION DE LA MOUSSE.....	119
ANNEXE V	FICHE TECHNIQUE DU CIMENT EMPLOYÉ	121
ANNEXE VI	CARACTÉRISTIQUES DE FORMULATION ET DE FABRICATION DES ÉPROUVETTES	123
ANNEXE VII	DÉTAILS DES MESURES DE LA PERTE D'EAU DES ÉPROUVETTES.....	125
ANNEXE VIII	DÉTAILS DES MESURES DES ESSAIS DE TRACTION INDIRECTE (ITS).....	131
ANNEXE IX	DÉTAILS DES MESURES DES ESSAIS DU MODULE DE RIGIDITÉ EN TRACTION INDIRECTE (ITSM)	133
BIBLIOGRAPHIE		135

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Exigences particulières pour les matériaux recyclés de la NQ 2560-600... 7
Tableau 1.2	Avantages et inconvénients du retraitement en place type II 12
Tableau 1.3	V_m et VFL observées lors de la formulation des MTCB 24
Tableau 1.4	Méthodes de formulation employées par divers organismes 24
Tableau 1.5	Étapes et condition de malaxage des MTCB 26
Tableau 1.6	Comparaison entre l'émulsion et la mousse de bitume dans la formulation des MTCB 33
Tableau 3.1	Propriétés des composants utilisés et normes des essais 53
Tableau 3.2	Granulométrie du combiné et fuseau granulométrique pour les travaux de retraitement en place 53
Tableau 3.3	Résultats des essais de formulation à différentes teneurs en eau 57
Tableau 3.4	Conditions de cure à long terme pour les matériaux formulés à l'émulsion 64
Tableau 3.5	Conditions de cure à long terme pour les matériaux formulés à la mousse après les régimes 2É et HRC 66
Tableau 4.1	Properties of CBTM components 80
Tableau 4.2	Grading distribution of aggregates and blend, and required grading specifications 81
Tableau 4.3	Extended curing conditions for emulsion mixtures 90
Tableau 4.4	One-way ANOVA results for ITS and ITSM values from 1 to 28 days for each mixture (significance level = 0.05) 94
Tableau 4.5	Pairwise Comparisons for ITS and ITSM values from 1 to 28 days (adjusted significance level = 0.017) 95
Tableau 4.6	One-way ANOVA results for extended HT-ITSM values (significance level = 0.05) 97

XVIII

Tableau 5.1	Résultats de l'analyse de variance à un facteur pour le temps de cure prolongé sous le régime HT pour les matériaux à la mousse de bitume (niveau de signification = 0,05) 103
Tableau 5.2	Résultats des tests-t indépendants comparant les valeurs ITSM des matériaux : mousse vs émulsion pour chaque jour de cure (niveau de signification = 0,05). 103

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Structure type de chaussée bitumineuse 5
Figure 1.2	Différentes techniques d'entretien et de réhabilitation des chaussées utilisées actuellement au Québec 9
Figure 1.3	Principe de retraitement en place type I (Recyclage à froid)..... 10
Figure 1.4	Principe de retraitement en place type II (Décohésionnement / Retraitement)..... 11
Figure 1.5	Les différentes compositions des matériaux recyclés à froid 14
Figure 1.6	Fabrication et mise en œuvre de l'émulsion de bitume : 1) Formul-ation; 2) Malaxage; 3) Émulsification; 4) Transport; 5) Rupture; 6) Cure 17
Figure 1.7	Processus de fabrication de la mousse de bitume 18
Figure 1.8	Composition des MTCB à l'état initial (frais) : (a) composition par masse; (b) composition par volume 22
Figure 1.9	Effet de la cure sur les propriétés physiques et mécaniques des MTCB 35
Figure 1.10	Évolution de la rigidité en fonction de la température et de la durée de la cure 37
Figure 1.11	Mesure de la masse de l'éprouvette sur une balance numérique. 40
Figure 1.12	Suivi de l'évolution de la teneur en eau durant la cure 41
Figure 1.13	Essai ITS 42
Figure 1.14	Principe de l'essai ITSM : (a) Appareillage d'essai; (b) Forme de l'impulsion de chargement 44
Figure 3.1	Programme expérimental 51
Figure 3.2	Étapes de formulation et de compactage des éprouvettes : (1) Composition granulaire; (2) Composition granulaire à l'état SSS; (3) Granulats après 12 heures au minimum; (4) Ajout de ciment et d'eau restante; (5) Premier malaxage; (6) Ajout de l'émulsion;

	(7) Deuxième malaxage; (8) Introduction de 4,5 kg de matériau dans le moule de la PCG; (9) Éprouvette après compaction	56
Figure 3.3	Évolution des V_m et des VFL durant le compactage pour chaque teneur en eau totale	57
Figure 3.4	Éprouvettes formulés avec l'émulsion de bitume : (1) Cure préliminaire dans le moule; (2) Démoulage de l'éprouvette avant la cure	59
Figure 3.5	Équipements utilisés et procédure de fabrication des éprouvettes à la mousse de bitume : (1) Machine à moussage Wirtgen WLB10; (2) Malaxeur de type Pug-Mill; (3) Matériau à l'état lâche; (4) Stockage du matériau dans un sac plastique; (5) Démoulage de l'éprouvette avant la cure	61
Figure 4.1	Volumetric composition of CBTM.....	75
Figure 4.2	Overview of the methodology of the study.....	77
Figure 4.3	Chart plan of target temperatures and relative humidity for the: a) HT regime; b) 2S regime; c) CRH regime.....	78
Figure 4.4	Recording of temperature and relative humidity for 28 days: a) HT curing regime (daily average values); b) 2S curing regime (daily average values); c) CRH curing regime (recorded values per hour).....	85
Figure 4.5	Evolution of water loss for emulsion and foam mixtures according to the studied curing regimes ($n = 3$)	86
Figure 4.6	Evolution of ITS for emulsion and foam mixtures according to the 3 curing regimes from 1 to 28 days ($n = 3$).....	87
Figure 4.7	Evolution of ITSM for emulsion and foam mixtures according to the 3 curing regimes from 1 to 28 days ($n = 3$).....	89
Figure 4.8	Extended curing results of ITSM for emulsion mixtures ($n = 3$).....	91
Figure 4.9	Correlation between ITSM and ITS according to the studied curing regimes for emulsion and foam mixtures.....	93
Figure 5.1	Résultats de la cure à long terme sous le régime HT pour les deux liants	102
Figure 5.2	Évolution de l'ITSM à 23°C après cure à long terme sous les régimes 2É et HRC pour les matériaux formulés à la mousse de bitume	105

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2É	Régime de cure en deux étapes (<i>two-step curing regime</i> , 2S)
2S	<i>Two-step curing regime</i> (régime de cure en deux étapes, 2É)
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABS	Absorption
AFNOR	Association française de normalisation
ANOVA	<i>Analysis Of Variance</i> (analyse de variance)
ARRA	<i>Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BC	Béton concassé
BE	<i>Bitumen emulsion</i> (émulsion de bitume)
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
C	<i>Cement</i> (ciment)
CBTM	<i>Cement-Bitumen Treated Materials</i> (matériaux traités au ciment et au bitume, MTCB)
CR	Criblure
CRH	<i>Cyclic relative humidity curing regime</i> (régime de cure à humidité relative cyclique, HRC)
CRM	<i>Cold Recycled Material</i> (matériau recyclé à froid)
CSA	<i>Canadian Standard Association</i>
CSS	<i>Cationic Slow-Setting</i> (cationique à rupture lente)
DV	Demi-Vie
EB	Enrobé bitumineux
ÉTS	École de technologie supérieure
FB	<i>Foamed Bitumen</i> (bitume moussé)

FDR	<i>Full-depth reclamation</i>
GBR	Granulats bitumineux recyclés (<i>Reclaimed Asphalt Pavement, RAP</i>)
GES	Gaz à effet de serre (<i>Greenhouse Gas, GHG</i>)
GN	Granulats naturels
GNM	Grosseur nominale maximale
GU	<i>General Use</i> (usage général)
HR	Humidité relative (<i>relative humidity, RH</i>)
HRC	Régime de cure à humidité relative cyclique (<i>cyclic relative humidity curing regime, CRH</i>)
HT	<i>High temperature curing regime</i> (régime de cure à haute température, HT)
ITS	<i>Indirect Tensile Strength</i> (résistance à la traction indirecte)
ITSM	<i>Indirect Tensile Stiffness Modulus</i> (module de rigidité en traction indirecte)
LC	Laboratoire des chaussées
LCA	<i>Life-Cycle Assessment</i> (analyse du cycle de vie, ACV)
MR	Matériaux recyclés
MTB	Matériaux traités au bitume
MTC	Matériaux traités au ciment
MTCB	Matériaux traités au ciment et au bitume (<i>Cement-Bitumen Treated Materials, CBTM</i>)
MTMD	Ministère des transports et de la mobilité durable
MTS	<i>Material Testing System</i>
OMC	<i>Optimum Moisture Content</i> (teneur en eau optimale)
PCG	Presse à cisaillement giratoire (<i>Shear (or Superpave) Gyratory Compactor, SGC</i>)

PG	<i>Performance grade</i> (grade de performance)
PPRA	<i>Pavement Preservation and Recycling Alliance</i>
RE	Ratio d'Expansion
SGC	<i>Shear (or Superpave) Gyratory Compactor</i> (presse à cisaillement giratoire, PCG)
SSS	Saturé superficiellement sec (<i>Saturated Surface Dried, SSD</i>)
VA	<i>Virgin Aggregate</i> (granulat vierge)
VFL	<i>Voids filled with liquids</i> (vides remplis de liquides)
V _m	<i>Voids content of mix</i> (teneur en vides du mélange)
VMA	<i>Voids of the mineral aggregate</i> (vides dans l'agrégat minéral)
W _{ABS}	<i>Water absorption of the aggregate blend</i> (teneur en eau correspondante à l'absorption des granulats)
W _{ADD}	<i>Additional water</i> (eau additionnelle)
W _{EM}	<i>Water from the emulsion</i> (eau provenant de l'émulsion)
W _{TOT}	<i>Total water content</i> (eau totale)
WL	<i>Water loss</i> (perte en eau)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
°	Degré
°C	Degré Celsius
ρ_{sss}	Masse volumique des granulats à l'état saturé superficiellement sec
g	Gramme
h	Heure
j	Jour
kg	Kilogramme
kPa	Kilopascal
kN	Kilo Newton
ν	Coefficient de Poisson
m	Mètre
mm	Millimètre
ms	Milliseconde
MPa	Méga pascal
N	Newton
S	Seconde
T	Temps
w%	Teneur en eau (<i>water content</i>)

INTRODUCTION

La construction routière continue d'augmenter dans le monde en raison de la croissance démographique et de la nécessité de garantir l'accès des populations aux services essentiels (Global Platform for Sustainable Cities, 2020). Cependant, au cours du temps, les chaussées subissent inévitablement des dégradations causées par divers facteurs tels que les conditions climatiques variables, un drainage inadéquat et le trafic des poids lourds (Laboratoire des chaussées, 1998). Selon un rapport publié en 2019, 16,4 % du réseau routier municipal canadien était classé en mauvais ou très mauvais état, représentant 146 255 km (BluePlan Engineering, 2019). Ces dégradations affectent la sécurité et le confort des usagers, soulignant l'importance de l'entretien et de la réhabilitation des chaussées. De plus, l'augmentation de la construction routière entraîne également une hausse des émissions de gaz à effet de serre (GES), contribuant ainsi au réchauffement climatique (Jain et al., 2021). Il est donc essentiel que les techniques de réhabilitation permettent non seulement de construire des routes durables, mais aussi de le faire de manière écologique.

Le retraitement en place de type II, également appelé décohéssionnement/retraitement, est une technique de réhabilitation des chaussées bitumineuses fortement dégradées (Bitume Québec, 2020b). Elle consiste à décohéssionner l'ensemble de la couche d'enrobé dégradée ainsi qu'une partie de la couche sous-jacente, ce qui permet de créer une fondation homogène et renforcée. Cette technique peut être appliquée sur des profondeurs allant jusqu'à 300 mm, sans recours au chauffage (ARRA, 2015). Selon les besoins, elle peut être réalisée par simple décohéssionnement in situ, suivie de malaxage, nivellement et compactage, avec l'eau comme unique ajout, ou en incorporant des granulats et/ou des liants hydrauliques ou bitumineux pour améliorer la qualité de la fondation retraitée (ARRA, 2015; Morian et al., 2012).

Cette technique présente un avantage significatif du point de vue structural, augmentant la capacité portante de la chaussée tout en prolongeant sa durée de vie. De plus, avec l'ajout d'une couche de roulement en enrobé, la durée de vie de la chaussée peut atteindre 20 ans, soit l'équivalent de celle d'une reconstruction complète (Bitume Québec, 2020b). Du point de vue

environnemental, elle offre des avantages considérables, car les matériaux sont traités sur place, ce qui contribue à la préservation des ressources naturelles, à la réduction de la consommation énergétique, à la minimisation du transport et à la diminution des déchets mis en décharge (Bitume Québec, 2014b).

Le comportement mécanique des matériaux traités dépend des teneurs en liants employées dans la formulation, à partir de laquelle une large gamme de matériaux peut être produite. Parmi eux figurent les matériaux traités au ciment et au bitume (MTCB ou *CBTM* en anglais). Ces matériaux sont obtenus en utilisant entre 1 % et 3 % de liant bitumineux, ce qui leur donne un comportement plus flexible et moins fragile. L'ajout de 1 % à 3 % de ciment, quant à lui, permet de diminuer la teneur en eau tout en augmentant la résistance à la fissuration à jeune âge sous le trafic des poids lourds (Asphalt Academy, 2020; Godenzoni et al., 2018; Raschia, 2020). Les liants bitumineux souvent employés dans la formulation des matériaux décohesionnés sont ou bien de l'émulsion de bitume ou de la mousse de bitume (ARRA, 2015; Asphalt Academy, 2020; Wirtgen, 2012) .

Les MTCB se caractérisent par un comportement évolutif au cours du temps en raison des variations de leur teneur en eau, résultant de l'évaporation, de la rupture de l'émulsion et de l'hydratation du ciment (Mignini et al., 2021). Initialement, la teneur en eau correspond à celle choisie lors du compactage, que ce soit en chantier ou en laboratoire. Avec le temps, cette teneur évolue à des vitesses variables en fonction des conditions environnementales, du drainage et de la formulation employée (ARRA, 2015). Ce processus, connu sous le nom de la cure, permet le développement des propriétés mécaniques du matériau et peut durer de quelques jours à deux semaines, selon les conditions mentionnées (Godenzoni, 2017).

Actuellement, les méthodes de contrôle de la qualité ne sont pas adaptées aux travaux de retraitement en place, notamment en ce qui concerne la cure des matériaux, que ce soit sur le terrain ou en laboratoire (Xiao et al., 2018). En effet, les spécifications de construction actuelles reposent sur des recommandations empiriques basées sur le temps et, parfois, la température, sans prendre pleinement en compte les conditions réelles de cure sur le terrain ni la composition

de la couche de matériaux recyclés (Ogbo, 2022) . Une procédure de cure en laboratoire devrait considérer les phénomènes liés à la composition du matériau, définir la forme, les dimensions et les conditions limites des éprouvettes, et contrôler la température et l'humidité relative pour simuler au mieux la cure sur le terrain (Cardone et al., 2015).

Bien que des liants bitumineux tels que l'émulsion de bitume et la mousse de bitume soient couramment utilisés dans la technique de retraitement en place, il existe un manque d'études comparant directement leur comportement de cure dans des conditions identiques (Goli et al., 2023). Les propriétés mécaniques évolutives des MTCB, telles que la résistance à la traction et la rigidité, sont fortement influencées par le type de liant utilisé dans la formulation du matériau. De plus, les études antérieures se sont principalement concentrées sur des conditions fixes de température ou d'humidité pour simuler la cure sur le terrain, et rares sont celles ayant exploré l'effet combiné de ces facteurs. Dans ce contexte, cette étude vise à comparer trois régimes de cure en laboratoire appliqués à des MTCB, formulés soit avec de l'émulsion de bitume, soit avec de la mousse de bitume, et caractérisés par la même composition volumétrique. Les régimes de cure ainsi que la formulation ont été sélectionnés en fonction des pratiques de l'industrie et du climat québécois, fournissant ainsi des conclusions pratiques pour les applications sur le terrain.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Définition d'une structure de chaussée bitumineuse

Une structure de chaussée bitumineuse est constituée d'une ou plusieurs couches d'enrobé bitumineux assurant un roulement sécurisé et reposant sur diverses couches de matériaux granulaires utilisées, notamment, pour assurer un drainage adéquat. Ces couches de chaussée ont pour rôle d'assurer la protection des sols d'infrastructure contre les effets du trafic, notamment la répartition des charges des poids lourds sur le sol support, ainsi que de limiter les effets du gel en limitant la pénétration du gel. Cette mesure est particulièrement importante au Québec, où une grande partie des sols est sensible aux effets du gel (Lachance-Tremblay, 2023). La Figure 1.1 présente une coupe transversale d'une structure bitumineuse de chaussée.

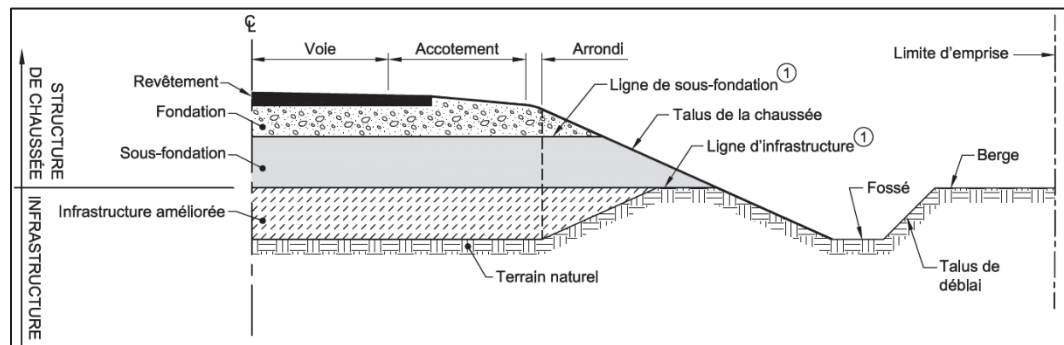


Figure 1.1 Structure type de chaussée bitumineuse
Adaptée de MTMD (2020)

1.1.1 Enrobés bitumineux utilisés au Québec

Les enrobés bitumineux (EB) (utilisés pour le revêtement des chaussées bitumineuses), sont produits selon la méthode du Laboratoire des Chaussées (LC) du Ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) et leur nom précise à la fois, le squelette granulaire ainsi que la grosseur nominale maximale (GNM) en mm, c'est-à-dire au moins 90 % des granulats ont un diamètre $\leq N$ (Exemple : ESG-10 : ESG : enrobé semi-grenu, 10 : 10 mm) (Lachance-Tremblay, 2023).

Pour le bitume (liant hydrocarboné utilisé dans les EB : enrobés bitumineux), son grade est choisi en fonction de la localisation de la route et du trafic envisagé, selon la norme 4202 (MTMD, 2023a).

Au Québec, les EB peuvent contenir des matériaux recyclés tels que les granulats de bitume recyclés (GBR), le bardeau d'asphalte post-fabrication (BPF) et le bardeau d'asphalte post-consommation (BPC), ou une combinaison de ces matériaux recyclés. Toutefois, selon la norme actuelle, l'usage de ces matériaux est limité à 20 % de la masse des granulats (MTMD, 2023b).

1.1.2 Matériaux utilisés dans les fondations de chaussée au Québec

Au Québec, les fondations des chaussées bitumineuses sont construites avec des matériaux granulaires, qui sont des matériaux d'origine minérale et sans cohésion. Ces matériaux granulaires sont composés d'un ensemble de particules dont les dimensions varient de 0 mm à 125 mm. Les granulats fins ont une taille allant de 0 à 5 mm, tandis que les gros granulats ont des dimensions comprises entre 5 et 125 mm (BNQ, 2014) .

Les matériaux granulaires sont désignés par l'abréviation "MG" suivie d'un nombre "X" qui représente la dimension nominale en mm des mailles carrées du premier tamis de la série sur lequel on pourrait observer des particules retenues (BNQ, 2014). Il est également possible d'utiliser des matériaux recyclés dans la construction des fondations de chaussées. Ces matériaux recyclés sont classés selon la norme BNQ 2560-600, en fonction du pourcentage de leurs constituants tels que les résidus d'enrobés bitumineux (EB) (provenant du planage), les résidus de béton (BC) et les granulats naturels (GN).

Les matériaux recyclés sont désignés par les lettres "MR" suivies d'un chiffre de 1 à 7, qui indique la plage de proportion possible de chacun de leurs constituants. Tous les matériaux

recyclés doivent répondre aux exigences du Tableau 1.1 et le diamètre maximal des particules ne doit pas dépasser 125mm (BNQ, 2002).

Tableau 1.1 Exigences particulières pour les matériaux recyclés de la NQ 2560-600
Tiré de BNQ (2002)

Catégorie des matériau recyclé	MR-1	MR-2	MR-3	MR-4	MR-5	MR-6	MR-7	Méthode d'essai
Constituants	(Pourcentage en masse de constituants)							
Résidus de Béton (BC), %	≤ 50	> 50	≤ 30	> 30	< 65	< 50	< 15	LC 21-901
Résidus d'enrobés (EB), %	≤ 15	≤ 15	>15 et ≤ 35	> 15 et ≤ 35	> 35 et ≤ 50	> 50 et ≤ 80	> 85	LC 21-901
Granulats naturels (GN), %	≥ 35	< 50	> 35 et < 85	< 55	< 65	< 50	< 15	LC 21-901
	Remblai, transition, couche anticontaminante, couche filtrante, coussin et enrobement de conduite, fondation, sous-fondation, couche de roulement granulaire et accotement*					Remblai et accotement*		
* Les utilisations identifiées sont données à titre informatif. Il est recommandé de se référer à des documents techniques reconnus pour faire le choix d'un matériau, car l'utilisation de matériaux recyclés peut impliquer certaines modifications dans la conception des ouvrages.								

1.2 Dégradations dans les chaussées bitumineuses

Les dégradations des chaussées bitumineuses sont principalement causées par l'action du trafic lourd et par des conditions climatiques, telles que les cycles de gel et de dégel, qui aggravent les dommages subis par la chaussée (Laboratoire des chaussées, 1998). Ces dégradations peuvent également résulter d'un mauvais dimensionnement (choix inapproprié des épaisseurs et des matériaux des couches) ou d'une construction inadéquate (formulation et mise en œuvre inappropriées) de la structure de chaussée (Transports Québec, 2002). Les principaux types de dégradations observées dans une structure bitumineuse au Québec incluent (Transports Québec, 2002) :

- Fissurations : telles que les fissures transversales, dans les pistes de roues, longitudinales, de gel, en carrelage ou en rive ;

- Déformations de la surface : telles que l'orniérage, les affaissements et les soulèvements différentiels ;
- Défauts dans le revêtement : tels que le désenrobage, l'arrachement, le ressuage, la pelade et les nids-de-poule.

En milieu urbain, des fissurations autour des regards et des puisards, ainsi que des dénivellations, peuvent également apparaître.

1.3 Entretien et réhabilitation des chaussées au Québec

Les dégradations subies par la chaussée au cours de sa durée de vie, affectent la sécurité et le confort des usagers de la route, d'où la nécessité cruciale d'entretenir et de réhabiliter les chaussées. De plus, il a été démontré que plus une chaussée est dégradée, plus les efforts financiers nécessaires à sa remise en état sont élevés (ARRA, 2015).

Au Québec, le choix de la technique d'intervention repose sur une évaluation de divers facteurs techniques, environnementaux et économiques (Bitume Québec, 2014a) parmi lesquels :

- La nature et la sévérité des dégradations rencontrées ;
- La nécessité ou non d'augmenter la capacité structurelle de la chaussée ;
- La réalisation éventuelle de corrections de profil longitudinal et transversal ;
- La consommation d'énergie et les émissions de GES ;
- Le coût de mise en œuvre de la technique.

La Figure 1.2 présente les différentes techniques d'entretien et de réhabilitation des chaussées utilisées actuellement au Québec, tout en précisant l'âge et l'état de la chaussée lors de l'intervention.

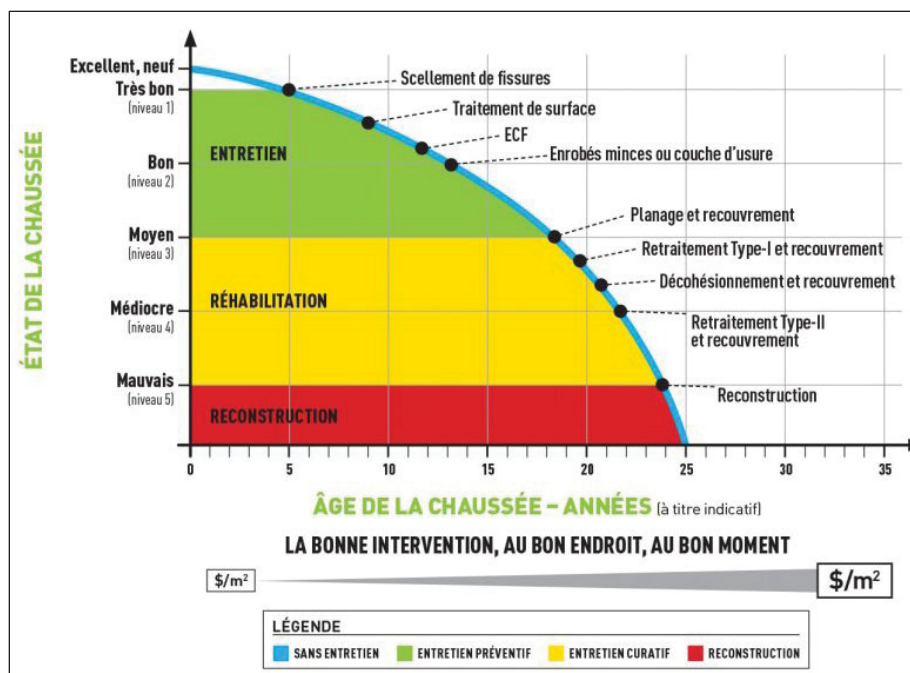


Figure 1.2 Différentes techniques d'entretien et de réhabilitation des chaussées utilisées actuellement au Québec
Tirée de Bitume Québec (2014c)

1.3.1 Retraitement en place

Le retraitement en place des chaussées est une technique de réhabilitation qui consiste à recycler les matériaux existants des chaussées dégradées pour leur donner une nouvelle vie. Cette méthode n'inclut aucun chauffage, ni de la chaussée ni des granulats, et se décompose en deux types principaux (Bitume Québec, 2014b) :

- **Type I (Recyclage à froid) :** Cette technique consiste à recycler la couche de revêtement dégradée. Elle permet de réutiliser 100 % des GBR générés au cours du processus. L'épaisseur de la couche recyclée peut atteindre jusqu'à 100 mm lorsque le liant utilisé est une émulsion de bitume ou une mousse de bitume uniquement, et jusqu'à 150 mm lorsqu'un liant hydraulique est ajouté (ARRA, 2015). La nouvelle couche de base est ensuite recouverte d'un nouveau revêtement de surface, prolongeant ainsi la durée de vie de la chaussée jusqu'à 15 ans (Bitume Québec, 2020a).

- Type II (Décohésionnement et retraitement) :** Réalisée à froid et sur place, cette technique de réhabilitation consiste à décohésionner l'ensemble de la couche d'enrobé dégradée ainsi qu'une partie de la couche sous-jacente, afin de créer une fondation homogène et renforcée. La profondeur de retraitement, généralement comprise entre 100 et 300 mm, varie en fonction de l'épaisseur du revêtement et des couches sous-jacentes (Morian et al. 2012). Les matériaux décohésionnés sont traités par l'ajout d'une émulsion de bitume ou de mousse de bitume pour le retraitement à base de liant bitumineux, ou de ciment ou de chaux pour le retraitement dit chimique. Ces deux méthodes peuvent également être combinées pour optimiser les performances (ARRA, 2015). La technique comprend des opérations de profilage et de compactage de la fondation, suivies de la mise en place d'un nouveau revêtement bitumineux. Avec l'ajout d'une couche de roulement en enrobé, la durée de vie de la chaussée peut atteindre jusqu'à 20 ans, équivalant à celle d'une reconstruction complète (Bitume Québec, 2020b).

La Figure 1.3 et la Figure 1.4 présentent le principe des deux types de retraitement en place.

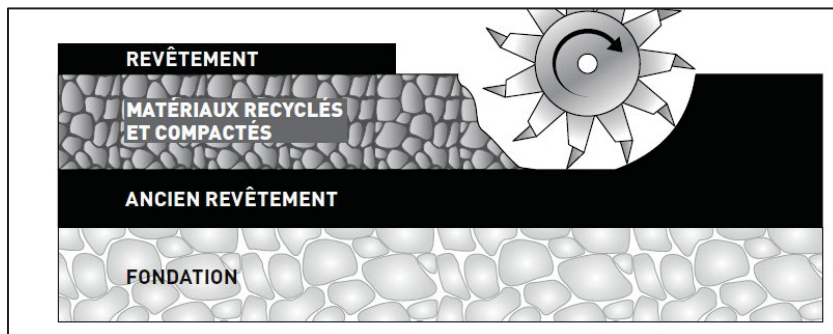


Figure 1.3 Principe de retraitement en place type I (Recyclage à froid)

Tirée de Bitume Québec (2020a)

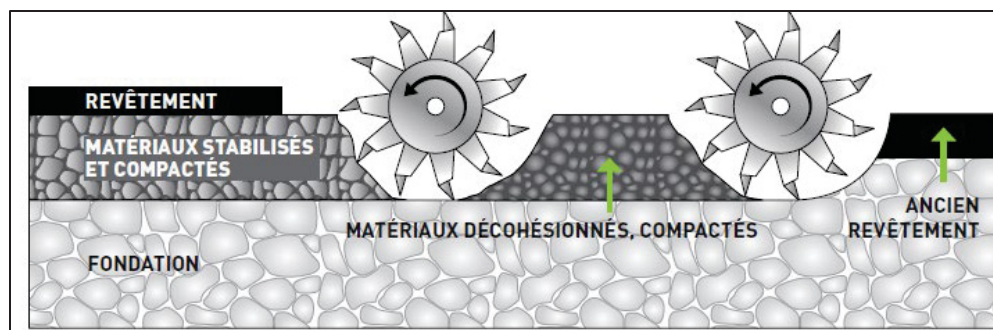


Figure 1.4 Principe de retraitement en place type II
(Décohésionnement / Retraitement)
Tirée de Bitume Québec (2020b)

1.4 Description de la technique de retraitement en place type II

Le retraitement en place type II (Full-Depth Reclamation, ou FDR en anglais), également connu sous le nom de décohésionnement / retraitement, est une technique de réhabilitation comportant une double intervention, comme décrit dans la section 1.3.1. Elle présente plusieurs avantages, tels que la préservation des matières premières, la réduction des coûts de transport et l'amélioration de la qualité des chaussées. En effet, les équipements modernes de recyclage permettent de produire des fondations traitées homogènes en des délais plus courts comparativement à une réhabilitation conventionnelle (Reeder et al., 2017; ARRA, 2015; Wirtgen, 2012). Une fois que la nouvelle fondation traitée est nivelée et compactée, les propriétés structurelles de la chaussée seront supérieures à celles de l'existante, à des coûts réduits (ARRA, 2015).

Cependant, certaines limitations empêchent la généralisation de cette technique, notamment le manque d'expérience pratique et l'absence de méthodes standardisées pour la formulation et la caractérisation en laboratoire des matériaux recyclés à froid (Xiao et al., 2018). De plus, cette technique est fortement influencée par les conditions climatiques et environnementales (ARRA, 2015; Xiao et al., 2018). Le Tableau 1.2 résume les avantages et les inconvénients de la technique.

Tableau 1.2 Avantages et inconvénients du retraitement en place type II
Adapté de Laboratoire des chaussées (1996) et Xiao et al. (2018b)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Économie des ressources naturelles et des coûts de transport ; • Résolution des dégradations de surface et des problèmes structurels ; • Homogénéisation des couches de matériaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Période de cure nécessaire ; • Conditions climatiques favorables requises ; • Manque d'expérience pratique et de connaissances sur le comportement à long terme des matériaux recyclés ; • Une formulation et une caractérisation adéquates du matériau sont requises.

1.4.1 Étapes d'un chantier de retraitement en place type II

Les engins utilisés pour le retraitement en place peuvent varier d'un entrepreneur à l'autre, mais quelle que soit l'apparence de ces machines, elles doivent effectuer les mêmes étapes générales suivantes (ARRA, 2015; Laboratoire des chaussées, 1996):

- Décohesionnement de la chaussée fissurée à une profondeur maximale d'environ 300 mm ;
- Reprofilage et compactage sommaire : Cette étape est essentielle pour contrôler avec précision la profondeur de retraitement et l'application des liants. Une légère compaction suivie d'un reprofilage garantit une couche de matériau recyclé uniforme en épaisseur, permettant un meilleur contrôle de la profondeur traitée. De plus, la compaction initiale offre une plate-forme de travail solide pour le train de retraitement ;
- Correction de la granulométrie (au besoin) : L'introduction des granulats conventionnels possédant des caractéristiques et des dimensions spécifiques, qui visent à ajuster la granulométrie du matériau résultant du processus de décohesionnement de la chaussée ;
- Nivelage initial : Correction du profil de la chaussée si nécessaire ;
- Retraitement (ou *stabilisation* en anglais) : La manière et le moment du retraitement dépendent principalement de l'étude de formulation effectuée en laboratoire, des agents employés (liants bitumineux ou liants hydrauliques ou une combinaison des deux), du procédé du retraitement et de la disponibilité des engins (le paragraphe 1.5.1 détaille les

caractéristiques des liants de retraitement employés dans les travaux de retraitement en place type II) ;

- Compactage final ;
- Cure : La couche de matériaux traités recyclés doit subir une cure adéquate afin d'atteindre les résistances ultimes, éviter la fissuration sous le trafic des véhicules et de faciliter la pose du revêtement bitumineux ;
- Mise en place du revêtement bitumineux.

1.5 Matériaux recyclés à froids

Les matériaux traités recyclés à froid sont composés d'un mélange de granulats vierges et recyclés, formulés avec du bitume sous forme d'émulsion ou de mousse de bitume (Godenzoni, 2017). Des additifs tels que le ciment Portland, la chaux ou les cendres volantes peuvent être ajoutés pour faciliter la dispersion du bitume à température ambiante, accélérer la cure et améliorer les propriétés mécaniques (Tebaldi et al., 2014). L'ajout d'eau permet de conférer de la maniabilité, de faciliter le compactage et d'assurer une certaine durée de conservation (Xiao et al., 2018). Ces matériaux traités recyclés, produits en usine ou directement sur site, présentent des caractéristiques variables selon la composition granulaire et les dosages des liants bitumineux et hydrauliques. Ils peuvent être classés en plusieurs catégories selon leurs comportements mécaniques :

- Matériaux traités au bitume (MTB) : Contenant jusqu'à 3 % de bitume ajouté et un maximum de 1 % de ciment ou de la chaux hydratée (par masse de granulats). Ces matériaux présentent un comportement mécanique proche de celui d'une couche granulaire faiblement liée (Asphalt Academy, 2020) ;
- Matériaux traités au ciment (MTC) : Formulés avec 2 à 5% de ciment Portland comme le seul liant, ces matériaux présentent une rigidité élevée mais sont sujets à la fissuration prématurée en raison de leur comportement fragile (Godenzoni, 2017; Grilli et al., 2012) ;
- Matériaux traités au ciment et au bitume (MTCB) : Présentant une version améliorée des MTC, ces matériaux combinent 1 à 3 % de liant bitumineux pour plus de flexibilité

et 1 à 3 % de ciment Portland. Le ciment Portland contribue à réduire la teneur en eau en raison de la réaction d'hydratation, ce qui améliore la résistance du matériau à la fissuration sous charge lourde à jeune âge (Asphalt Academy, 2020; Godenzoni et al., 2018; Raschia, 2020). Ces matériaux sont considérés pour cette recherche.

La Figure 1.5 résume les différents types des matériaux recyclés à froids en fonction des liants employés dans la formulation. L'un des paramètres permettant de caractériser le comportement mécanique des matériaux recyclés à froid est le ratio bitume/ciment (B/C). Une augmentation de la teneur en bitume, et donc du ratio B/C, améliore la cohésion interne du matériau et accroît sa sensibilité à la température, lui conférant un comportement proche de celui d'un enrobé bitumineux. À l'inverse, une teneur plus élevée en ciment réduit le ratio B/C, rendant le matériau plus rigide mais aussi plus sensible à la fissuration par retrait (Bocci et al., 2011).

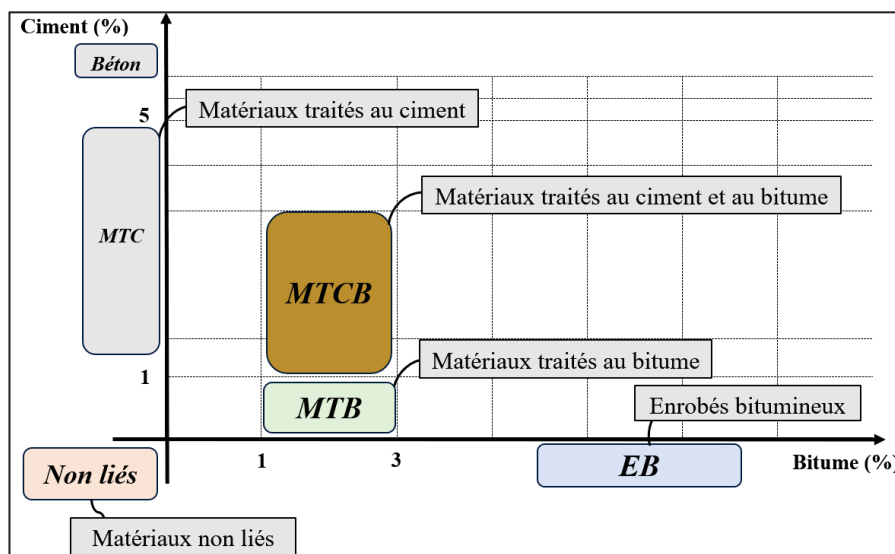


Figure 1.5 Les différentes compositions des matériaux recyclés à froid
Adapté de Grilli et al. (2012)

1.5.1 Liants employés dans la formulation des matériaux recyclés à froids

1.5.1.1 Liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des produits chimiques qui réagissent avec l'eau, transformant le système eau-liant (ayant une consistance plastique) en une matrice solide capable d'agglomérer

d'autres matériaux solides (Costa, 2015; Wang, 2019). Ce processus de durcissement se déroule progressivement sur plusieurs années, à température ambiante, que ce soit sous l'eau ou exposé à des conditions humides. Ces produits sont principalement composés de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et de chaux (CaO). La composition chimique et minéralogique de chaque liant détermine sa réactivité avec l'eau et, par conséquent, ses propriétés liantes (Costa, 2015).

Pour les matériaux recyclés à froid, le retraitement aux liants hydrauliques peut être réalisée en ajoutant aux matériaux décohésionnés récupérés un liant hydraulique permettant d'augmenter la capacité portante, en augmentant la résistance en traction et en compression du matériau et en réduisant sa plasticité (Godenzoni, 2017). Cette étape conduit à la création d'une fondation plus rigide et moins sensible à l'humidité (Reeder et al., 2017). Les liants couramment utilisés pour le retraitement sont (Reeder et al., 2017) :

- Le ciment Portland (GU) ;
- La chaux ;
- Les cendres volantes de classe C ou F ;
- La poussière de four à ciment (CKD) ;
- La poussière de four à chaux (LKD) ;
- Le chlorure de calcium ;
- Le chlorure de magnésium.

1.5.1.2 Liants bitumineux

Comme mentionné dans la section 1.5, les liants bitumineux couramment utilisés pour le retraitement des matériaux recyclés à froid sont l'émulsion de bitume et la mousse de bitume. Cette section présente ces deux types de liants en détail.

- **Émulsion de bitume**

L'émulsion de bitume est une suspension de fines gouttelettes de bitume (diamètres de 1 à 30 μm) dans l'eau (Zhao, 2007). En effet, le bitume est maintenu en suspension grâce à un émulsifiant, un agent tensio-actif qui adhère à chaque gouttelette individuelle et lui confère une charge électrique. L'émulsifiant utilisé détermine la polarité des gouttelettes de bitume dans l'émulsion (Asphalt Academy, 2020) :

- Les émulsions cationiques sont chargées positivement ;
- Les émulsions anioniques sont chargées négativement.

Lorsqu'elle est mélangée avec des granulats à température ambiante, la faible viscosité de l'émulsion permet d'humidifier les particules, en particulier les fractions fines où la surface spécifique est la plus élevée. L'humidité et le type de granulats utilisés jouent un rôle important dans la dispersion de l'émulsion de bitume et empêchent une "rupture" prématurée pendant le mélange. La rupture de l'émulsion, processus par lequel le bitume se sépare de l'eau pour enrober les particules de granulats et agir comme liant, doit impérativement se produire après la compaction complète du matériau (Asphalt Academy, 2020; Xiao et al., 2018). La Figure 1.6 résume les étapes de fabrication et de mise en œuvre de l'émulsion de bitume.

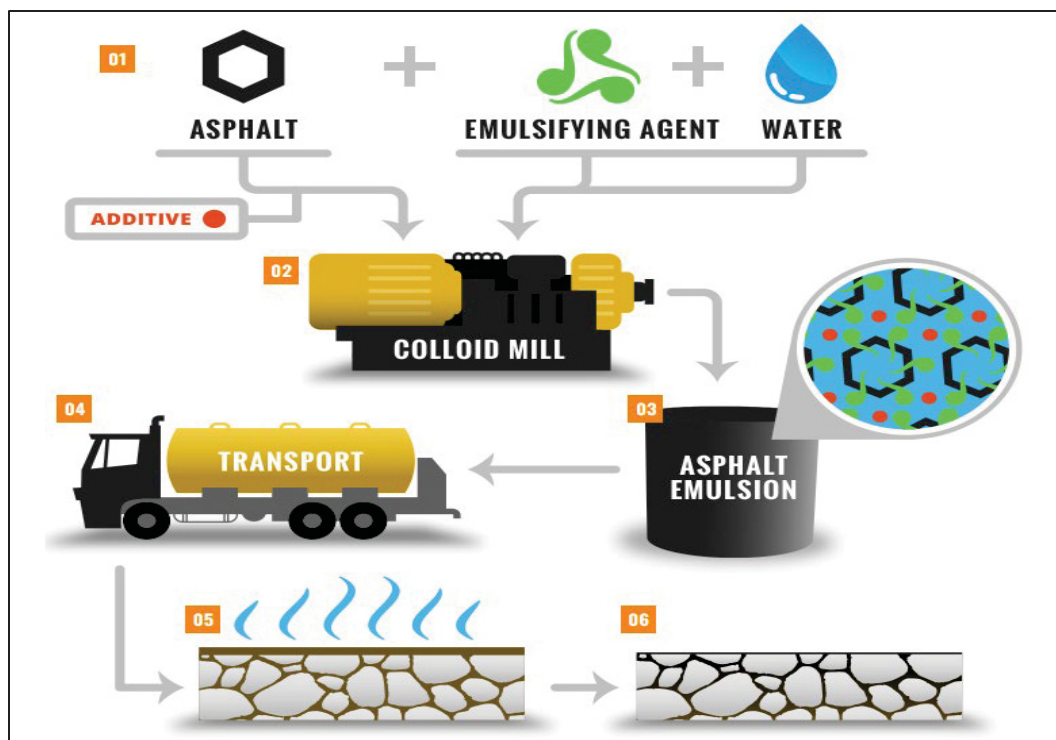


Figure 1.6 Fabrication et mise en œuvre de l'émulsion de bitume : 1) Formulation; 2) Malaxage; 3) Émulsification; 4) Transport; 5) Rupture; 6) Cure
Tirée de PPRA (2018)

- **La mousse de bitume**

La mousse de bitume est un mélange d'air, d'eau et de bitume chaud. Elle est produite en injectant de petites quantités d'eau à température ambiante et d'air dans du bitume chauffé (entre 160 et 190 °C) à l'intérieur de chambres d'expansion, comme illustré dans la Figure 1.7. L'eau se transforme instantanément en vapeur, augmentant rapidement de volume et provoquant une expansion du liant bitumineux (de 8 à 15 fois son volume initial), formant une mousse composée de millions de bulles (Asphalt Academy, 2020; Jones et al., 2020).

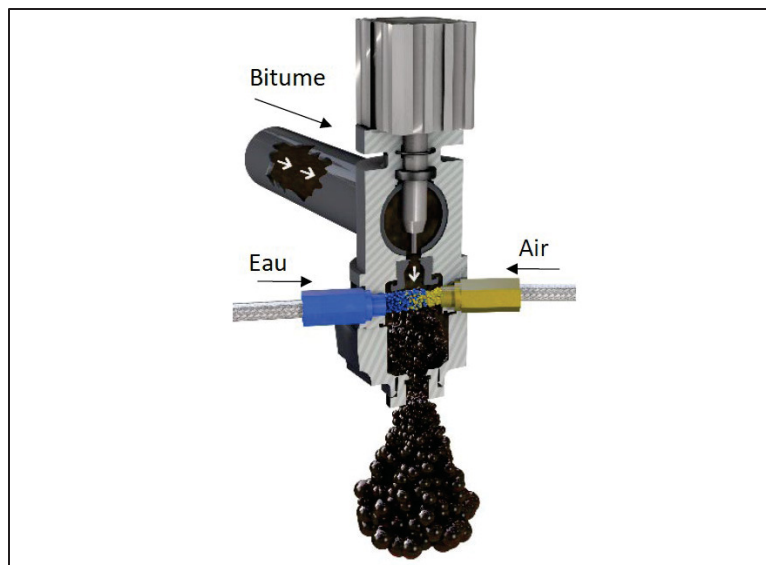


Figure 1.7 Processus de fabrication de la mousse de bitume
Tirée de Jones et al. (2020)

À l'état mousseux, la viscosité du bitume est considérablement réduite tandis que sa surface est significativement augmentée, ce qui permet une dispersion efficace dans les granulats. Pendant le processus de malaxage, les bulles de bitume éclatent dans l'ensemble des granulats et adhèrent principalement aux particules les plus fines pour former un mastic liant le matériau. Si le squelette granulaire contient des GBR, les éclats de bitume (splinters en anglais) peuvent également se fixer sur le bitume vieilli présent (Asphalt Academy, 2020; Jones et al., 2020).

Les propriétés de moussage de chaque type de bitume doivent être étudiées pour produire une mousse aux caractéristiques adaptées. En effet, ces propriétés influencent fortement les performances mécaniques des matériaux recyclés à froid produits avec de la mousse de bitume. Elles sont évaluées à l'aide de deux paramètres principaux (Asphalt Academy, 2020; Mondal et al., 2022):

- Le ratio d'expansion (RE) : Calculé comme le rapport entre le volume maximum de la mousse et le volume initial du bitume, ce ratio mesure la viscosité de la mousse et évalue la dispersion de bitume dans les granulats ;
- La demi-vie (DV) : Calculée comme le temps en secondes nécessaire à la mousse pour s'effondrer à la moitié de son volume maximum, ce paramètre mesure la stabilité

de la mousse et donne une indication de la vitesse d'effondrement de la mousse lors du malaxage.

L'utilisation de teneurs en eau plus élevées pour le moussage du bitume entraîne une augmentation du RE, mais provoque un effondrement rapide de la mousse, c'est-à-dire une DV plus courte. Ainsi, une teneur en eau optimale peut être déterminée en spécifiant des valeurs minimales pour les deux paramètres (Godenzoni et al., 2017).

1.6 Matériaux traités au ciment et au bitume : Formulation et caractérisation

La formulation des MTCB en laboratoire doit inclure des méthodes appropriées pour le malaxage et le compactage, afin de simuler les conditions réelles de production (Tebaldi et al., 2014). Cependant, cette tâche représente un défi en raison de la diversité et de la complexité des composants qui constituent ces matériaux (Raschia, 2020). À ce jour, aucune méthode unifiée n'a été établie. Les universités, les centres de recherche et les agences routières développent ainsi des approches spécifiques, adaptées à leurs climats, leurs expériences et leurs méthodes de caractérisation (Liu et al., 2022 ; Tebaldi et al., 2014b ; Xiao et al., 2018b).

La prochaine section examine les méthodes les plus courantes employées pour la formulation des MTCB et présente les relations entre leurs propriétés mécaniques et leurs composants.

1.6.1 Méthodes de formulation en laboratoire des MTCB

1.6.1.1 Méthode Marshall

Actuellement, la méthode de Marshall est la plus utilisée pour la formulation des matériaux recyclés à froid en raison de sa simplicité d'application et de son faible coût en équipements (Liu et al., 2022). Afin de mieux répondre aux spécificités des matériaux traités recyclés à froid, une version « modifiée » de la méthode de Marshall a été développée. Cette méthode modifiée prévoit l'utilisation de jusqu'à 75 coups par face pour compacter les éprouvettes et recommande une teneur en vides comprise entre 9 % et 14 % pour les éprouvettes fabriquées

(Liu et al., 2022). Cependant, la méthode de Marshall, même dans sa version modifiée, présente des limites. Elle ne simule pas adéquatement les conditions de compactage réelles sur le chantier et ne permet de déterminer les caractéristiques volumétriques des éprouvettes qu'après leur compactage, ce qui peut réduire la précision des résultats (Liu et al., 2022 ; Raschia, 2020).

Au Québec, la formulation des MTCB est réalisée selon la méthode Marshall, conformément à la méthode d'essai LC 26-002. Cette norme encadre la formulation des matériaux recyclés traités à froid à l'aide d'émulsion ou de mousse de bitume et repose sur les principes de la méthode Marshall modifiée. Elle permet également de déterminer la teneur optimale en bitume, assurant une production économique et des matériaux capables de résister aux sollicitations répétées (compression et flexion) sans déformations permanentes excessives ni fissurations dues à la fatigue (MTMD, 2023c).

1.6.1.2 Méthode volumétrique : Presse à cisaillement giratoire

Actuellement, de nombreux pays s'orientent vers l'adoption de la presse à cisaillement giratoire (PCG) pour la formulation des enrobés bitumineux, car elle a démontré la capacité à produire des matériaux présentant des propriétés mécaniques proches de celles obtenues sur le terrain (Hu et al., 2017).

La méthode de formulation utilisant la PCG permet de suivre l'évolution de la hauteur de l'éprouvette à chaque giration, offrant ainsi une meilleure maîtrise du processus de compactage (Raschia, 2020). Cependant, pour exploiter pleinement cette méthode et garantir un meilleur contrôle du compactage, une caractérisation volumétrique des MTCB est indispensable (Godenzoni, 2017; Mignini et al., 2021).

Grilli et al. (2012, 2016) ont proposé une méthode de formulation et de compactage des MTCB basée sur les paramètres volumétriques traditionnellement utilisés pour les enrobés à chaud, adaptée pour tenir compte des nouvelles composantes comme l'eau, le ciment, l'émulsion de

bitume ou la mousse de bitume. Cette approche a été adoptée dans plusieurs études afin de déterminer la teneur en eau optimale et de préparer les éprouvettes pour les essais de caractérisation mécanique.

Le compactage est généralement réalisé avec une pression constante de 600 kPa, un angle interne de $1,16^\circ$ et une vitesse de rotation de 30 tours ou girations/min. Le compactage est réalisé jusqu'à 180 girations. Les éprouvettes sont habituellement préparés dans des moules de 150 mm ou 100 mm de diamètre (Raschia et al., 2018).

Le paragraphe suivant traite de l'approche volumétrique appliquée aux MTCB.

- **Approche volumétrique pour les MTCB**

La caractérisation volumétrique des matériaux bitumineux est essentielle, que ce soit lors de la formulation ou lors du contrôle qualité des matériaux (Grilli et al., 2016). En effet, les propriétés volumétriques influencent de manière significative les performances mécaniques et la durabilité du matériau. Par ailleurs, pour les MTCB, les caractéristiques physiques diffèrent selon l'état du matériau (frais, c'est-à-dire au moment du compactage, ou curé, c'est-à-dire en service) (Graziani et al., 2018). Cette différence est due à l'hétérogénéité des constituants et aux interactions spécifiques entre eux, ce qui rend ces matériaux différents des matériaux traditionnels (Godenzoni, 2017).

Pour cette raison, l'approche volumétrique utilisée pour les enrobés à chaud, basée sur les vides dans le matériau (V_m), les vides dans les granulats minéraux (VMA), et les vides remplis de bitume (VFB), est adaptée à la formulation des MTCB avec quelques modifications nécessaires (Grilli et al., 2016). La Figure 1.8 illustre les matériaux constituant les MTCB lorsque l'émulsion de bitume est utilisée comme liant bitumineux et le ciment comme liant hydraulique par masse, ainsi que la composition volumétrique du matériau. Elle précise les abréviations pour leur masse, leur masse volumique, ainsi que les volumes des différents composants.

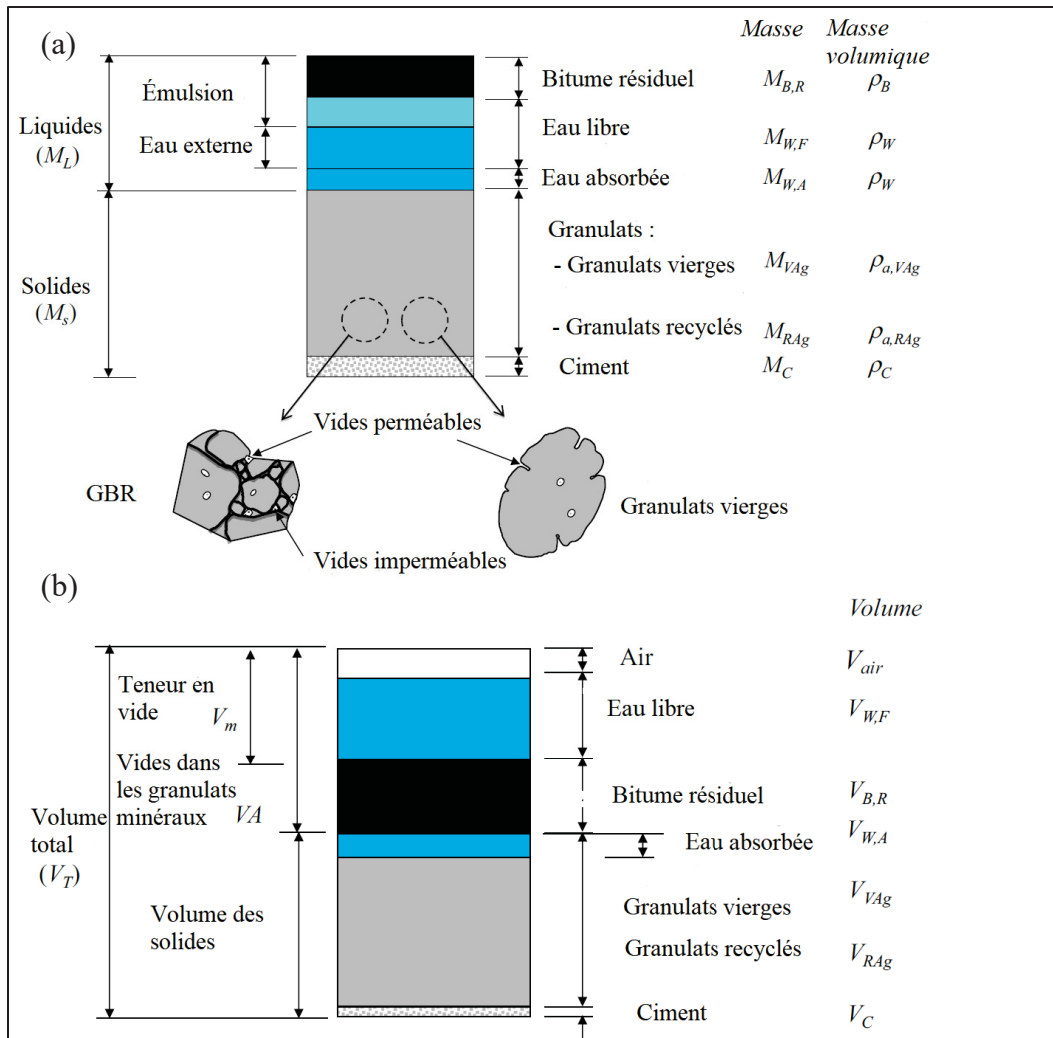


Figure 1.8 Composition des MTCB à l'état initial (frais) :
 (a) composition par masse; (b) composition par volume
 Adaptée de Grilli et al. (2016)

Dans le recyclage à froid, les GBR ne sont pas chauffés, ce qui signifie que le bitume vieilli contenu dans ces granulats ne joue pas le rôle d'un liant actif, contrairement au bitume provenant des liants ajoutés. Ainsi, les GBR sont considérés comme un composant solide, nommé « *Black Rock* » (Godenzoni, 2017).

De plus, le comportement du liant bitumineux au cours du compactage varie selon le type de liant utilisé : émulsion ou mousse de bitume. Pour l'émulsion, celle-ci agit initialement comme un liquide, lubrifiant les granulats grâce à ses deux phases (bitume résiduel et eau), ce qui

facilite le compactage. Après rupture de l'émulsion, l'eau et le bitume résiduel se séparent et deviennent distincts. En revanche, pour la mousse de bitume, son rôle lubrifiant est limité, car, lors du malaxage, les bulles éclatent et forment des particules appelées « éclats de bitume ». Ces particules adhèrent aux fines et au bitume vieilli des GBR, créant des liaisons discontinues et localisées (Asphalt Academy, 2020; Godenzoni, 2017).

Plusieurs recherches indiquent que, lors des études en laboratoire, il est plus pratique d'utiliser la masse volumique des granulats à l'état saturé superficiellement sec (SSS) (ρ_{SSS}) pour l'analyse volumétrique des MTCB, étant donné que les granulats sont humidifiés avant le compactage (Grilli et al., 2012).

Les deux principaux paramètres utilisés pour caractériser la formulation dans cette méthode sont les vides dans le matériau (V_m) et les vides remplis de liquides (VFL), calculés respectivement selon les équations (1.1) et (1.2).

$$V_m = \frac{V_{AIR} + V_{Eau,libre}}{V_T} = \frac{V_T - V_{Gran,SSS} - V_c - V_{B,ajout}}{V_T} \quad (1.1)$$

$$VFL = \frac{V_{Eau,libre} + V_{B,ajout}}{V_{AIR} + V_{Eau,libre} + V_{B,ajout}} = \frac{V_{Eau,libre} + V_{B,ajout}}{V_T - V_{Gran,SSS} - V_c} \quad (1.2)$$

La teneur en vides (V_m) correspond à la somme des vides d'air et de l'eau libre non absorbée par les granulats. Ce paramètre est nécessaire pour optimiser les dosages d'eau, de bitume et l'énergie de compactage afin d'atteindre une valeur cible de V_m (Raschia, 2020). Les vides remplis de liquides (VFL), représentent le niveau de saturation du matériau. Une valeur de VFL supérieure à 90 % peut provoquer une perte visible de liquides et de fines depuis le moule de compactage, ce qui peut changer la composition prévue pour le matériau (Mignini et al., 2021).

Le Tableau 1.3 résume les valeurs de V_m et VFL observées dans différentes études utilisant la méthode volumétrique pour la formulation des MTCB.

Tableau 1.3 V_m et VFL observées lors de la formulation des MTCB

Études	V_m (%)	VFL (%)
Graziani et al. (2023)	14	Non spécifié
Grilli et al. (2023)	12	65
Mignini et al. (2022)	8 – 9.5	85 - 95
Mignini et al. (2021)	11	65 - 75
Raschia et al. (2021a)	15	56
Raschia et al. (2019)	11.4 – 11.6	73.1 - 74
Graziani et al. (2017)	12	87

1.6.1.3 Revue des pratiques et des équipements de formulation

Tebaldi et al. (2014) ont réalisé une revue des méthodes de formulation adoptées par divers organismes et départements de transport à travers le monde en fonction des liants bitumineux employés. Le Tableau 1.4 présente cette revue, incluant les dimensions des éprouvettes utilisées.

Également, et afin de simuler les opérations de production en chantier des MTCB, la formulation en laboratoire doit suivre des méthodes appropriées pour la préparation des composants et le malaxage (Tebaldi et al., 2014).

Tableau 1.4 Méthodes de formulation employées par divers organismes
Adaptés de Tebaldi et al. (2014) et MTMD (2023c)

Organisme-liant	Méthode de formulation	Taille des éprouvettes
Californie-Mousse de bitume	Marshall 75x2 coups	101,6 × 63,5 mm
Californie-Émulsion	Marshall 75x2 coups / 30 girations	101,6 mm diamètre
Minnesota-Émulsion	30 girations à 600 kPa, 1.16° angle interne	101,6 mm diamètre
Norvège-Émulsion (ou mousse)	200 girations 600 kPa, 30 rpm, compactage à 96 % densité	100 mm diamètre
Afrique du Sud-Émulsion (ou mousse)	Marshall / Marteau vibrant	100 ou 150 mm diamètre
Québec-Émulsion (ou mousse)	Marshall 50x2 coups	63,5 mm la hauteur

Le Tableau 1.5 montre l'ordre de mélange des composants, les températures requises, ainsi que les équipements de malaxage employés actuellement pour la formulation en laboratoire. Lorsque la mousse de bitume est utilisée comme liant bitumineux, un malaxeur mécanique de type Pug-mill doit être utilisé afin de simuler au maximum le malaxage qui se produit sur site (Asphalt Academy, 2020). Pour l'émulsion de bitume, le malaxage peut être effectué manuellement ou avec un malaxeur mécanique, en fonction de la masse de gâchée à préparer (Raschia et al., 2018). Cette différence s'explique par les propriétés distinctes de chaque liant et leur interaction avec les granulats. En effet, dans le cas de l'émulsion, le bitume résiduel est en suspension dans l'eau, ce qui lui permet de se répartir progressivement et uniformément sans nécessiter un malaxage dynamique. À l'inverse, la mousse de bitume perd rapidement sa stabilité après injection, nécessitant un malaxage rapide et dynamique pour assurer une répartition homogène avant que la mousse ne s'effondre et perde ses propriétés expansées (Asphalt Academy, 2020).

Tableau 1.5 Étapes et condition de malaxage des MTCB
Adapté de Tebaldi et al. (2014) et MTMD (2023c)

Organisme-Liant bitumineux	Température (°C)	Ordre de malaxage	Méthode de malaxage
Californie-Mousse de bitume	25	1. Mélange granulats et ciment ; 2. Ajout d'eau ; 3. Ajout de bitume moussé	Mécanique : Pug-mill
Minnesota-Émulsion	60	1. Mélange granulats et eau ; 2. Mélange avec l'émulsion.	Manuel
Norvège-Émulsion et mousse de bitume	Température ambiante	1. Granulats ; 2. Ajout d'eau et d'émulsion ou bitume moussé mélangés à la fois.	Émulsion : Manuel Mousse : Mécanique : Pug-mill
Afrique du Sud-Émulsion (ou mousse)	Température de la chambre	Emulsion : 1. Granulats avec le ciment ; 2. Mélange avec l'eau et stockage pour 15–30 min ; 3. Mélange avec l'émulsion et stockage pour 40–60 min avant compactage. Mousse : 1. Granulats avec le ciment ; 2. Mélange avec l'eau ; 3. Mélange avec la mousse de bitume.	Émulsion : Malaxeur mécanique mixeur Mousse : Pug-Mill
Québec-Émulsion (ou mousse)	Ambiante	1. Mélange granulats et eau ; 2. Ajout de liant bitumineux ; 3. Aérer pour diminuer la teneur en eau du matériau.	Manuel ou mécanique

1.6.2 Effet de différents composants sur les propriétés mécaniques des MTCB

Comme mentionné précédemment, les MTCB sont des matériaux composites constitués de divers composants, chacun contribuant de manière spécifique au comportement mécanique du matériau. Les propriétés mécaniques sont fortement influencées par les variations de la granulométrie, ainsi que par les teneurs et les types de liants utilisés dans leur formulation (ciment, émulsion ou mousse de bitume) (Xu et al., 2017). En modifiant la taille et la proportion des granulats, il est possible d'obtenir différentes structures granulaires, ce qui peut améliorer les propriétés mécaniques du MTCB. De plus, l'impact de la quantité de GBR utilisée dans la

couche recyclée doit être étudiée afin de ne pas compromettre les performances de la structure (Grilli et al, 2018). Concernant les teneurs en liants, de faibles dosages en ciment et en bitume produisent un matériau dépendant des contraintes, similaire à celui des matériaux granulaires non traités. En revanche, une augmentation de la teneur en bitume améliore la cohésion interne tout en accroissant la sensibilité à la température, ce qui confère au matériau un comportement qui se rapproche de celui des enrobés bitumineux, bien que légèrement inférieur en raison de la présence de ciment et d'une teneur en bitume réduite (Bocci et al., 2011). À l'inverse, une teneur plus élevée en ciment Portland rend le matériau plus rigide, ce qui le rend plus sensible à la fissuration par retrait, tout en réduisant sa sensibilité aux variations de température et de fréquence (Jones et al., 2020).

Les sections suivantes examinent diverses études qui évaluent les effets de la granulométrie, de la teneur en GBR, ainsi que des teneurs et types de liants sur les propriétés mécaniques des MTCB.

1.6.2.1 Effet de la granulométrie et des GBR

Pour les granulats vierges, Deng et al. (2021) ont étudié l'effet de la variation des teneurs en filler (particules provenant du dépoussiéreur de l'usine d'enrobage : 0-315 μm), en sable manufacturé (un type de sable fin obtenu par concassage) et en granulats grossiers sur les propriétés mécaniques des MTCB, tout en maintenant la présence de GBR. Les résultats montrent qu'une augmentation de la teneur en filler améliore les propriétés mécaniques jusqu'à un certain seuil, avant de diminuer progressivement. La teneur optimale en filler déterminée dans cette étude est de 3 %. Concernant le sable manufacturé, une augmentation de sa teneur entraîne d'abord une amélioration des propriétés mécaniques, mais ces propriétés diminuent au-delà d'une teneur de 20 %. De manière similaire, l'ajout de granulats grossiers (de taille comprise entre 9,5 et 19,0 mm) améliore initialement les performances mécaniques, avant une diminution progressive. Dans cette étude, une plage optimale comprise entre 10 % et 30 % est recommandée pour ces granulats.

Raschia et al. (2019), ont analysé les aspects de maniabilité et de compactibilité des matériaux en fonction de leurs granulométries. La maniabilité, qui désigne la facilité avec laquelle un matériau peut être mélangé et mis en place avant compactage, est liée à l'énergie requise pour ce dernier. Leurs résultats montrent qu'une augmentation du dosage en filler améliore la maniabilité du matériau en augmentant sa cohésion. Cependant, cette augmentation de maniabilité s'accompagne d'une diminution de la compactibilité, car un dosage élevé en filler réduit la facilité avec laquelle le matériau peut être densifié. En revanche, la fraction de granulats grossiers ne semble pas avoir d'effet clair sur ces propriétés.

Mignini et al. (2022) ont évalué l'effet de différentes distributions granulométriques sur la rigidité des MTCB. Les résultats ont montré que les granulométries discontinues entraînent une augmentation de la rigidité, en particulier à des températures élevées, par rapport aux granulométries denses. Cela s'explique par un nombre plus élevé de points de contact pierre-pierre entre les granulats grossiers.

Pour les GBR, Grilli et al. (2018), ont étudié l'impact de diverses teneurs sur les propriétés physiques et mécaniques des MTCB. Trois compositions granulométriques ont été analysées : 1) un mélange contenant 0 % de GBR (référence), 2) un mélange contenant 50 % de GBR, et 3) un mélange contenant 80 % de GBR. Les résultats de l'étude ont montré qu'avec l'augmentation de la teneur en GBR, la masse volumique sèche des mélanges diminue en raison de la densité inférieure des particules des GBR. Cependant, la teneur en vides ne présente pas de variation significative, ce qui indique que la compacité du matériau n'est pas affectée par la présence des GBR. De plus, la teneur en GBR n'a pas influencé de manière significative la résistance à la traction des MTCB, quelle que soit la teneur en ciment. Toutefois, la plus grande déformabilité des GBR entraîne une réduction de la rigidité du matériau, un effet qui peut être atténué en augmentant la teneur en ciment. Pour la sensibilité thermique, elle augmente avec la teneur en GBR, principalement en raison de la présence de bitume dans ces particules. Similairement, une augmentation de la teneur en ciment permet de réduire cette sensibilité à la température.

Raschia et al. (2019), ont étudié l'influence de différentes sources de GBR sur les propriétés mécaniques des MTCB, produits avec une composition volumétrique identique. Les résultats ont montré que le changement de source des GBR a entraîné des variations dans l'énergie de compactage requise, ainsi que dans les tendances d'évaporation de l'eau du matériau. Cependant, ces variations n'ont pas affecté la rigidité du matériau ni sa sensibilité thermique, ces paramètres étant principalement liés aux liants, qui restaient identiques. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les propriétés physiques des GBR lors de la formulation et du compactage des MTCB afin de garantir une performance optimale.

1.6.2.2 Effet du ciment Portland

L'utilisation de ciment dans les MTCB joue un rôle essentiel en protégeant la couche de matériaux contre les contraintes du trafic à jeune âge, en accélérant la cure et en facilitant la dispersion du bitume dans le matériau (Asphalt Academy, 2020; Ogbo et al., 2022). Dans ce contexte, Ferjani et al. (2019) ont étudié l'influence de la teneur en ciment sur les propriétés de rupture des MTCB pour identifier le seuil à partir duquel le comportement du matériau passe de flexible à fragile. Pour cela, des formulations contenant 1 %, 2 %, 3 %, 4 % et 5 % de ciment, avec 3,5 % de bitume, ont été testées à 22 °C à l'aide de l'essai de flexion semi-circulaire. Les résultats ont montré qu'une teneur en ciment allant jusqu'à 3 % maintenait un comportement flexible, caractérisé par une dissipation d'énergie plus élevée et une meilleure résistance à la fissuration. Cette flexibilité a été évaluée à travers le « taux de libération d'énergie critique » (J_c), qui quantifie la capacité du matériau à absorber l'énergie avant la propagation des fissures, ainsi que par « l'indice de flexibilité » (FI), qui combine la rigidité et la ductilité du matériau pour estimer son aptitude à retarder la fissuration. En revanche, au-delà de 3 % de ciment, une transition vers un comportement fragile a été observée, marquée par une réduction de « l'indice de résistance à la fissuration » (CRI), indiquant une moindre résistance à la fissuration. La rupture devenait alors plus soudaine, avec une dissipation d'énergie réduite. De plus, les essais de sensibilité à l'eau ont révélé qu'en conditions humides, la fragilité des matériaux augmentait davantage. Cette tendance suggère qu'une teneur élevée en ciment réduit

non seulement la capacité du matériau à résister à la fissuration, mais le rend également plus vulnérable aux effets de l'humidité, ce qui pourrait compromettre sa durabilité en service.

Raschia et al. (2020) ont également exploré le rôle du ciment dans les MTCB en comparant deux formulations de composition volumétrique identique : l'une contenant 3 % de bitume et 1,5 % de ciment, et l'autre, où le ciment était remplacé par du filler. Les résultats ont montré que l'ajout de ciment n'a pas significativement augmenté la résistance à la traction, mais a amélioré le module de rigidité après la cure. L'analyse par microscope électronique a révélé qu'en l'absence de ciment, une teneur en eau plus élevée favorisait une meilleure dispersion du bitume. Cependant, en présence de ciment, une augmentation de l'eau entraînait une hydratation accrue du ciment, limitant ainsi la contribution du bitume aux performances mécaniques.

Par ailleurs, Graziani et al. (2016), ont montré que l'augmentation de la teneur en ciment de 1,0 % à 2,5 % dans des MTCB contenant 2 % de bitume résiduel avait un effet significatif sur la rigidité et la résistance à la traction à long terme. En plus du dosage, le type de ciment utilisé dans la formulation peut influencer le comportement mécanique des MTCB à long terme (Mignini et al., 2021).

1.6.2.3 Effet du bitume

L'influence du bitume sur les propriétés mécaniques des MTCB est présentée en analysant d'abord les études portant sur chaque type de liant (émulsion et mousse de bitume), puis celles comparant ces deux procédés de retraitement.

- **Émulsion de bitume**

Le bitume résiduel présent dans l'émulsion est constitué de particules de bitume dispersées dans l'eau. Cela signifie qu'il reste à l'état solide et ne peut pas être absorbé par les granulats (contrairement au bitume chaud utilisé dans les enrobés à chaud) (Grilli et al., 2016).

Une étude réalisée par Grilli et al. (2012) a examiné l'impact de différentes teneurs en bitume résiduel sur la sensibilité thermique des MTCB. Pour cela, des matériaux contenant respectivement 1,5 %, 2,0 %, 2,5 % et 3,0 % de bitume résiduel ainsi que 2 % de ciment Portland ont été testés. Les essais ont évalué le module de rigidité à différentes températures (5 °C, 20 °C, 35 °C et 50 °C) et mesuré la résistance à la traction à 25 °C. Les résultats ont montré une sensibilité marquée des matériaux à la température, en particulier lorsque la teneur en bitume résiduel augmente. Par ailleurs, la teneur optimale en bitume résiduel, située entre 2,0 % et 2,5 %, a permis d'obtenir la résistance à la traction la plus élevée. Au-delà de cette plage, une teneur plus élevée en bitume résiduel rend le matériau plus ductile et réduit sa rigidité.

De plus Raschia et al. (2021) ont étudié l'impact du changement de type d'émulsion sur les propriétés rhéologiques du matériau. Les résultats ont révélé que, pour une même composition volumétrique des matériaux et une même teneur en bitume résiduel provenant de deux émulsions différentes, la viscosité ainsi que la dépendance temps-température différaient significativement entre les deux types de bitume résiduel. Cela indique que cet aspect ne doit pas être négligé dans la formulation.

- **Mousse de bitume**

Les propriétés mécaniques des matériaux produits avec la mousse de bitume varient entre celles d'un matériau granulaire amélioré et celles d'un enrobé bitumineux, en fonction de la teneur en liant employée dans la formulation (Godenzoni et al., 2017). En effet, une étude réalisée par González et al. (2016) a évalué la sensibilité au bitume des MTCB contenant respectivement 1,25 %, 2,50 % et 3,75 % de mousse de bitume ainsi que 1 % de ciment. Les résultats ont montré que l'évaluation de la résistance à la traction ne permet pas de déterminer de manière concluante la teneur optimale en mousse de bitume. Il est donc recommandé de compléter cette analyse par une évaluation de la durée de vie en fatigue du matériau à l'aide d'un essai de fatigue en traction indirecte. D'un point de vue volumétrique, l'augmentation des teneurs de mousse de bitume peut entraîner une augmentation des vides dans les granulats minéraux (VMA), ce qui signifie une réduction de la densification du squelette granulaire

(Godenzoni et al., 2017).

Changer le type de liant bitumineux dans la formulation des MTCB a un impact notable sur leurs propriétés mécaniques. Ces différences seront explorées dans le paragraphe suivant, en mettant en avant les particularités du retraitement à la mousse de bitume et à l'émulsion de bitume.

- **Comparaison entre le retraitement à l'émulsion de bitume et à la mousse de bitume**

Ogbo et al. (2022) ont étudié le comportement de matériaux formulés avec ou sans ciment Portland, en utilisant soit 3 % d'émulsion de bitume, soit 3 % de mousse de bitume dans les formulations sans ciment, et 1,5 % de ciment combiné à 1,5 % d'émulsion ou de mousse de bitume dans les formulations avec ciment. La comparaison portait sur la contribution des liants en termes de rigidité et de résistance à la fissuration du matériau. Les résultats ont montré que l'utilisation de la mousse de bitume, comparée à l'émulsion, produit des matériaux plus rigides, ce qui permet de concevoir des structures de chaussée plus minces. De plus, la mousse de bitume et l'émulsion (avec ou sans ciment) produisent des matériaux présentant une résistance comparable à la fissuration.

Goli et al. (2023) ont évalué l'impact de différentes conditions de cure sur des matériaux formulés avec 1 % de ciment, combinés soit à 3 % d'émulsion, soit à 3 % de mousse de bitume. Les résultats ont montré que les matériaux contenant de la mousse de bitume étaient plus rigides que ceux contenant de l'émulsion sous les mêmes conditions de cure. Néanmoins, les matériaux formulés avec de l'émulsion ont présenté une flexibilité et une résistance à la fissuration supérieures à ceux formulés avec de la mousse de bitume.

Pour mieux comprendre les différences entre l'émulsion de bitume et la mousse de bitume dans la formulation des MTCB, Xiao et al. (2018b) ont proposé une comparaison des deux liants, en tenant compte de leurs propriétés et des considérations liées à la formulation. Le Tableau 1.6 présente ces différences de manière détaillée.

Tableau 1.6 Comparaison entre l'émulsion et la mousse de bitume dans la formulation des MTCB

Adapté de Xiao et al. (2018b)

Liants	Emulsion de bitume	Mousse de bitume
Types des granulats	Granulats concassées, granulats naturels, GBR	
Température du bitume (°C)	20–70	160–180 (avant l'expansion)
Température des granulats au cours du malaxage (°C)	Ambiante	Ambiante
Teneur en eau employée	Dépend de la teneur optimale en liquide	« <i>Fluff point</i> » ^A de la teneur en eau càd 70 % à 90 % de l'optimale
Température de construction et de compactage (°C)	Ambiante	
Vides (%)	10-15%	
Paramètres clés du liant	1. Type d'émulsion (anionique, cationique) ; 2. Bitume résiduel ; 3. Temps de rupture ; 4. Cure.	1. Demi-vie ; 2. Ratio d'expansion ; 3. Cure.
Temps de cure	Plus long	Relativement court
Rôle du liant dans le compactage	Contribue aux liquides pour le compactage.	Contribution négligeable aux liquides pour le compactage.
Rôle de l'eau dans les granulats	1. Fournit la maniabilité à température ambiante ; 2. Réduit l'angle de frottement et lubrifie pour le compactage ; 3. Fournit une durée de conservation pour le matériau.	
	1. Réduit l'absorption de l'eau d'émulsion et du bitume par les granulats ; 2. Empêche une rupture prématurée ; 3. Prolonge le temps de cure et réduit la résistance initiale.	4. Sépare et suspend les fines en les rendant disponible pour le bitume pendant le malaxage ; 5. Agit comme support pour les éclats de bitume pendant le malaxage ; 6. Réduit la résistance initiale.
^A Teneur en eau à laquelle les solides du matériau atteignent leur volume maximal à l'état lâche après malaxage. Elle est comprise entre 65 % et 75 % de la teneur en eau optimale déterminée par l'essai Proctor modifié sur le squelette solide (Asphalt Academy, 2020; Mondal et al., 2022).		

1.7 Cure des MTCB

Les MTCB sont caractérisés par un comportement évolutif au cours du temps en raison de la variation de la teneur en eau, résultant de l'évaporation, de la rupture de l'émulsion et de l'hydratation du ciment Portland (Mignini et al., 2021). En effet, la couche de matériaux traités recyclés doit subir une cure adéquate avant la pose du revêtement afin d'éviter une fissuration prématurée causée par le trafic et de faciliter la mise en place de la couche de roulement (Laboratoire des chaussées, 1996 ; Saeed et al., 2021).

Cette étape peut être divisée en trois catégories : initiale, intermédiaire et finale (ARRA, 2015).

- **Cure initiale** : Relativement courte, elle permet aux couches traitées de gagner suffisamment de cohésion pour résister aux problèmes de surface. La durée de la cure initiale dépend principalement de la quantité et du type de liant employé et peu des conditions climatiques. Cette période peut varier de moins d'une demi-heure pour les matériaux traités à la mousse de bitume à une heure ou plus pour ceux traités à l'émulsion ;
- **Cure intermédiaire** : Cette étape est plus longue que la cure initiale et dépend des exigences des agences routières, de la quantité et du type de liants utilisés ainsi que des conditions environnementales. La durée varie de quelques jours à plusieurs mois selon la formulation et les conditions du terrain. La cure intermédiaire est nécessaire pour permettre à la couche de matériau de développer une résistance suffisante et pour évacuer l'excès d'eau ou de composés volatils avant la pose de la couche de roulement ;
- **Cure finale** : C'est la période nécessaire pour laquelle la couche de matériaux traités recyclés atteint sa résistance ultime. En effet, cette étape commence après la mise en place de la couche de roulement et dépend à la fois de la quantité et du type de liants employés ainsi que des conditions climatiques. Pour certains liants, cette période peut être mesurée en mois ou en années.

Il convient de noter que pendant la période de cure initiale, la circulation sur la route est interdite ou limitée, et ce n'est qu'à la fin de cette étape (au début de la période de cure intermédiaire) que la circulation des véhicules légers peut reprendre (ARRA, 2015).

Xiao et al. (2018b) ont présenté l'effet de la cure sur la rigidité des matériaux traités à l'émulsion de bitume et à la mousse de bitume (Figure 1.9). Ils ont observé que la teneur en eau de la couche de matériaux traités recyclés diminue progressivement avec le temps, tandis que la rigidité augmente. Les matériaux traités à la mousse de bitume présentent une rigidité initiale supérieure à ceux traités à l'émulsion. Après environ trois ans de cure, la teneur en eau se stabilise pour atteindre un niveau constant. De plus, les valeurs de rigidité des deux types de matériaux convergent progressivement vers une limite maximale (rigidité ultime), avec des valeurs proches.

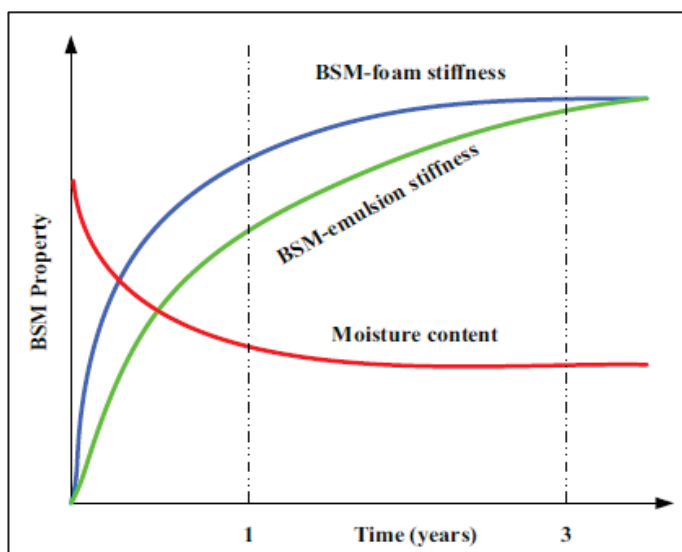


Figure 1.9 Effet de la cure sur les propriétés physiques et mécaniques des MTCB.

Tirée Xiao et al. (2018)

1.7.1 Cure en laboratoire

L'objectif de la cure des MTCB en laboratoire est de simuler au mieux les conditions de la cure sur le terrain tout en accélérant l'obtention des propriétés à long terme (Tebaldi et al., 2014). En effet, le processus de la cure peut être accéléré principalement par trois paramètres physiques (Tebaldi et al., 2014) :

- Température : Une augmentation de la température entraîne une réduction de l'humidité ;
- Humidité : La cure dans un climat sec est généralement accélérée ;
- Pression : Une réduction de la pression de vapeur de l'eau, souvent liée aux vides, entraîne une évaporation plus rapide.

Cependant, reproduire ces conditions en laboratoire reste un défi en raison de la variabilité et de la complexité des facteurs influençant la cure sur le terrain, qui sont difficiles à standardiser (Raschia, 2020; Godenzoni, 2017; Cardone et al., 2015).

La section suivante résume la revue de la littérature sur les différentes méthodes de cure utilisées en laboratoire pour simuler le processus de cure sur le terrain des MTCB.

1.7.1.1 Méthodes de cure

Plusieurs chercheurs ont exploré diverses méthodes de cure en laboratoire, en modifiant la durée, la température et le niveau d'humidité, afin de simuler efficacement les conditions de cure sur le terrain. Par exemple, Bocci et al. (2011) ont étudié l'influence du temps et de la température sur la rigidité des matériaux. À cet effet, des températures correspondant aux conditions saisonnières en Italie ont été utilisées :

- 28 jours à 40°C (été) ;
- 63 jours à 20°C (printemps et automne) ;
- 56 jours à 5°C (hiver).

La dernière série curée à 5°C a été soumise à une période de cure supplémentaire de 14 jours à 40°C. Les auteurs ont conclu que la cure à haute température accélère le développement de la rigidité et conduit à des valeurs plus élevées du module de rigidité, tandis qu'une cure à basse température ralentit le processus, mais ne compromet pas les performances potentielles du matériau. La Figure 1.10 illustre l'évolution du module de rigidité en fonction de la température et de la durée de la cure.

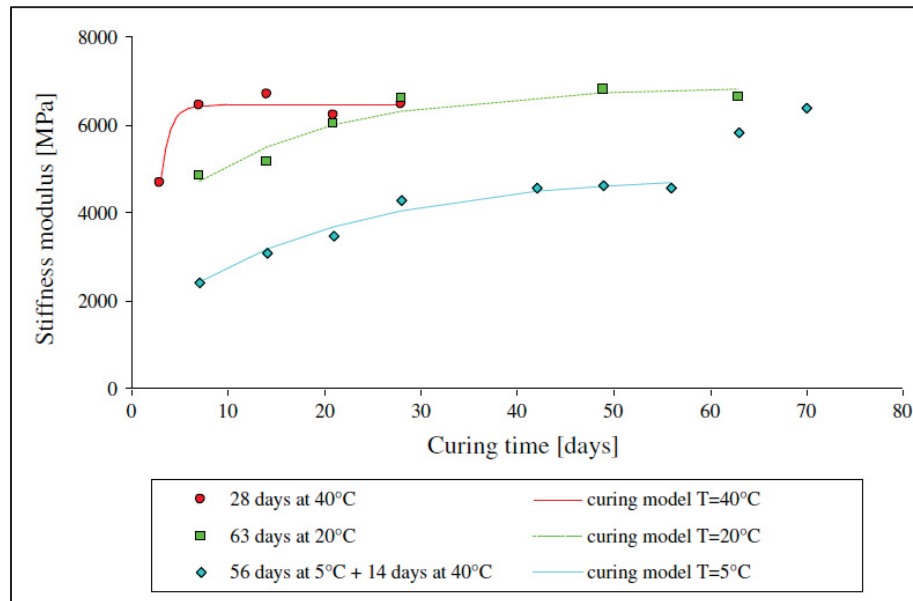


Figure 1.10 Évolution de la rigidité en fonction de la température et de la durée de la cure
Tirée de Bocci et al. (2011)

Kim et al. (2011) ont étudié les effets du temps de cure et de la teneur en eau sur le développement de la résistance à la traction et de la rigidité des matériaux traités recyclés à froid contenant des GBR, de l'émulsion de bitume ou du bitume moussé. L'objectif était de déterminer si les exigences de l'industrie concernant la teneur en eau résiduelle pour la mise en place de la couche de roulement garantissent que la couche recyclée ne subisse pas de dégradations dues aux charges de trafic dans des conditions climatiques défavorables, comme la pluie. Pour cela, des éprouvettes compactées ont été soumises à une cure scellée dans des moules en plastique (simulant une couche de roulement), afin d'évaluer les effets d'une cure à une teneur en eau presque constante. Les éprouvettes ont été curées à 25°C et 45°C pendant 0, 7 et 14 jours. Une cure préliminaire à l'air libre, avant de couvrir les éprouvettes, a également été appliquée pendant 0, 1, 3 et 5 heures pour atteindre une teneur en eau constante. Ensuite, les éprouvettes curées ont été immergées dans un bain d'eau à 25°C pendant 24 heures, afin de simuler l'effet de la pluie sur une couche recyclée sur le terrain.

Les résultats ont confirmé que la teneur en eau et la durée de cure influencent de manière significative les propriétés des matériaux traités recyclés. Les matériaux contenant de la mousse de bitume ont montré une rigidité et une résistance à la traction plus élevées que ceux contenant de l'émulsion, pour une même durée de cure. Cependant, l'immersion des éprouvettes dans l'eau pendant 24 heures, a considérablement réduit les valeurs de résistance à la traction.

Cardone et al. (2015) ont examiné la cure des MTCB en mesurant l'évolution de la teneur en eau et de la rigidité. Les propriétés physiques et mécaniques ont été évaluées à 1, 3, 7, 14, 21 et 28 jours de cure sur des éprouvettes compactées en laboratoire formulées avec 3 % d'émulsion de bitume (1,8 % de bitume résiduel) et deux teneurs en ciment (1 % et 2 %).

Les conditions de cure ont été fixées et contrôlées afin d'étudier l'évolution des propriétés physiques du matériau. Les éprouvettes compactées ont été soumises à une cure dans une chambre climatique à une humidité relative constante de 70 ± 5 % et à deux températures de cure : 20 ± 2 °C et 40 ± 2 °C. La valeur de l'humidité relative a été choisie comme un compromis raisonnable entre les liants bitumineux, dont la cure repose essentiellement sur la perte d'eau, et le ciment, dont la cure nécessite un environnement humide pour maximiser son degré d'hydratation. La température de 20 °C a été considérée comme une valeur de référence, tandis que la température de 40 °C a été choisie pour simuler une cure accélérée.

Les résultats de cette étude ont montré que l'augmentation de la température accélère la perte d'eau par évaporation : à 20 °C, la teneur en eau d'équilibre est atteinte en 14 jours, tandis qu'à 40 °C, elle est atteinte en 7 jours. De plus, l'augmentation de la teneur en ciment Portland réduit la teneur en eau d'équilibre, ce qui suggère une hydratation incomplète du ciment Portland. Pour la rigidité, son augmentation au cours de la cure est principalement liée à la perte d'eau et à l'effet de l'augmentation de la température, qui a accéléré le processus de cure.

Ogbo et al. (2022) ont exploré la relation entre la cure en laboratoire et sur le terrain des MTCB. Pour cette étude, la formulation en laboratoire et le compactage ont été réalisées de manière

aussi similaire que possible aux conditions du terrain. Concernant les températures de cure, les relevés sur le terrain ont montré des valeurs comprises entre 22 et 24 °C, ce qui a conduit les auteurs à adopter une température de 25 °C. La durée de cure a été fixée à 14 jours. Les auteurs ont utilisé, et recommandé par la suite, l'emploi d'une cure non scellée, afin de simuler les conditions de cure de façon plus réalistes sur le long terme, favorisant l'évaporation de l'eau. Les résultats de leur étude ont montré une forte relation entre l'évolution du module de rigidité et l'évolution de la résistance à la traction des matériaux au cours du temps. Les auteurs suggèrent qu'il est possible d'estimer le module de rigidité simplement en mesurant la résistance à la traction indirecte, un essai plus simple à réaliser. Ils ont également conclu que l'atteinte d'une teneur en eau d'équilibre et le développement des propriétés mécaniques progressent plus rapidement sur le terrain que dans des conditions environnementales contrôlées en laboratoire.

Goli et al. (2023) ont étudié l'effet du temps et des conditions de cure sur le développement des propriétés mécaniques des matériaux recyclés. Pour leur étude, une durée de cure de 14 jours a été appliquée à trois températures différentes (25, 40 et 60 °C), sous deux conditions d'humidité : ambiante et contrôlée à 50 %. Les résultats ont mis en évidence l'importance critique des trois premiers jours de cure dans le développement des propriétés mécaniques du matériau, montrant que des températures de cure plus élevées conduisent à des propriétés mécaniques supérieures. Cependant, ils ont également observé que la présence d'humidité réduisait la vitesse de développement de ces propriétés.

Graziani et al. (2016) ont utilisé une durée de cure de 100 jours à deux températures de 25 ± 2 °C et 40 ± 2 °C et une humidité relative de 70 ± 5 %. L'humidité élevée a été choisie parce qu'elle favorise à la fois la cure des liants bitumineux et l'hydratation du ciment. Leur étude a démontré que des températures de cure plus élevées accélèrent le développement des propriétés mécaniques. De plus, ils ont observé que la perte d'eau au cours de la cure avait un impact plus marqué sur l'évolution de la résistance à la traction, tandis que le module de rigidité était davantage lié à l'hydratation du ciment.

1.7.2 Évaluation du régime de cure en laboratoire

Plusieurs recherches ont montré que les régimes de cure en laboratoire sont évalués en termes de leurs impacts sur les propriétés physiques, telles que la teneur en eau, et mécaniques, comme la rigidité, la résistance à la traction et la stabilité. Cette section présente les méthodes et essais couramment employés pour mesurer ces paramètres.

1.7.2.1 Évaluation des propriétés physiques

En laboratoire, les propriétés physiques des matériaux sont principalement associées à leur teneur en eau. En effet, cette teneur en eau est généralement suivie par des pesées simples des éprouvettes. À cet effet, des plaques métalliques sont utilisées comme base afin de faciliter la manipulation après le compactage et de prévenir les pertes de matériaux pendant la cure, comme illustré à la Figure 1.11.



Figure 1.11 Mesure de la masse de l'éprouvette
sur une balance numérique
Tirée de Ogbo (2022)

La Figure 1.12 présente un exemple de suivi de la teneur en eau de deux MTCB contenant des différents dosages de ciment, et curés sous deux températures distinctes. En effet, la cure des matériaux formulés avec des liants bitumineux (émulsion ou mousse de bitume) est liée principalement à la perte d'eau. En revanche, la réaction chimique qui se produit lors de

l'hydratation des liants cimentaires nécessite la présence d'eau, sans entraîner de perte d'humidité significative. Ainsi, le suivi de la teneur en eau au cours du temps permet d'établir un lien entre l'évolution de l'humidité et le développement des propriétés mécaniques des matériaux (Cardone et al., 2015).

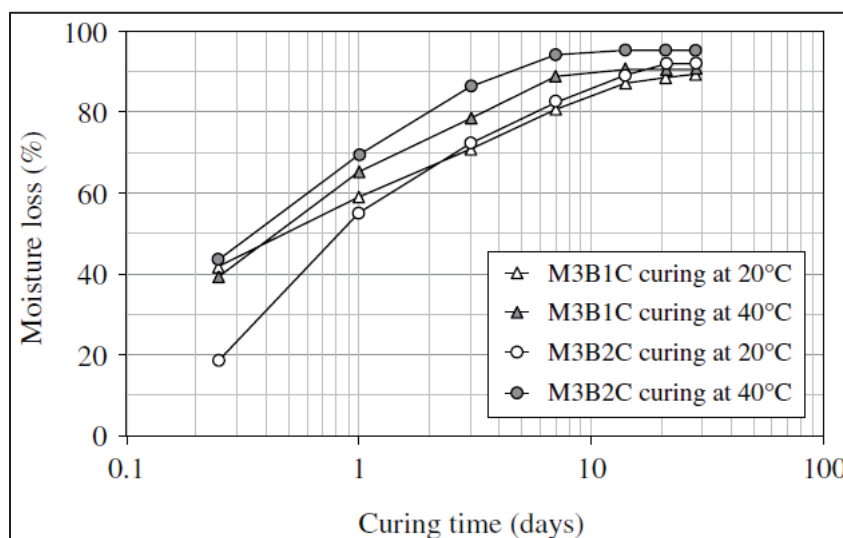


Figure 1.12 Suivi de l'évolution de la teneur en eau durant la cure

Tirée de Cardone et al. (2015)

1.7.2.2 Évaluation des propriétés mécaniques

Pour évaluer l'impact des régimes de cure sur les propriétés mécaniques, plusieurs chercheurs ont démontré que les essais de résistance à la traction indirecte (ITS) et de module de rigidité en traction indirecte (ITSM) sont adaptés pour mesurer les caractéristiques de performance des MTCB (Ogbo et al., 2022).

Dans ce contexte, les paragraphes suivants présenteront les paramètres de ces essais conformément aux normes suivantes : ASTM D6931-17 pour la résistance à la traction indirecte et EN 12697-26 (Annexe C) pour le module de rigidité en traction indirecte.

- **L'essai de résistance à la traction indirecte**

L'essai de la résistance à la traction indirecte (IDT / ITS) consiste à déterminer la charge maximale au point de rupture à utiliser pour le calcul la résistance à la traction indirecte de l'éprouvette à étudier. En effet, cet essai est réalisé en chargeant une éprouvette cylindrique du matériau le long de son diamètre vertical à une vitesse de déformation et à une température d'essai spécifiées. La Figure 1.13 présente l'essai.

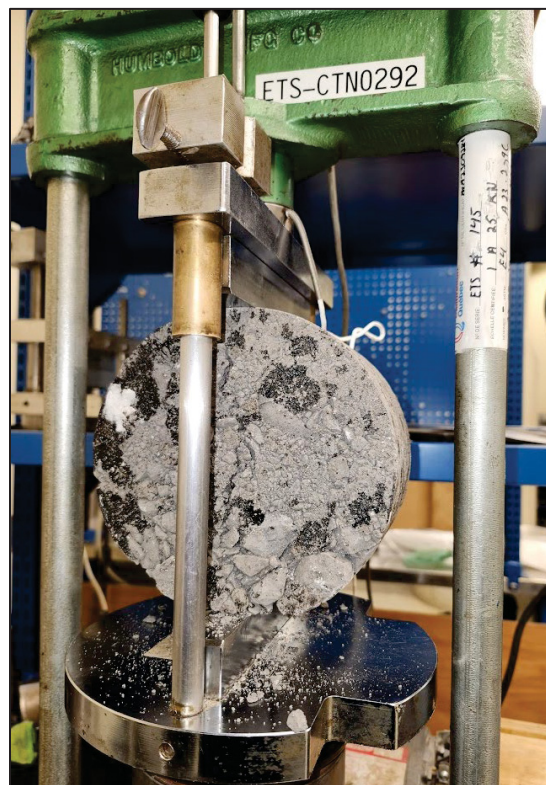


Figure 1.13 Essai ITS

La valeur de l'ITS est calculée par la suite en utilisant l'équation 1.3.

$$ITS = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (1.3)$$

Où :

- P : la charge maximale au point de rupture (N) ;
- t : Hauteur de l'éprouvette avant l'essai (mm) ;
- D : diamètre de l'éprouvette (mm).

Les valeurs d'ITS permettent d'évaluer la qualité des matériaux en lien avec d'autres essais, afin d'estimer le risque de formation d'ornières ou de fissures. Elles peuvent aussi servir à prévoir les dommages causés par l'humidité sur les chaussées (ASTM, 2017).

- **L'essai de module de rigidité en traction indirecte**

L'essai de module de rigidité en traction indirecte (ITSM) est réalisé pour mesurer le module de rigidité élastique des éprouvettes cylindriques, qui peuvent être fabriquées en laboratoire ou prélevées dans une couche de chaussée. Ces éprouvettes doivent avoir un diamètre compris entre 80 mm et 200 mm et une épaisseur variant de 30 mm à 75 mm.

L'essai consiste à appliquer une charge verticale sur le diamètre de l'éprouvette, à travers des bandes de chargement. Le vérin de chargement utilisé doit être capable de générer des impulsions de charge répétées, alternant avec des périodes de repos. La forme de la charge appliquée doit être celle d'une onde de choc ou quelque chose de similaire. Le temps de charge doit être contrôlé durant l'essai, et la période de répétition des impulsions doit être maintenue à $3,0 \pm 0,1$ secondes (AFNOR, 2012). La Figure 1.14 présente le principe de l'essai ainsi que la forme de l'impulsion de chargement.

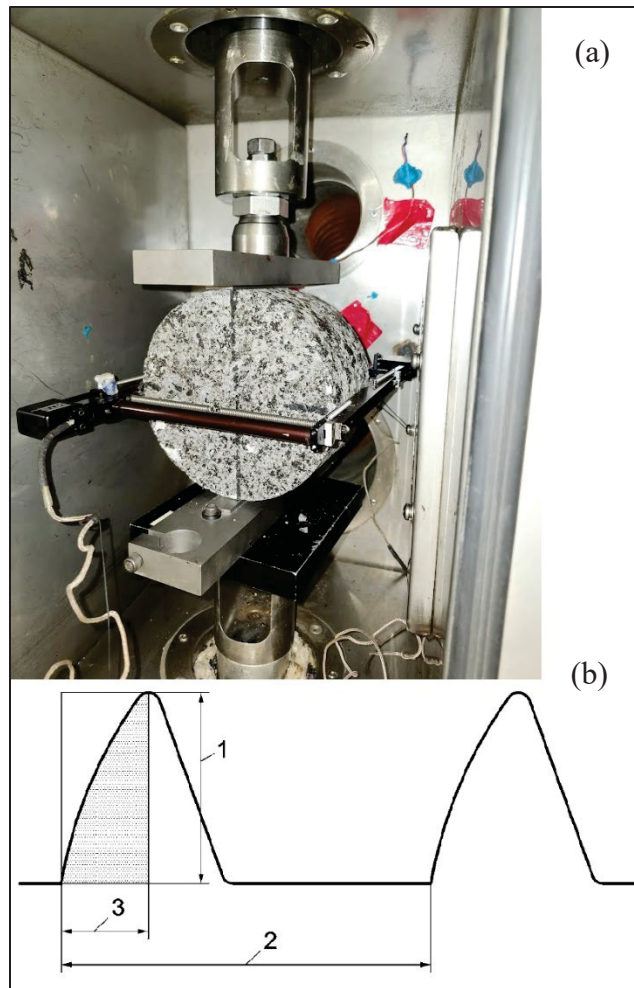


Figure 1.14 Principe de l'essai ITSM : (a) Appareillage d'essai; (b) Forme de l'impulsion de chargement
Tirée de AFNOR (2012)

Où :

- 1 : Valeur crête de la charge ;
- 2 : Période de répétition des impulsions ($3,0 \pm 0,1$ s) ;
- 3 : Temps de montée (124 ± 4 ms).

L'essai mesure le module de rigidité moyen après l'application de 5 impulsions avec un temps de montée de 124 ± 4 ms. Pour chaque impulsion, le module de rigidité est calculé selon l'équation 1.4.

$$ITSM = \frac{P \times (0.27 + \nu)}{h \times Z} \quad (1.4)$$

Où :

- P : charge répétée (N) ;
- ν : Coefficient de Poisson ;
- h : Hauteur de l'éprouvette (mm) ;
- Z : déformation horizontale (mm).

CHAPITRE 2

PROBLEMATIQUE, OBJECTIFS DE RECHERCHE ET STRUCTURE DU MEMOIRE

2.1 Problématique de recherche

La revue de la littérature effectuée au CHAPITRE 1 a mis en évidence l'intérêt du retraitement en place comme solution efficace pour la réhabilitation des chaussées, en s'appuyant sur des critères techniques, économiques et environnementaux. Les MTCB issus de cette technique de recyclage sont utilisés en raison de leur capacité à équilibrer la rigidité et la flexibilité, assurant une bonne résistance aux charges de trafic et aux contraintes environnementales (Cardone et al., 2015).

Malgré ces avantages, plusieurs lacunes persistent quant à la caractérisation de ces matériaux, notamment en ce qui concerne leur procédure de cure. Ce processus joue un rôle clé dans le développement des propriétés mécaniques et peut s'étendre de quelques jours à plusieurs semaines (ARRA, 2015; Godenzoni, 2017). La cure des MTCB est influencée par plusieurs phénomènes. D'une part, des facteurs liés à la composition du matériau, notamment l'évolution de la teneur en eau, la rupture de l'émulsion et l'hydratation du ciment (Mignini et al., 2021). D'autre part, les conditions de chantier et du climat peuvent également affecter son évolution (Raschia, 2020).

En laboratoire, l'objectif de la cure est de reproduire au mieux les conditions rencontrées sur le terrain. Une procédure adéquate doit donc tenir compte de la composition du matériau, définir la forme et les dimensions des éprouvettes, ainsi que contrôler la température et l'humidité relative afin d'obtenir des conditions représentatives (Cardone et al., 2015). Cependant, les recherches actuelles se concentrent généralement sur des paramètres fixes de température et d'humidité, sans analyser leur effet combiné. De plus, bien que l'émulsion de bitume et la mousse de bitume soient couramment employées, peu d'études comparent directement leur comportement dans des conditions identiques (Goli et al., 2023).

Dans ce contexte, cette étude vise à combler ces lacunes en analysant l'influence des conditions de cure, notamment la combinaison de la température et de l'humidité relative, sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des MTCB. Les conditions de cure ont été définies en fonction des pratiques industrielles québécoises et du climat, afin d'établir des recommandations pratiques pour mieux prédire la performance des couches de matériaux recyclés et améliorer la durabilité des chaussées réhabilitées par retraitement en place.

2.2 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier l'influence de différents environnements de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des MTCB au cours du temps, produits avec de l'émulsion ou de la mousse de bitume. L'enjeu est de fournir des données pratiques permettant d'analyser le comportement de ces matériaux en laboratoire et d'améliorer la prédiction de leur évolution en conditions réelles, dans le contexte québécois.

Les régimes de cure considérés dans cette étude ont été définis en fonction des pratiques actuelles de l'industrie et des conditions climatiques du Québec. Ils incluent différentes combinaisons de température (38°C, température utilisée actuellement pour une cure accélérée, et 23°C pour simuler les conditions ambiantes) et d'humidité relative (ambiante et élevée à 100%) afin de refléter la variabilité des environnements rencontrés sur le terrain. La formulation des matériaux, incluant la composition granulaire et la teneur en liants, a été établie en conformité avec les normes et les pratiques québécoises en matière de retraitement en place.

Dans ce cadre, les objectifs spécifiques de cette recherche sont :

- Évaluer l'effet des variations de température et d'humidité relative sur les propriétés physiques et mécaniques des MTCB à court et à long terme ;
- Analyser l'influence du type de liant bitumineux (émulsion ou mousse de bitume) sur les propriétés physiques et mécaniques des MTCB.

2.2 Structure du mémoire

Le présent mémoire est structuré de manière à présenter les bases théoriques, méthodologiques et expérimentales de cette recherche, ainsi que ses principales conclusions et recommandations.

Le CHAPITRE 1 propose une revue de littérature qui introduit les concepts fondamentaux relatifs aux structures de chaussées bitumineuses et aux techniques de réhabilitation, en mettant un accent particulier sur le retraitement en place et les matériaux issus de cette technique. Il contextualise le projet en détaillant les MTCB et leur processus de cure en laboratoire, fournissant ainsi un cadre solide pour justifier les choix effectués en vue de caractériser ces matériaux dans un contexte québécois.

Le CHAPITRE 2 définit la problématique et les objectifs de la recherche à combler par cette étude.

Le CHAPITRE 3 décrit la méthodologie expérimentale adoptée, en détaillant les étapes suivies pour la caractérisation des matières premières, l'étude de formulation, les résultats des essais de caractérisation et de formulation, ainsi que les paramètres des régimes de cure utilisés.

Le CHAPITRE 4 contient l'article scientifique intitulé « *Effect of temperature and relative humidity on cement-bitumen treated materials produced in the laboratory using emulsion or foamed bitumen* ». Cet article explore en profondeur l'influence des environnements de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des MTCB produits avec de l'émulsion de bitume ou de la mousse de bitume. Il compare les effets de différentes combinaisons de température et d'humidité relative sur les propriétés des matériaux, tout en évaluant l'impact du type de liant bitumineux utilisé dans la formulation. Cet article a été publié dans la revue « *Construction and Building Materials* » en février 2025.

Le CHAPITRE 5 présente un sommaire des résultats publiés, en exposant certains éléments qui n'ont pas été inclus dans l'article du chapitre précédent. En particulier, ce chapitre traite des résultats issus de la cure étendue des matériaux formulés à la mousse de bitume, qui n'ont pas été intégrés dans l'article en raison de la différence des durées de cure employées entre les matériaux à la mousse et à l'émulsion, rendant leur suivi et comparaison plus complexes. Toutefois, ces résultats permettent d'approfondir l'analyse comparative entre les données publiées et non publiées, offrant ainsi une caractérisation plus complète du comportement des matériaux à long terme. Ce chapitre est suivi d'une CONCLUSION globale, mettant en avant les apports techniques de cette étude à l'industrie de la construction routière ainsi que les limites qu'elle présente. Des RECOMMANDATIONS pour de futures recherches sont également proposées.

L'ANNEXE I. présente les détails l'analyse granulométrique effectuée pour tous les granulats employés dans cette étude, ainsi que la granulométrie du combiné et le fuseau granulométrique à respecter. L'ANNEXE II fournit les détails des essais de densité et d'absorption réalisés sur les différentes fractions granulaires des matériaux étudiés. Les fiches techniques des différents liants employés pour la fabrication des éprouvettes sont regroupées dans l'ANNEXE III, ANNEXE IV et ANNEXE V, tandis que leurs caractéristiques de formulation et de fabrication sont présentées dans l'ANNEXE VI. Enfin, les détails des mesures de la perte d'eau, de la résistance à la traction indirecte et du module de rigidité au cours du temps, pour chaque régime de cure étudié, sont présentés dans l'ANNEXE VII, ANNEXE VIII et ANNEXE IX.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS DE FORMULATION

3.1 Méthodologie et programme expérimental

Afin d'atteindre les objectifs mentionnés dans le CHAPITRE 2, le programme expérimental illustré dans la Figure 3.1 a été adopté. Cette section fournit une description générale de chaque étape de cette étude, ainsi que les méthodes et normes utilisées pour les essais. Les étapes 1 à 5 seront traitées en détail au CHAPITRE 4 et l'étape 6 au CHAPITRE 5.

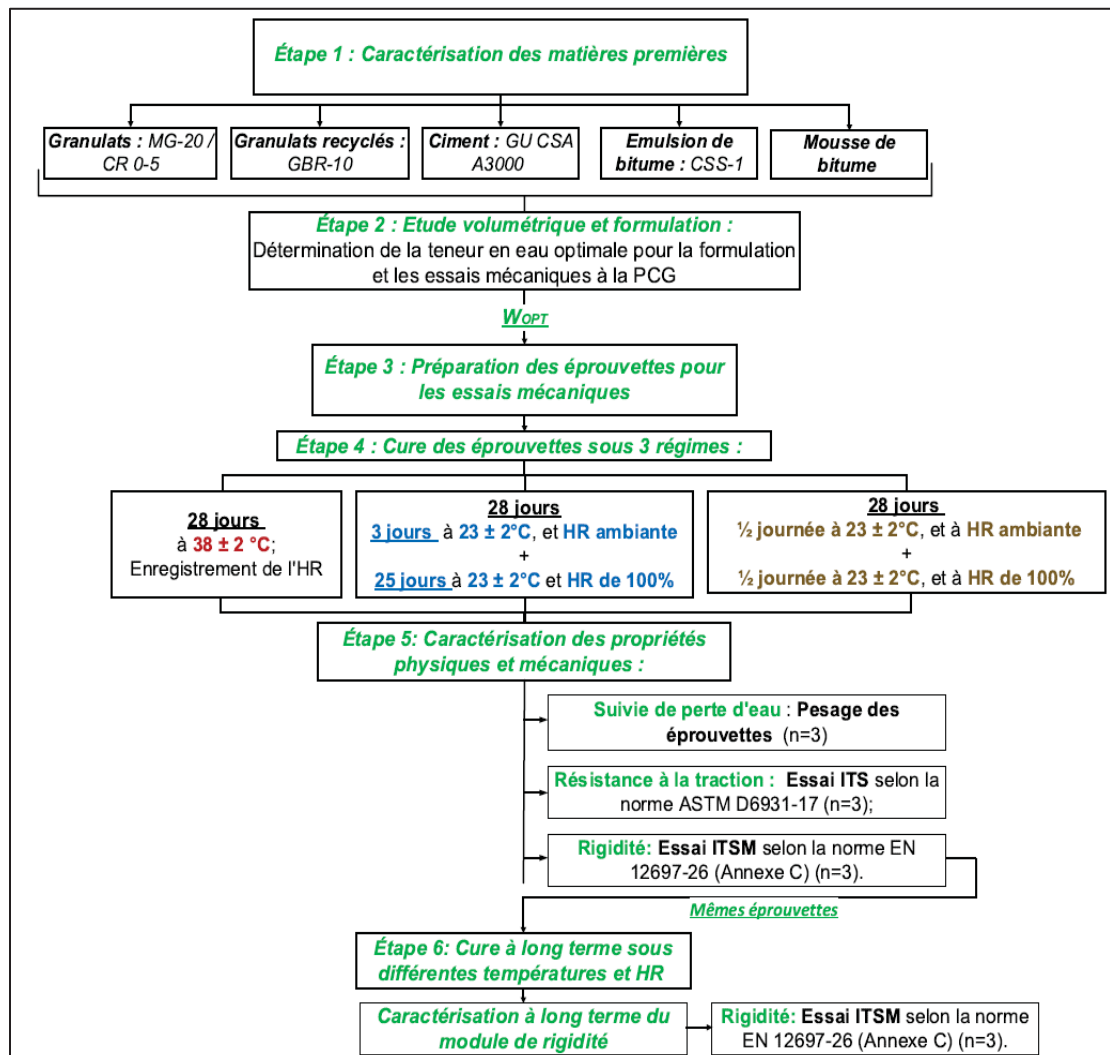


Figure 3.1 Programme expérimental

3.1.1 Caractérisation des matières premières (Étape 1)

Les granulats employés dans cette étude ont été sélectionnés afin de représenter les matériaux décohésiennés observés sur le terrain au Québec dans le cadre des travaux de retraitement en place de type II. Lors de ces travaux, l'enrobé sur toute son épaisseur ainsi qu'une partie de la fondation granulaire sont décohésiennés et corrigés (au besoin). Pour cette raison, des granulats vierges (matériau granulaire de type MG-20b et criblure CR 0-5) ainsi que des granulats recyclés (Granulats de Bitume Recyclés, GBR-10) ont été adoptés pour cette étude.

Afin de déterminer les propriétés des matériaux nécessaires à une formulation adéquate, des essais de caractérisation ont été réalisés sur les granulats vierges et recyclés, conformément aux méthodes d'essai présentées dans le Tableau 3.1. Avant ces essais, les granulats ont été séchés jusqu'à masse constante à 110 °C pour les granulats vierges et à 50 °C pour les GBR.

Le ciment utilisé dans la formulation est un ciment d'usage général (GU), classifié selon la norme CSA A3000. L'émulsion de bitume employée est une émulsion cationique à rupture lente de faible viscosité (*Cationic Slow Setting with lower viscosity*), nommée CSS-1, dont la teneur en bitume résiduel a été déterminée selon la norme ASTM D6997. La mousse de bitume a été produite en laboratoire à l'aide d'un bitume PG58S-28 et d'un dispositif de moussage Wirtgen WLB10. Les paramètres cibles pour la mousse de bitume étaient un RE de 10 et une DV de 6 secondes, sélectionnés en se basant sur les pratiques actuelles de l'industrie québécoise pour le moussage de bitume appliqué dans le recyclage à froid des chaussées.

Pour le dosage en GBR à utiliser pour la granulométrie du combiné (représentant le matériau décohésienné), les exigences à respecter sont celles d'un matériau recyclé de type MR-5, conformément à la norme BNQ 2560-600 en vigueur dans la province de Québec. Les proportions de granulats vierges et recyclés ont été choisies de manière à respecter les limites définies pour un MR-5 ($> 35 \%$ et $\leq 50 \%$ pour les GBR et $< 65 \%$ pour les granulats vierges). Le Tableau 3.2 présente la granulométrie du combiné utilisée dans cette étude ainsi que le fuseau granulométrique requis par le MTMD pour les travaux de retraitement en place de type II.

Tableau 3.1 Propriétés des composants utilisés et normes des essais

Composant	Méthode d'essai ou norme	Essai
Granulats vierges et recyclés : MG-20b / CR 0-5 / GBR-10	LC 21 – 040	Analyse granulométrique
	LC 21 – 065	Détermination de la densité et de l'absorption du granulat fin
	LC 21 – 066	Détermination de la densité et de l'absorption du granulat fin de classe granulaire 2,5/5
	LC 21 – 067	Détermination de la densité et de l'absorption du gros granulat
Granulats de bitume recyclés : GBR	LC 26 – 002	Détermination de la teneur en bitume par ignition
Ciment : GU (CSA A3000)	ASTM C109	Résistance à la compression à 28 jours de cure
Émulsion de bitume : CSS-1	ASTM D6997	Teneur en bitume résiduel
Mousse de bitume :	--	Ratio d'expansion
Produite en laboratoire	--	Demi-vie

Tableau 3.2 Granulométrie du combiné et fuseau granulométrique pour les travaux de retraitement en place
Tiré de Laboratoire des chaussées (1996)

Tamis	% passant	% exigences
40 mm	100	100
28 mm	100	80-100
14 mm	83,8	50-90
5 mm	49,2	25-55
315 µm	9,7	5-20
80 µm	6,1	3-10

Pour assurer la conformité aux exigences, le matériau recyclé utilisé dans cette étude était composé de 35 % de GBR, de 60 % de granulats vierges de type MG-20b et de 5 % de type CR 0-5.

L'ANNEXE I présente les courbes granulométriques des différents composants, du MR-5 (mélange granulaire), ainsi que le fuseau granulométrique à respecter et les détails des résultats de l'analyse granulométrique pour chaque composant. L'ANNEXE II regroupe les résultats détaillés des essais de densité et d'absorption pour les différentes fractions granulaires des matériaux étudiés. L'ANNEXE III, l'ANNEXE III et l'ANNEXE V présentent respectivement les fiches techniques de l'émulsion de bitume, du bitume utilisé pour la fabrication de la mousse et du ciment employé dans la formulation.

3.1.2 Étude volumétrique (Étape 2)

3.1.2.1 Principe et méthode

Pour la formulation, les teneurs en liants bitumineux et en ciment ont été choisies conformément à la pratique actuelle dans l'industrie au Québec pour les travaux de retraitement en place. Une teneur de 1,5 % en ciment et de 3 % en bitume, exprimées en pourcentage de la masse des granulats secs, a été retenue, conduisant à un ratio bitume/ciment (B/C) de 2, tel que défini dans la section 1.5 du CHAPITRE 1.

Afin de déterminer la teneur en eau optimale pour la fabrication des éprouvettes destinées aux essais de caractérisation, une étude volumétrique a été réalisée. Cette étude consistait à compacter des éprouvettes formulées avec de l'émulsion de bitume, tout en faisant varier la teneur en eau pour observer son influence sur les vides (V_m) et les vides remplis de liquides (VFL). L'émulsion a été choisie pour cette phase d'étude en raison de sa facilité de manipulation en laboratoire, notamment en termes de préparation des gâchées et de malaxage.

L'eau totale (W_{tot}) comprenait l'eau provenant de l'émulsion (W_{em}) et l'eau additionnelle (W_{add}), ajoutée en deux phases. La première phase correspondait à l'ajout d'une quantité d'eau

égale à l'absorption des granulats (W_{abs}), au mélange granulaire secs avant d'être scellée dans des sacs en plastique pendant 12 heures au minimum afin d'homogénéiser l'humidité. Ensuite, les liants ont été ajoutés selon cet ordre : ciment, eau restante pour atteindre la teneur en eau ciblée, puis l'émulsion de bitume. Chaque addition a été suivie d'un malaxage manuel jusqu'à l'obtention d'un aspect homogène.

Trois teneurs en eau totale ont été testées : 5, 3,5 et 3,07 %. Pour la teneur en eau de 3,07 %, aucune eau de pré-compactage n'a été ajoutée, les granulats étant à l'état saturé superficiellement sec (SSS).

Une masse totale de 4,5 kg, par éprouvette, a été compactée à la presse à cisaillement giratoire (PCG), en appliquant une énergie de 180 girations. Un moule de 150 mm de diamètre, une pression constante de 600 kPa, une vitesse de 30 tr/min et un angle de giration de $1,16^\circ$ ont été utilisés. Après le compactage, une vérification de la perte de matériau est réalisée en comparant les masses du moule avant et après l'essai.

La Figure 3.2 résume les étapes de formulation et de compactage, effectuées pour déterminer la teneur en eau optimale du matériau.

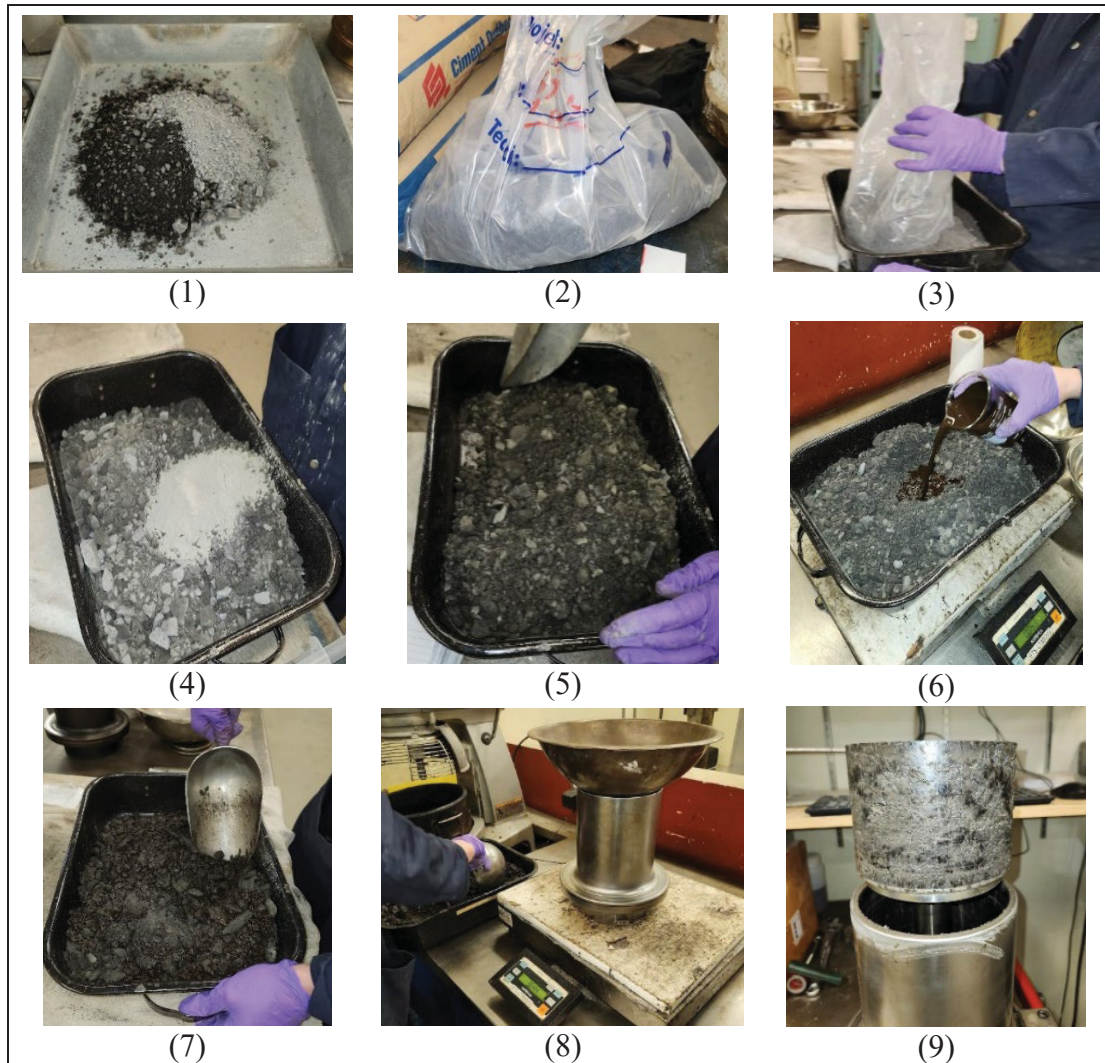


Figure 3.2 Étapes de formulation et de compactage des éprouvettes : (1) Composition granulaire; (2) Composition granulaire à l'état SSS; (3) Granulats après 12 heures au minimum; (4) Ajout de ciment et d'eau restante; (5) Premier malaxage; (6) Ajout de l'émulsion; (7) Deuxième malaxage; (8) Introduction de 4,5 kg de matériau dans le moule de la PCG; (9) Éprouvette après compaction

3.1.2.2 Résultats des essais de formulation

Les résultats des essais de compactage réalisés à différentes teneurs en eau sont résumés dans le Tableau 3.3. Pour chaque teneur en eau totale (W_{tot}), les valeurs de l'eau provenant de l'émulsion (W_{em}) et de l'eau ajoutée (W_{add}) sont présentées. De plus, le nombre de girations nécessaire pour atteindre une saturation complète ($VFL = 100\%$), la teneur en vides (V_m) au moment de cette saturation, ainsi que la perte de masse après compactage ont été déterminés.

Tableau 3.3 Résultats des essais de formulation à différents teneurs en eau

N° d'essai	W_{tot} (%)	W_{em} (%)	W_{add} (%)	VFL = 100% à $i^{ème}g$	V_m à VFL = 100 %	Perte de masse (%)
1	5%	1,61%	3,39%	100% à 50g	7,59%	2
2	3,5%	1,61%	1,89%	100% à 180g	4,52%	1,71
3	3,07%	1,61%	1,46%	93% à 180g	4,32%	0,1

Ces résultats permettent de mieux comprendre la composition de l'eau totale pour chaque mélange et d'illustrer son influence sur les paramètres volumétriques du matériau, notamment sur la saturation et la perte de masse. La perte de masse s'explique par l'évacuation d'une partie de l'eau et des fines hors du moule de compactage à la fin des 180 girations.

La Figure 3.3 illustre l'évolution des V_m et des VFL en fonction du nombre de girations sur une échelle logarithmique pour chaque teneur en eau totale (W_{tot}).

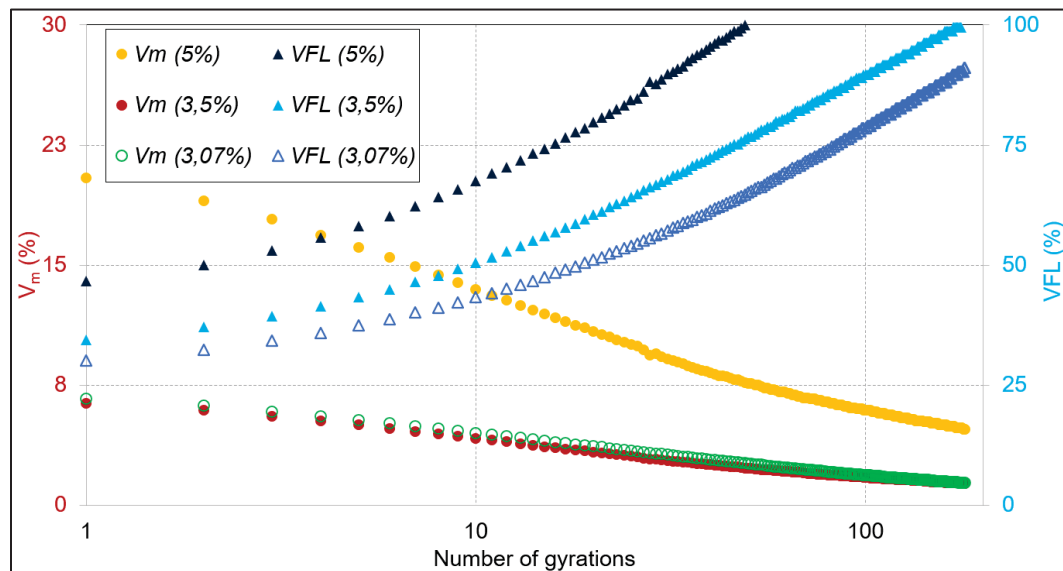


Figure 3.3 Évolution des V_m et des VFL durant le compactage pour chaque teneur en eau totale

Les résultats ont montré que la teneur en vides (V_m) diminue progressivement avec l'augmentation du nombre de girations. Les valeurs de V_m restent relativement proches pour chaque teneur en eau. Pour les VFL, une augmentation est observée lorsque le nombre de girations et la teneur en eau totale augmentent. Cela s'explique par le fait que l'eau présente

dans le mélange remplit progressivement le volume de vides disponibles au fur et à mesure du compactage.

Tous les mélanges ont atteint la saturation ($VFL = 100\%$) avant 180 girations, à l'exception du mélange avec $W_{tot} = 3,07\%$. De plus, la perte de masse, correspondant à la quantité de matériau évacuée du moule à la fin du compactage, était d'environ 0,1 % pour ce mélange, contre 2 % et 1,71 % respectivement pour ceux avec $W_{tot} = 5\%$ et $W_{tot} = 3,5\%$.

Sur la base de ces résultats et afin de limiter la perte de masse lors du compactage, la teneur en eau optimale retenue pour la formulation des éprouvettes a été fixée à $W_{tot} = 3,07\%$. Ainsi, l'eau libre durant le processus de malaxage provient uniquement de l'émulsion.

3.1.3 Préparation des éprouvettes (Étape 3)

Les éprouvettes à base d'émulsion et de mousse de bitume ont été compactés avec une teneur en vides (V_m) fixée à 12 % et une hauteur fixe de 75 mm. Ces conditions garantissent que les éprouvettes sont prêtes pour les essais ITS et ITSM présentés au CHAPITRE 1, après avoir été soumis au régime de cure choisi.

Les valeurs de VFL pour les deux matériaux ont été de 52 %, ce qui indique que les éprouvettes sont loin d'atteindre la saturation. L'ANNEXE VI récapitule les caractéristiques de formulation et de fabrication des éprouvettes à l'émulsion et la mousse de bitume.

3.1.3.1 Éprouvettes à l'émulsion

La procédure de formulation des éprouvettes à l'émulsion a suivi la même méthodologie que celle utilisée pour la détermination de la teneur en eau optimale, tout en respectant les valeurs fixées de vides et de hauteur. Après le compactage, les éprouvettes ont subi une cure préliminaire durant la nuit dans le moule à une température ambiante de 20 à 23 °C. Cette étape préliminaire visait à augmenter la cohésion du matériau et à éviter la rupture lors du démoulage.

La Figure 3.4 illustre cette étape, en montrant la cure préliminaire ainsi que le démoulage des éprouvettes formulées avec l'émulsion.

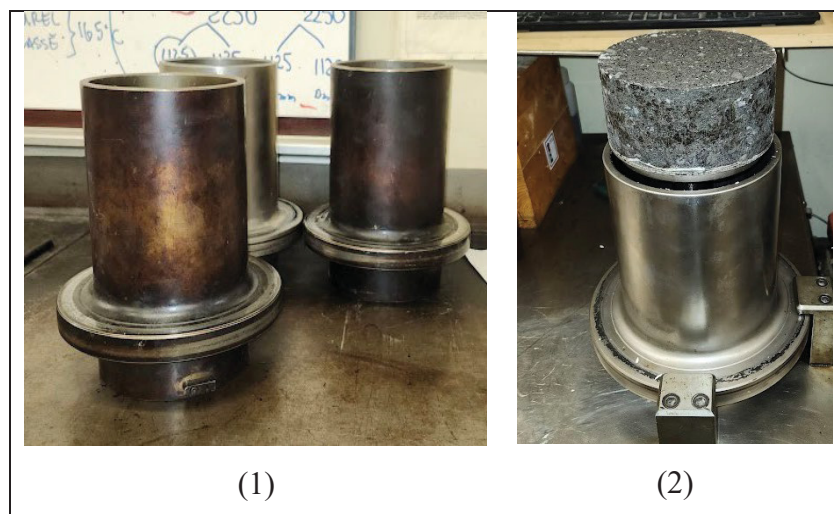


Figure 3.4 Éprouvettes formulés avec l'émulsion de bitume : (1) Cure préliminaire dans le moule; (2) Démoulage de l'éprouvette avant la cure

3.1.3.2 Éprouvettes à la mousse

Avant la formulation et la préparation des éprouvettes, les propriétés de moussage du bitume ont été étudiées afin de produire une mousse avec le RE et la DV requis. Les températures de 155 °C, 165 °C et 175 °C ainsi que des teneurs en eau de 1 %, 2 %, 3 % et 4 % (exprimées en pourcentage de la masse de bitume) ont été évaluées pour déterminer la teneur en eau et la température de moussage permettant d'obtenir les propriétés souhaitées. Pour la préparation des éprouvettes, la même composition volumétrique que celle des matériaux à l'émulsion a été utilisée.

Tout d'abord, l'eau correspondant à l'absorption des granulats a été ajoutée au mélange granulaire, lequel a ensuite été scellé dans un sac plastique pendant au moins 12 heures à température ambiante. Un malaxeur de type Pug-Mill a été utilisé, car il offre une qualité de mélange comparable à celle obtenue sur site (Asphalt Academy, 2020) et permet une

connexion facile au dispositif de moussage pour un déchargement direct de la mousse dans le malaxeur.

Le processus de malaxage a suivi la séquence suivante : les granulats humidifiés et le ciment ont été introduits dans le malaxeur et mélangés pendant 60 secondes. Pendant ce temps, l'eau restante a été ajoutée pour assurer une bonne répartition dans le mélange granulaire. Enfin, la mousse de bitume a été directement déchargée dans le malaxeur, et le matériau a été mélangé pendant 30 à 60 secondes supplémentaires (Raschia et al., 2018).

La Figure 3.5 illustre les équipements utilisés ainsi que la procédure suivie pour la fabrication des éprouvettes formulées avec la mousse de bitume. Après le malaxage (Figure 3.5 (3)), le matériau à l'état lâche a été stocké dans un sac plastique (Figure 3.5 (4)) pendant un maximum de deux heures afin d'éviter le début de la cure prématurée. Ensuite, il a été compacté à l'aide de la PCG, et les éprouvettes ont été démoulées immédiatement après le compactage pour être soumises au régime de cure.

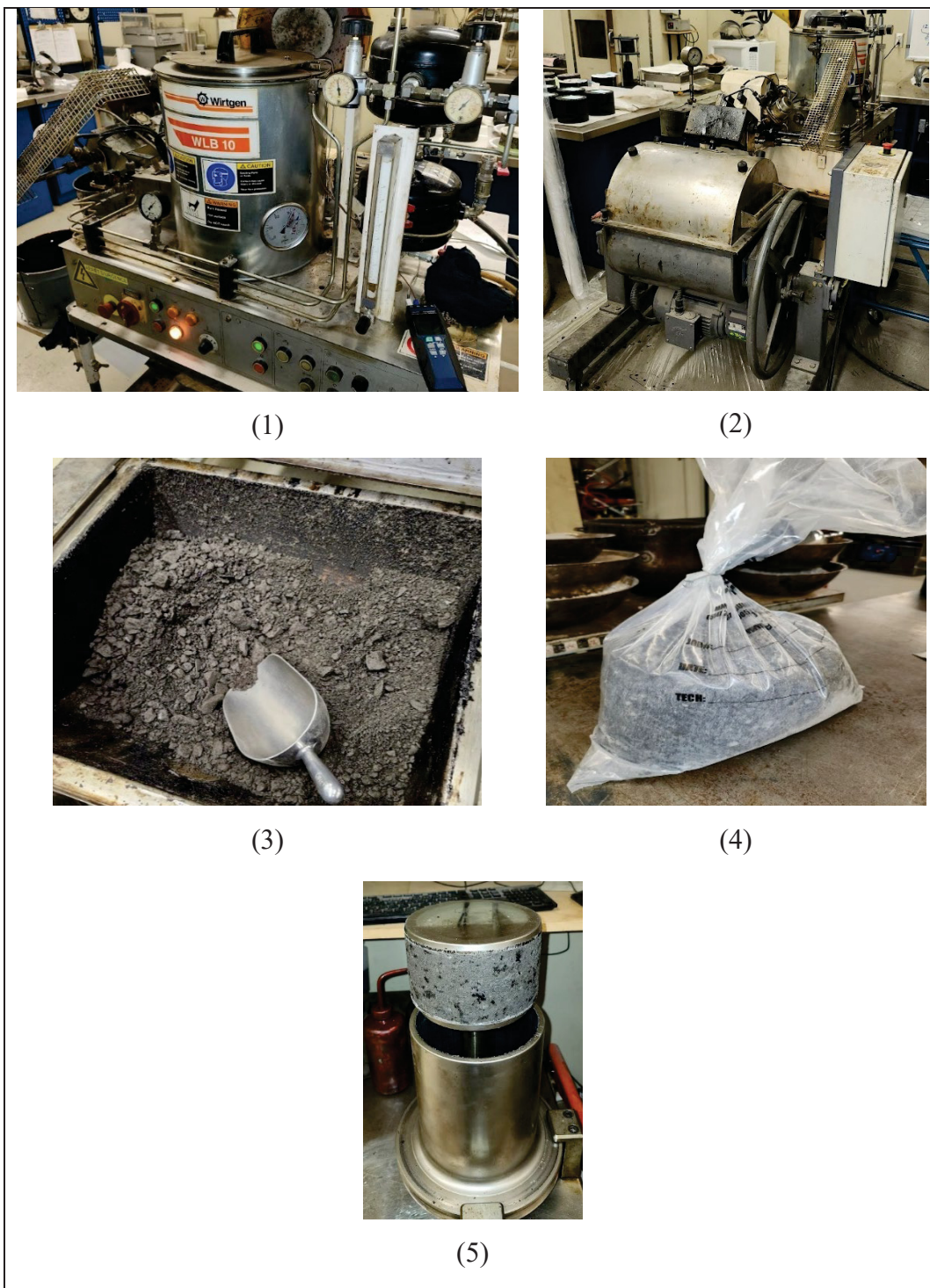


Figure 3.5 Équipements utilisés et procédure de fabrication des éprouvettes à la mousse de bitume : (1) Machine à moussage Wirtgen WLB10; (2) Malaxeur de type Pug-Mill; (3) Matériau à l'état lâche; (4) Stockage du matériau dans un sac plastique; (5) Démoulage de l'éprouvette avant la cure

3.1.4 Cure des éprouvettes (Étape 4)

Les trois régimes de cure en laboratoire, illustrés dans la Figure 3.1, ont été sélectionnés en fonction des pratiques industrielles actuelles, de la composition des matériaux et des conditions réelles observées dans le climat canadien. Ils sont décrits comme suit :

1. Régime de cure à haute température (HT) : Ce régime implique une cure à une température élevée de $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour accélérer la perte d'eau du matériau, sans contrôle de l'humidité. Dans cette étude, l'humidité à l'intérieur de l'étuve a été mesurée pour permettre une comparaison appropriée avec les deux autres régimes ;
2. Régime de cure en deux étapes (2É) : Ce régime vise à fournir des conditions optimales pour chaque liant (bitume et ciment) en séparant la cure en deux étapes distinctes :
 - Étape 1 : Une cure de 3 jours à humidité relative ambiante et à une température de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour faciliter la perte d'eau et la rupture du liant bitumineux.
 - Étape 2 : Une cure de 25 jours à haute humidité relative (HR de 100 %) et à une température de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour favoriser l'hydratation du ciment.
3. Régime de cure à humidité relative cyclique (HRC) : Ce régime reproduit les conditions environnementales réelles sur le terrain en simulant les cycles jour/nuit, avec une variation de l'humidité relative sur des périodes de 12 heures, alternant entre une humidité relative ambiante (jour) et une humidité de 100% (nuit). L'objectif est d'évaluer l'impact des cycles d'humidité sur l'évolution des propriétés des matériaux.

3.1.5 Caractérisation des propriétés physiques et mécaniques (Étape 5)

Les régimes de cure ont été comparés en analysant trois paramètres : la perte en eau, la résistance à la traction indirecte (ITS) et le module de rigidité en traction indirecte (ITSM), mesurés aux âges de 1, 3, 7 et 28 jours.

- **Perte en eau**

La perte en eau a été suivie pour chaque régime de cure afin d'évaluer l'impact des conditions de cure sur la teneur en eau des matériaux.

- Pour les régimes HT et 2É, trois éprouvettes ont été pesées aux jours 1, 3, 7 et 28 après démoulage.
- Pour le régime HRC, les éprouvettes ont été pesées toutes les 12 heures, après le démoulage, pendant 28 jours, afin de déterminer les variations liées aux cycles d'humidité.

L'ANNEXE VII regroupe les détails des mesures de perte en eau pour chaque régime de cure étudié.

- **Essais ITS**

Les essais ITS ont été réalisés après un conditionnement à 25 °C, selon les régimes de cure :

- Pour le régime HT : les éprouvettes ont été placées dans une étuve fermée pendant un minimum de 4 heures.
- Pour les régimes 2É et CRH : les éprouvettes ont été scellées dans des sacs plastiques étanches, puis immergées dans un bain d'eau à 25 °C pendant un minimum de 2 heures.

Les méthodes de conditionnement ont été définies en fonction des équipements disponibles au début des trois régimes de cure, tout en respectant les exigences normatives.

L'ANNEXE VIII regroupe les détails des mesures des ITS effectuées pour chaque jour d'essai et pour chaque régime de cure.

- **Essais ITSM**

L'essai ITSM a également été réalisé à 25°C. Pour tous les régimes de cure, les éprouvettes ont été conditionnées dans une étuve fermée pendant un minimum de 4 heures avant chaque essai. Pour assurer une continuité dans les analyses, la même série d'éprouvettes a été utilisée tout au long du processus.

L'ANNEXE IX regroupe les détails des mesures des ITSM effectuées pour chaque jour d'essai et pour chaque régime de cure.

3.1.6 Cure à long terme sous différentes températures et HR (Étape 6)

Afin d'évaluer l'effet de la température et de l'HR sur le développement des propriétés mécaniques à long terme, les éprouvettes des matériaux formulés à l'émulsion ont été soumises à une cure étendue jusqu'à 90 jours, selon les conditions indiquées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Conditions de cure à long terme pour les matériaux formulés à l'émulsion

Durée de cure (jours)	HT	2É	HRC
28-56	38 ± 2°C en étuve	T = 23 ± 2°C + HR ambiante	T = 23 ± 2°C + HR ambiante
Essai ITSM à 56 jours de cure			
56-70	38 ± 2°C en étuve	T = 23 ± 2°C + HR 100%	T = 23 ± 2°C + HR 100%
Essai ITSM à 70 jours de cure			
70-90	38 ± 2°C en étuve	38 ± 2°C en étuve	38 ± 2°C en étuve
Essai ITSM à 90 jours de cure			

Les paragraphes suivants présentent en détail les différentes combinaisons de températures et d'HR appliquées aux matériaux formulés à l'émulsion pour l'étude de leurs propriétés à long terme.

- Régime HT : Les éprouvettes soumises à ce régime ont été maintenues dans une étuve à 38 ± 2 °C pendant toute la durée de l'étude, jusqu'à 90 jours. L'objectif principal était d'analyser l'effet des températures élevées sur le développement à long terme de la rigidité. Le module de rigidité a été mesuré aux jours 56 et 90.
- Régimes 2É et HRC : Les éprouvettes ont suivi un programme en trois phases :
 - Phase 1 (28-56 jours) : Exposition à une HR ambiante à 23 ± 1 °C pendant 28 jours, avec une mesure du module de rigidité au jour 56.
 - Phase 2 (56-70 jours) : Transfert dans un environnement à HR de 100 % et à 23 ± 1 °C pendant 14 jours. Une deuxième mesure du module de rigidité a été réalisée au jour 70.
 - Phase 3 (70-90 jours) : Placement des éprouvettes dans une étuve à 38 ± 2 °C pendant 20 jours pour simuler des températures élevées. La dernière mesure du module de rigidité a été effectuée au jour 90.

Pour les matériaux formulés à la mousse, les éprouvettes du régime HT ont suivi les mêmes conditions de cure étendue que celles formulées à l'émulsion (Tableau 3.4), tandis que celles des régimes 2É et HRC ont été soumises aux conditions présentées dans le Tableau 3.5.

Les différences observées dans les conditions de cure à long terme des régimes 2É et HRC entre les matériaux formulés à l'émulsion et à la mousse de bitume résultent principalement des disponibilités des équipements et du personnel au moment des essais. Néanmoins, ces ajustements ont été réalisés tout en respectant l'objectif initial d'examiner l'influence de la température et de l'HR sur le comportement à long terme des matériaux.

Tableau 3.5 Conditions de cure à long terme pour les matériaux formulés à la mousse après les régimes 2É et HRC

Durée de cure (jours)	2É	HRC
28-70	$T = 23 \pm 2^{\circ}\text{C} +$ HR ambiante	$T = 23 \pm 2^{\circ}\text{C} +$ HR ambiante
Essai ITSM à 70 jours de cure		
70-84	$T = 23 \pm 2^{\circ}\text{C} +$ HR 100%	$T = 23 \pm 2^{\circ}\text{C} +$ HR 100%
Essai ITSM à 84 jours de cure		
84-100	$38 \pm 2^{\circ}\text{C}$ en étuve	$38 \pm 2^{\circ}\text{C}$ en étuve
Essai ITSM à 100 jours de cure		

Les éprouvettes ont suivi un programme en trois phases :

- Phase 1 (28-70 jours) : Exposition à une HR ambiante à $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant 42 jours, avec une mesure du module de rigidité au jour 70.
- Phase 2 (70-84 jours) : Transfert dans un environnement à HR de 100 % et à $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant 14 jours. Une deuxième mesure du module de rigidité a été réalisée au jour 84.
- Phase 3 (84-100 jours) : Placement dans une étuve à $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 16 jours pour simuler des températures élevées. La dernière mesure du module de rigidité a été effectuée au jour 100.

3.2 Récapitulation des choix méthodologiques

Ce chapitre a permis de présenter en détail la méthodologie expérimentale adoptée dans cette étude, ainsi que les résultats des essais de formulation nécessaires à la compréhension des chapitres suivants. Il a également justifié les choix des matières premières utilisées ainsi que les normes appliquées pour leur caractérisation. De plus, la description approfondie des régimes de cure employés jusqu'à 28 jours, ainsi que des conditions de cure à long terme,

assure une compréhension précise du protocole expérimental. Ces éléments constituent une base essentielle pour l'interprétation des résultats exposés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 4

EFFECT OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY ON CEMENT-BITUMEN TREATED MATERIALS PRODUCED IN THE LABORATORY USING BITUMEN EMULSION OR FOAMED BITUMEN

Maher Ben Yahya^a, Sébastien Lamothe^a and Éric Lachance-Tremblay^a

^a Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec H3C 1K3, Canada

Article publié dans la revue « *Construction and Building Materials* »
en février 2025

4.1 Abstract

Full-depth reclamation (FDR) is an asphalt pavement rehabilitation technique that increases the structural capacity of deteriorated pavements while reducing costs, energy consumption, and resource use, compared to a reconstruction. Despite these advantages, FDR application remains limited, primarily due to gaps in knowledge regarding its design and quality control methods. The mechanical properties of FDR mixtures vary significantly with composition, making an appropriate curing period essential for optimal performance. This study investigates the effects of temperature and relative humidity on emulsion and foamed cement-bitumen treated materials (CBTM) used in FDR applications. Three curing regimes were compared by measuring water loss, indirect tensile strength, and indirect tensile stiffness modulus at 1, 3, 7, and 28 days for both emulsion and foam mixtures. Additionally, emulsion samples underwent extended curing up to 90 days to simulate and assess the long-term effects of climatic variations on material stiffness. Results showed that curing at high temperature and low relative humidity (first regime) produced the highest mechanical properties, while an extended transition from low to high humidity (second regime) reduced performance. Simulating nighttime conditions with 12-hour cycles of high humidity (third regime) delayed mechanical development. For emulsion samples, extended curing at high temperature and low humidity after 28 days did not significantly affect stiffness, while humidity and temperature variations influenced material

stiffness. These findings demonstrate CBTM's adaptability to varying environmental conditions, offering practical guidelines to predict long-term performance based on climate, enhance durability, and reduce construction timelines for FDR-treated pavements.

4.2 Introduction

Full-depth reclamation (FDR) is a pavement rehabilitation technique that pulverizes distressed asphalt and underlying materials to create a stabilized base layer (Morian et al., 2012). This technique is cost effective, environmentally sustainable and extends pavement lifespan, particularly when combined with stabilization (ARRA, 2015). Among the Cold Recycled Mixtures (CRM) produced through FDR, Cement-Bitumen Treated Materials (CBTM) are widely used due to their ability to balance stiffness and flexibility, making them resistant to traffic loads and environmental stresses (Cardone et al., 2015).

Despite these advantages, significant gaps remain in understanding the curing process of CBTM, which leads to the development of mechanical properties such as tensile strength and stiffness. Laboratory studies have focused primarily on fixed curing conditions, often neglecting the combined effects of temperature and humidity. Moreover, while both bitumen emulsion and foamed bitumen are commonly used as binders in FDR, limited research directly compares their curing behavior under identical conditions. A review of 151 studies on CRM highlighted this gap, showing that 121 studies used bitumen emulsion, 21 used foamed bitumen, and only 9 considered both stabilizers (Liu et al., 2022).

This research addresses these gaps by analyzing how curing conditions, involving combinations of temperature and relative humidity, influence the evolution of CBTM's physical and mechanical properties. Conditions were chosen based on Canadian industry practices and climate, providing practical guidelines to predict long-term performance and enhance the durability of FDR-treated pavements for diverse field applications.

The paper is organized as follows: The next section provides a detailed literature review on the FDR technique, its benefits, CBTM curing behavior, and laboratory curing practices. It also presents the volumetric composition of CBTM, a key aspect of the mix design in this study. Section 4.4 describes the experimental methodology, including material characterization, mix design, sample preparation, curing regimes, and testing procedures. Section 4.5 discusses the results, focusing on the impact of curing conditions on material properties. Finally, section 4.6 concludes with key findings and their relevance for field applications.

4.3 Literature review

FDR is an asphalt pavement rehabilitation process that creates a uniform, upgraded base layer by pulverizing the entire thickness of a distressed asphalt layer along with a portion of the underlying materials, up to depths of 300 mm (Morian et al., 2012). This process can be performed through simple in-situ pulverization, blending, grading, and compaction with water as the only additive, or by incorporating aggregates (virgin or recycled) and/or binders to enhance the quality and strength of the stabilized base, all without the addition of any heat (ARRA, 2015; Morian et al., 2012). Common binders include bitumen emulsion or foamed bitumen for bituminous stabilization and cement or lime for chemical stabilization. These stabilization methods can be combined to optimize pavement performance (ARRA, 2015; Braham, 2024).

The benefits of FDR include its cost-effectiveness, as it reuses existing asphalt and base materials to create a new base layer, eliminating the need to transport additional aggregates or dispose of old materials, thereby conserving valuable landfill space (Lamothe et al., 2024; Liu et al., 2023). FDR also enhances the structural capacity and lifespan of the pavement and with the addition of chemical or bituminous stabilizers and an asphalt overlay, the pavement's lifespan can reach 20 years, equivalent to that of full reconstruction (ARRA, 2015; Mousa et al., 2022). Additionally, FDR allows for roadway geometry corrections, such as adjustments to horizontal and vertical profiles (Jones et al., 2020; Xiao et al., 2018). A comparative environmental assessment of the FDR technique versus the conventional "Mill and Fill"

rehabilitation process for a base layer revealed, using life-cycle assessment (LCA), a notable 51% reduction in greenhouse gas (GHG) emissions and a significant 64% decrease in energy consumption when employing FDR (Souza et al., 2024). Similarly, another recent study compared three pavement rehabilitation methods: FDR with stabilization, FDR without stabilization, and traditional reconstruction to evaluate their environmental performance across multiple impact categories. Results highlighted significant environmental benefits of FDR with stabilization compared to traditional reconstruction, showing FDR as a better approach for advancing circular economy goals and reducing environmental impacts (Schmitt et al., 2025).

During the stabilization process, the binder content can produce a wide range of CRM with varying mechanical behaviors. Among these, CBTM are produced using 1 to 3% of bituminous binder, resulting in a less brittle, more flexible material, with the addition of 1 to 3% of cement to reduce moisture content and resist early raveling under traffic (Asphalt Academy, 2020; Godenzoni et al., 2018; Raschia, 2020). The combination of the bituminous binder and cement results in mechanical properties characterized by both stiffness and thermal sensitivity (Meocci et al., 2017).

CBTM are characterized by evolving behavior over time due to moisture content changes, resulting from evaporation, emulsion breaking, and cement hydration (Mignini et al., 2021). Initially, the moisture content corresponds to that chosen during compaction, whether in the field or in the laboratory. Over time, the moisture content in the material changes at varying rates depending on the environmental conditions. This process, known as curing, leads to the development of the material's mechanical properties, such as tensile strength and stiffness (Godenzoni, 2017).

Laboratory curing aims to simulate field curing conditions as closely as possible while accelerating the attainment of long-term properties (Tebaldi et al., 2014). However, replicating field conditions in a laboratory setting is challenging due to the variability and complexity of factors influencing field curing, which are difficult to standardize (Cardone et al., 2015). Therefore, several researchers have explored various laboratory curing times, temperatures,

and humidity levels to approximate effective field curing simulations. For example, the following conditions were used to represent Italy's typical seasons: summer – 28 days of curing at 40°C; spring and fall – 63 days at 20°C; and winter – 56 days at 5°C (Bocci et al., 2011). The authors concluded that curing at high temperatures accelerates stiffness development and leads to higher stiffness modulus values, whereas curing at lower temperatures slows the process but does not compromise the potential performance of the mixture. Another study used a curing time of 14 days at three temperatures (25, 40, and 60°C) with both ambient and controlled humidity at 50% (Goli et al., 2023). Their findings highlighted the critical importance of the first 3 days of curing in the material's strength development, showing that higher curing temperatures result in greater mechanical properties. They also observed that the presence of humidity reduced the rate of strength development. Other researchers used a curing duration of 100 days with two temperatures of $25 \pm 2^\circ\text{C}$ and $40 \pm 2^\circ\text{C}$ and a relative humidity of $70 \pm 5\%$, considering that high humidity offers a reasonable balance for curing both bituminous stabilizers and cement (Graziani et al., 2016). Their study showed that higher curing temperatures promote faster development of mechanical properties. Additionally, they noted that water loss during curing had a more pronounced effect on tensile strength evolution, whereas stiffness modulus was more closely linked to cement hydration.

To monitor the evolving behavior of CBTM, several studies (Graziani et al., 2018; Kim et al., 2011; Ogbo et al., 2022), have shown that evaluating both physical properties (water content) and mechanical properties (tensile strength and stiffness modulus) is effective in assessing laboratory curing regimes.

4.3.1 Volumetric properties of CBTM

The volumetric characterization of CBTM is essential in both mix design and quality control, as it affects the material's mechanical performance and durability. In mix design, the selection of compaction methods and energy levels is important, as the resulting density influences both the curing process and the resulting mechanical properties (Raschia, 2020). Additionally, the volumetric composition of CBTM evolves between its fresh state (during mixing and

compaction) and its cured state (in service) (Grilli et al., 2016, 2012). Therefore, a proper volumetric characterization ensures better control over the compaction process and the quality of the resulting samples.

In CBTM, reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates are not heated, so the aged bitumen from RAP does not act as an active binder, unlike the bitumen coming from the added binders. Therefore, RAP is considered a solid component, also known as "Black rock" (Godenzoni, 2017). During compaction, the residual bitumen in the emulsion act like a liquid, meaning at this stage, the emulsion with its two phases (residual bitumen and water) contributes to the lubrication of the aggregates, which influences the compaction of the material. However, after breaking, there is a separation between the water and the residual bitumen, causing them to act as distinct materials. For foamed bitumen, its contribution to the lubricating effect of water is minimal because, during mixing, foam bubbles burst and form tiny bitumen splinters. These splinters disperse by adhering to the finer particles and aged bitumen on RAP (Asphalt Academy, 2020). Only a small number of bitumen splinters attach to larger virgin aggregate particles during compaction, resulting in localized, non-continuous bonds, or "spot welding" (Asphalt Academy, 2020; Godenzoni, 2017). However, since both CBTM (produced with emulsion or foam bitumen) are treated as four-phase composites (with solids (aggregates and cement), bitumen, water, and air), using the same volumetric approach by considering a single liquid phase (foamed bitumen and water) is useful. This approach enables direct comparisons of mechanical properties and performance outcomes under similar conditions, thereby isolating the effect of the bituminous binder type on the material's behavior (Godenzoni, 2017).

In laboratory studies, it is more practical to use the saturated surface dried density (ρ_{SSD}) of the aggregate mix for the volumetric analysis of CBTM, given that the pre-dried aggregates are moistened before compaction (Grilli et al., 2012). Figure 4.1 presents the volumetric composition for both CBTM types used in this study where V_t represents the total volume of the material, V_s represents the volume of solids (cement and aggregate mix in SSD state), and VMA represents the volume of voids of the mineral aggregate, that is the porosity of the aggregate skeleton and which is filled by added bitumen, free water and air. It is important to

note that the total water content of the material includes the absorbed water and the free water. Free water is provided by the emulsion and the water added to improve workability and compaction for both foamed bitumen and emulsion mixes (Godenzoni, 2017; Raschia, 2020).

Component	Volume				
Air	V_{air}	V_m	---	VMA	V_t
Free water	$V_{w\ free}$		VFL		
Added bitumen	$V_{b\ add}$				
Absorbed water	$V_{agg\ SSD}$		V_s		
Aggregate					
Cement	V_c				

Figure 4.1 Volumetric composition of CBTM

Based on this information, the following volumetric parameters during compaction can be defined: voids in the material (V_m) and voids filled with liquids (VFL). Voids content (V_m) represents the sum of air voids and free water and it is calculated by the Equation (4.1).

$$V_m = \frac{V_{air} + V_{w, free}}{V_t} = \frac{V_t - V_{agg, SSD} - V_c - V_{b, add}}{V_t} \quad (4.1)$$

This parameter allows for the optimization of water dosage, bitumen dosage, and compaction energy to achieve a target V_m value (Raschia, 2020). Water and added bitumen occupy a significant volume and act as a liquid during compaction. Therefore, it is essential to consider the voids filled with liquids (VFL), which indicate the level of material saturation and are calculated by the Equation (4.2).

$$VFL = \frac{V_{w, free} + V_{b, add}}{V_{air} + V_{w, free} + V_{b, add}} = \frac{V_{w, free} + V_{b, add}}{VMA} = \frac{V_{w, free} + V_{b, add}}{V_t - V_{agg, SSD} - V_c} \quad (4.2)$$

Previous studies have shown that VFL values higher than 90% generally imply a visible loss of liquids and fines from the compaction mold, indicating that the actual sample composition may differ from the designed composition (Graziani et al., 2016; Grilli et al., 2012; Mignini et al., 2021). Therefore, it is important to consider and control both V_m and VFL in CBTM mix design.

4.4 Experimental program

4.4.1 Objective and Methodology

The objective of this study was to investigate the influence of different curing environments on the physical and mechanical properties of CBTM produced with emulsion or foamed bitumen. Various combinations of temperature and relative humidity were used to simulate three distinct curing conditions in laboratory. A CBTM mix design incorporating 1.5% cement served as the baseline, using either bitumen emulsion or foamed bitumen to evaluate how each binder type interacts with these conditions.

The three curing regimes, each lasting 28 days, were selected to reflect current industry practices material composition that prevails in Canada, and real field conditions, as detailed in section 4.4.2. Additionally, extended curing up to 90 days was applied to emulsion samples to evaluate the effects of prolonged temperature and humidity variations on material stiffness.

Figure 4.2 presents an overview of the research methodology followed for the current study. First, preliminary compaction tests were carried out to verify the compactibility of the mixtures and identify target moisture content for the testing samples based on their volumetric properties. After determining the optimum moisture content (OMC) for the chosen mix design, samples were compacted at a fixed V_m of 12% and a fixed height of 75mm. This ensured that the samples were ready for testing after undergoing the chosen curing regime. For each binder type (emulsion or foamed mixtures), three samples were prepared for ITS testing at curing ages of 1 day, 3 days, 7 days, and 28 days, resulting in a total of 36 samples per binder type for the three curing regimes. For ITSM testing, three samples were used per curing regime, resulting

in 9 samples per binder type. Combined, a total of 90 samples were prepared and tested. Foamed bitumen samples were demolded immediately after compaction, whereas bitumen emulsion samples were subjected to overnight preliminary curing in the mold at an ambient temperature of 20 to 23°C. The purpose of this preliminary step was to increase the material's cohesion and prevent breaking during demolding.

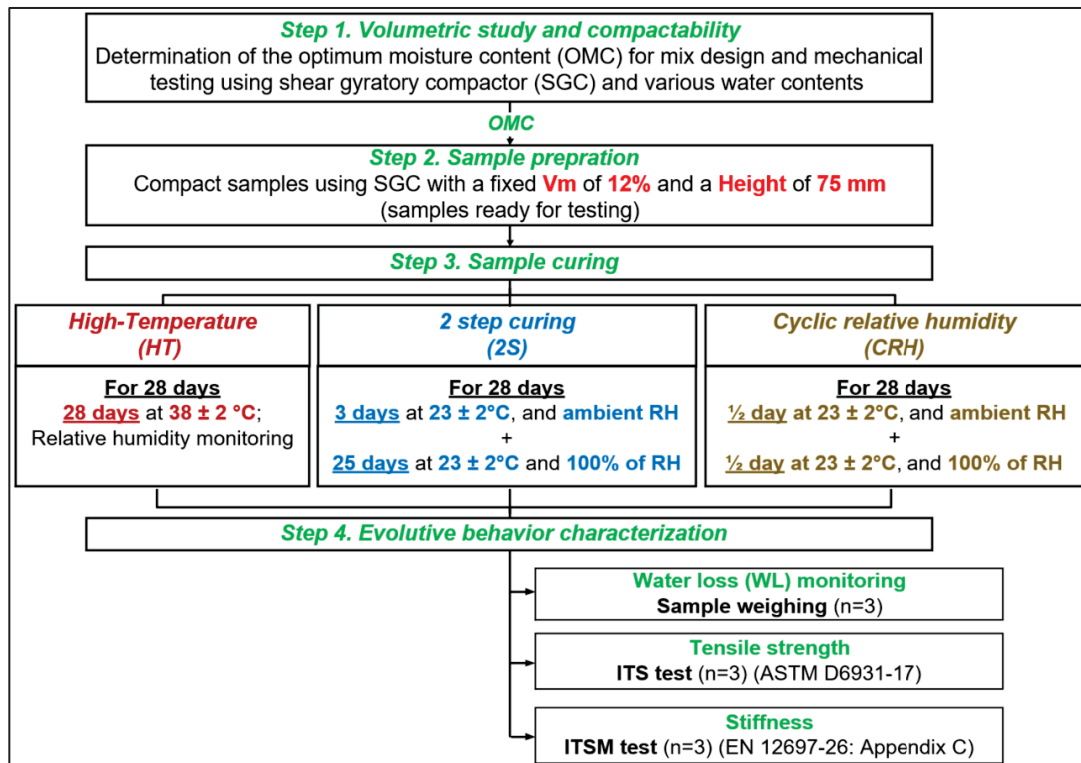


Figure 4.2 Overview of the methodology of the study

4.4.2 Laboratory curing regimes and conditions

The three laboratory curing regimes used in this study, as shown in Figure 4.2, were selected based on current industry practices, material composition, and real field conditions that are observed in Canadian climate. They are described as follows:

1. High temperature curing regime (HT): This regime involved curing at a high temperature of 38°C to accelerate water loss from the material, without any humidity

control. In this study, humidity inside the oven was measured/monitored to enable a proper comparison with the second and third curing regimes.

2. Two-step curing regime (2S): The goal of this regime is to provide favorable conditions for each binder (bitumen and cement) by separating the laboratory curing into two distinct steps.
 - Step 1 consists of a 3-day cure at low RH (30%) and a temperature of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ to facilitate water loss and the cure of the bituminous binder and;
 - Step 2 consists of a 25-day cure at high RH (near 100%) and a temperature of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ to promote cement hydration.
3. Cyclic relative humidity curing regime (CRH): This regime aims to reproduce real field environmental conditions by simulating day/night cycles through varying RH over 12-hour periods, alternating between low (day: RH of 30%) and high humidity (night: RH of 100%). The goal is to evaluate the impact of humidity cycles on the evolution of material properties.

Figure 4.3 presents a chart plan of the target temperatures and relative humidity values for each curing regime.

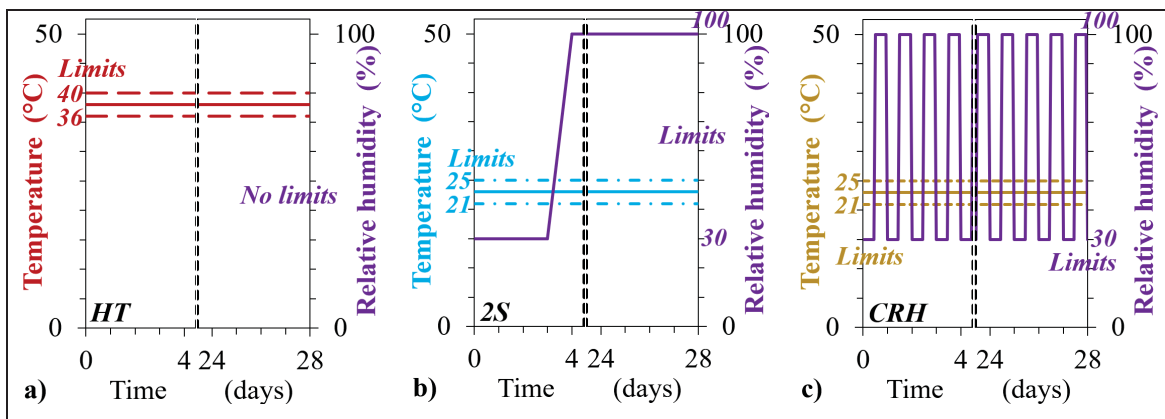


Figure 4.3 Chart plan of target temperatures and relative humidity for the: a) HT regime; b) 2S regime; c) CRH regime

4.4.3 Materials

CBTM samples for this study were produced in the laboratory using RAP, virgin aggregates (VA), Portland cement (C) and bitumen emulsion or, foamed bitumen. The bitumen emulsion used in this study was a cationic slow-setting emulsion (CSS-1). The foamed bitumen was produced in the laboratory using a PG58S-28 bitumen and a Wirtgen WLB10 foaming device, with target parameters set for an expansion ratio of 10 and a half-life of 6 seconds, considered optimal for foamed bitumen applications. The cement used in the mixtures was a general-use (GU) type (CSA A3000 classification). The main properties of the presented components are summarized in Tableau 4.1. Standards and test methods used were from the following organizations: 1) from Quebec province, Ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD), Laboratoire des Chaussées (LC), 2) from Canada, Canadian Standard Association (CSA) and, 3) from United States, American Society for Testing Materials (ASTM).

The added bitumen and cement contents used in the mix design (as a percentage of the dry aggregate mass) were 3.0% and 1.5%, respectively. This corresponds to an emulsion dosage of 4.61% (water + bitumen) and a foamed bitumen content of 3.0%, resulting in a bitumen-to-cement ratio (B/C) of 2.

Tableau 4.1 Properties of CBTM components

Component		Property	Unit	Value	Standard or test method
Virgin aggregate (VA)	Coarse	Grading	mm	0 - 20 ^a	MTMD 2101
		Bulk Density	---	2.655	LC 21-065, -066 & -067
		Apparent Density	---	2.744	LC 21-065, -066 & -067
		Absorption	%	1.21	LC 21-065, -066 & -067
	Fine	Grading	mm	0 -5 ^a	MTMD 2101
		Bulk Density	---	2.628	LC 21-065, -066 & -067
		Apparent Density	---	2.742	LC 21-065, -066 & -067
		Absorption	%	1.57	LC 21-065, -066 & -067
Reclaimed asphalt pavement (RAP)		Grading	mm	0 - 10 ^a	MTMD 2101
		Bitumen content	% mass	4.6	LC 26-006
		Bulk Density	---	2.381	LC 21-065, -066 & -067
		Apparent Density	---	2.492	LC 21-065, -066 & -067
		Absorption	%	1.88	LC 21-065, -066 & -067
Bitumen emulsion (BE)		Type	Letters	CSS-1 ^b	ASTM D2397
		Bitumen grade	PG Hn-L ^c	58S–28	MTMD 4101
		Bitumen content	% mass	65.1	ASTM D6997
Foam bitumen (FB)		Bitumen grade	PG Hn-L ^c	58S–28	MTMD 4101
		Temperature	°C	175	---
		Cold water added ^d	% mass	4	---
Cement (C)		Use	---	General	CSA A3000
		f _c ^e	MPa	43.9	ASTM C109
^a Nominal Maximum Aggregate Size (NMAS).					
^b Cationic Slow Setting with Low viscosity.					
^c Performance Grade defined by High temperature, Traffic level and Low temperature.					
^d Added to hot bitumen during foam production (% by weight of bitumen).					
^e Compressive strength at 28-day.					

The aggregate blend requirements to be met were those for a recycled material of type MR-5 according to Quebec's provincial standard BNQ 2560-600 (Bureau de Normalisation du Québec). The recycled material was composed of 35% RAP, 60% coarse VA and 5% of fine VA. Tableau 4.2 shows the results of the sieve analysis performed on the aggregates used, as well as the grading of the aggregate blend and the required specifications.

Tableau 4.2 Grading distribution of aggregates and blend, and required grading specifications

Sieve (mm)	Passing at each sieve (%)				
	RAP 0-10	VA 0-20	VA 0-5	Blend	Specifications*
40	100	100	100	100	100
31.5	100	100	100	100	---
28	100	100	100	100	80 - 100
14	100	73	100	83.8	50 - 90
5	65	36	97	49.2	25 - 55
0.315	6	11	20	9.7	5 - 20
0.080	0.6	8.8	12	6.1	3 - 10
* Specifications according to « <i>Ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD)</i> » in Quebec for FDR work (Laboratoire des chaussées, 1996).					

4.4.4 Mix design and sample preparation

For emulsion samples, the total water content (W_{tot}) was composed by water from the emulsion (W_{em}) and additional water (W_{add}), added in two phases. The first part (W_{abs}) corresponded to the water absorption of the aggregate blend, which was added to the dry aggregate blend. The wet aggregate blend was then sealed in a plastic bag for a minimum of 12 hours at room temperature to ensure homogeneous moisture conditions and allow for absorption by the aggregate. Next, the remaining water and the binders were added in the following order: Portland cement, remaining water to reach the target water content and finally bitumen emulsion. After each addition, the blend was mixed manually until it had a uniform appearance. The entire mixing process required five to eight minutes, starting with the addition of cement.

Preliminary compaction tests were carried out using a shear gyratory compactor (SGC) and following this protocol: 150 mm diameter mold, constant pressure of 600 kPa, gyration rate of 30 rpm, and an inclination angle of 1.16° . The objective was to identify the water content to be used for the preparation, curing and mechanical testing of samples. The procedure was based on the volumetric properties of CBTM, compacted at a fixed number of gyrations of 180 gyrations. Sample height was recorded at each gyration, during the compaction allowing for the monitoring of V_m and VFL. As the number of gyrations increases, V_m decrease while VFL increase until it reaches 100%, which signifies the theoretical saturation condition of the

sample. However, visual confirmation showed that when VFL approaches 90%, there is a loss of material (including water, bitumen droplets, and fines) from the mold. These results led to choosing $W_{\text{tot}} = 3.07\%$ as the optimum moisture content (OMC) for the mix design, meaning that the free water during the mixing process corresponds to that coming from the emulsion.

Similar to emulsion, foam samples were designed with the same volumetric composition considering that foamed bitumen does not include water and consequently, the free water (water coming from emulsion in the case emulsion mix) is represented only by the water added in the mixture. First, water corresponding to the aggregate absorption was added to the batch, then sealed in a plastic bag for at least 12 hours at room temperature. A twin-shaft pug-mill type mixer was used as it provides a mixture quality similar to site mixes (Asphalt Academy, 2020) and allows easy connection to the foaming device for direct discharge of the foam into the mixer. The mixing process followed this sequence: wet aggregates and cement were added to the mixer and blended for 60 seconds. While mixing, the remaining water was added to ensure a good distribution throughout the aggregate blend. Finally, the foam was discharged directly into the mixer, and the material was mixed for an additional 30-60 seconds (Raschia et al., 2018).

Both emulsion and foamed samples compacted at a fixed V_m content of 12% reached a VFL value of 52%, indicating that they were far from saturation.

4.4.5 Water loss monitoring and mechanical testing program

The ITS 28-day series was used to monitor water loss (WL), following the demolding of the samples for each curing regime. The goal was to evaluate how different curing conditions influence water content in CBTM materials. For the HT and 2S regimes, samples were weighed on days 1, 3, 7, and 28 to measure their water content. For the CRH regime, samples were weighed every 12 hours, simulating daily cycles, over 28 days. The WL was calculated using Equation (4.3).

$$WL(\%) = \frac{W_0 - W_i}{W_0} \times 100 \quad (4.3)$$

where WL represents the water loss after i curing days, W_0 is the initial moisture content of the sample after demolding, and W_i is the moisture content of the sample after i curing days, calculated with (4.4).

$$W_i(\%) = W_0 - \frac{M_0 - M_i}{M_0} \times 100 \quad (4.4)$$

where M_0 is the initial mass of the sample after demolding, and M_i is the mass of the sample after i curing days.

4.4.5.1 Indirect tensile strength (ITS)

The ITS test was performed according to ASTM D6931, after conditioning the samples at 25°C. For the HT regime, samples were placed in a closed oven for a minimum of 4 hours. For the 2S and CRH regimes, samples were placed in a leak-proof plastic bag and then in a water bath for a minimum of 2 hours. The test involves loading the sample across its vertical diametral plane and recording the peak load at failure, which is then used to calculate the ITS strength of the sample according to Equation (4.5).

$$ITS(kPa) = \frac{2000 \times P(N)}{\pi \times t(mm) \times D(mm)} \quad (4.5)$$

where ITS is the tensile strength of the sample, P is the maximum compressive load, t is the sample thickness (or height) before testing and D is the sample diameter.

4.4.5.2 Indirect tensile stiffness modulus (ITSM)

To measure the stiffness of the samples after curing, an indirect tensile stiffness modulus (ITSM) test was performed using an MTS device based on the standard EN 12697-26 (Annex

C). The test was conducted after conditioning the samples at 25°C in a closed oven for a minimum of 4 hours. The test involves measuring the average stiffness modulus after applying 5 pulses with a rise time of 124 ± 4 ms and a pulse repetition period of 3.0 seconds. For each pulse, the stiffness modulus is obtained by Equation (4.6).

$$ITSM(MPa) = \frac{F(N) \times (0.27 + \nu)}{z(mm) \times h(mm)} \quad (4.6)$$

where F is the peak load of the applied repeated pulse, z is the amplitude of the horizontal deformation, h is the height (or thickness) of the sample tested and ν is the Poisson's ratio (assumed as 0.35). For each sample, the test was repeated along the vertical and horizontal diameters, and the final stiffness modulus value is the average of both measurements.

4.5 Results and analysis

4.5.1 Recorded temperature and relative humidity

Temperature and RH were recorded using a USB data logger, with data sampled every hour throughout the curing process. Figure 4.4 presents the daily averages of temperature and RH for the HT and 2S curing regimes, as well as the recorded hourly temperature and RH values for the CRH regime. These measurements were taken from the demolding of the samples until day 28 of curing.

As shown at Figure 4.4a, for the HT curing regime, temperature was consistently maintained at $38^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, and the RH remained very low, with an average of 17% over the entire curing period. For the 2S curing regime (Figure 4.4b), the samples were cured in a closed environmental chamber at ambient relative humidity and a temperature of $23 \pm 1^\circ\text{C}$ for the first 3 days. Following this, the samples were transferred to a humid chamber with a fixed RH of 100% and a temperature of $23 \pm 1^\circ\text{C}$ for the next 25 days. The lowest RH recorded during the first 3 days was 41%*, and the highest was 50%*, which is slightly higher than the target values

(*measured value per hour, not averaged daily). For the CRH regime the lowest and highest ambient RH recorded were 36% and 58%, respectively.

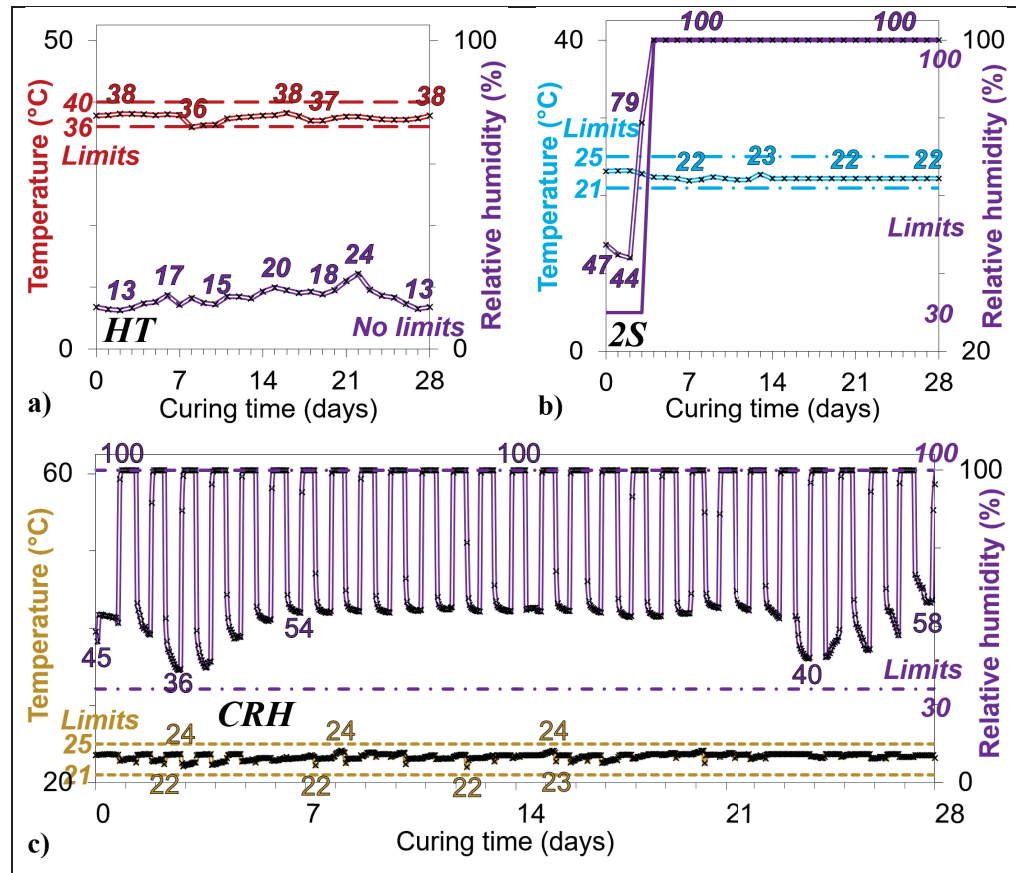


Figure 4.4 Recording of temperature and relative humidity for 28 days: a) HT curing regime (daily average values); b) 2S curing regime (daily average values); c) CRH curing regime (recorded values per hour)

4.5.2 Water loss monitoring from 1 to 28 days

The evolution of water loss in both materials throughout the studied curing regimes is presented Figure 4.5. The values shown represent the average weight of three samples for each regime. For the HT curing regime, we can see that after just one day of curing, water loss values are 48% for emulsion mixtures and 56% for foam. The rate of water loss decreases over time as water content starts approaching an equilibrium state, by day 7 for both emulsion and foam. By day 28, water loss reached 74% for emulsion and 79% for foam. Overall, it appears

that water loss is similar for both emulsion and foam when subjected to high temperature curing.

In the first step of the 2S curing regime (3 days at 23°C and ambient RH), water loss values are 49% for emulsion and 56% for foam. These values after 3 days of curing are very similar to those observed after 1 day for HT, confirming that a higher temperature in the case of HT has the effect of accelerating water loss. After transferring the samples to the humid chamber at 100% RH, a reverse trend was observed, with water content increasing instead of continuing to decrease. By day 7, water loss compared to the initial values was reduced to 31% for emulsion and 48% for foam. By day 28, emulsion mixtures not only recovered all the water lost but also surpassed its initial water content, indicating that no water loss occurred. Similarly, foam reached 10% WL by day 28, indicating near-complete water content recovery. Therefore, no equilibrium state was observed for this curing regime.

For the CRH regime water loss evolution was relatively similar for emulsion and foam. The use of alternating humidity cycles (12 hours at 30% and 12 hours at 100%) revealed that CBTM materials tend to lose water faster in dry environments than they regain it in humid environments. The rate of water loss for this curing regime seems similar to HT, but the amplitude of water loss is much smaller. Moreover, this curing regime did not allow an equilibrium state to be reached after 28 days.

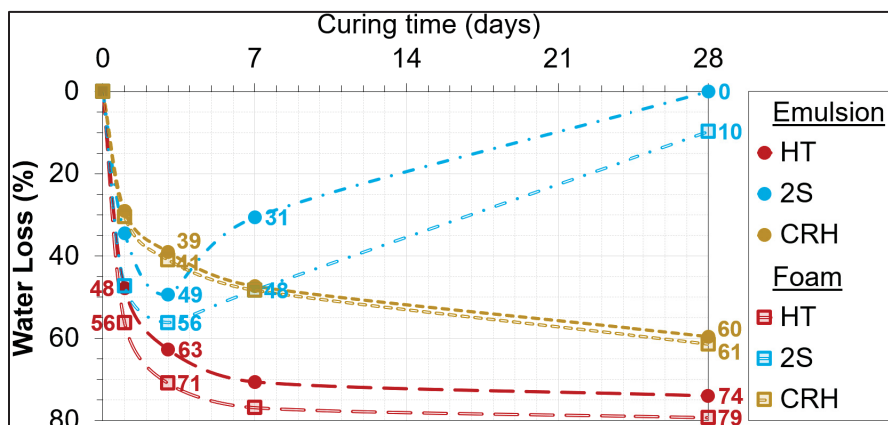


Figure 4.5 Evolution of water loss for emulsion and foam mixtures according to the studied curing regimes (n = 3)

4.5.3 Indirect Tensile Strength results from 1 to 28 days

Figure 4.6 illustrates the evolution of ITS values for emulsion and foam mixtures under the studied curing regimes. Each series represents the average of three tested samples, with error bars indicating the standard deviation. The coefficient of variation for all results remained within 16%.

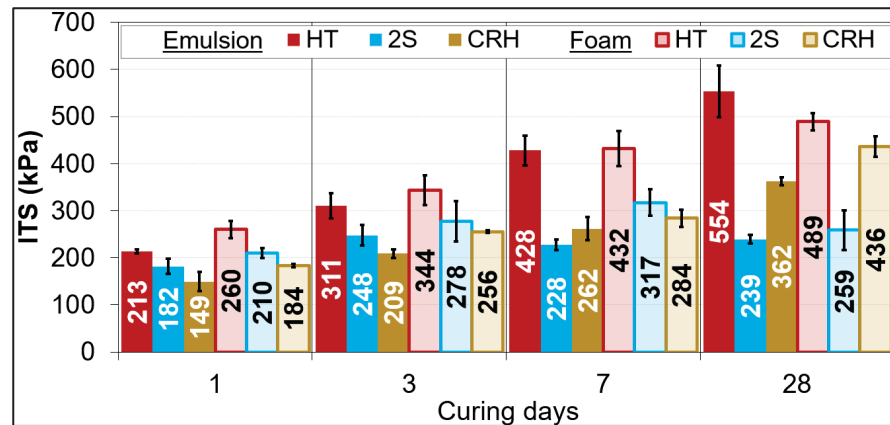


Figure 4.6 Evolution of ITS for emulsion and foam mixtures according to the 3 curing regimes from 1 to 28 days (n = 3)

Curing under high temperature (HT) with uncontrolled RH produced the highest ITS values for both emulsion and foam mixtures (Figure 4.6). During the early stages (1 and 3 days), emulsion mixtures showed lower ITS values than foam, with 213 and 311 kPa for emulsion compared to 260 and 344 kPa for foam, respectively. By day 7, both materials achieved comparable results, with emulsion at 428 kPa and foam at 432 kPa. However, after 28 days, emulsion mixtures surpassed foam, recording ITS values of 554 and 489 kPa, respectively. This suggests that, when cured at high temperatures, mixes made with foamed bitumen have a higher short-term tensile strength than mixes with emulsion, while in the long term, mixes with emulsion have the highest tensile strength.

In the 2S curing regime, ITS values showed progress in the first step (3 days), with emulsion increasing from 182 kPa at day 1 to 248 kPa at day 3 and foam from 210 kPa at day 1 to 278 kPa at day 3. However, transferring the samples to a 100% RH (second step) notably affected both materials. For emulsion mixtures, this transition led to a slight decrease in ITS values to

228 kPa at day 7, while foam tensile strength continued to increase at a slower rate, reaching 317 kPa. After 28 days, foam mixtures showed a drop to 259 kPa, whereas emulsion showed minimal change reaching a value of 239 kPa. This indicates that curing in a high RH environment tends to slow or even reduce the evolution of tensile strength over time.

The CRH regime showed the slowest development of tensile strength in comparison with HT and 2S. On day 1, emulsion mixtures had a value of 149 kPa, and foam was higher at 184 kPa. By day 3, the ITS values of emulsion (209 kPa) and foam (256 kPa) mixtures approached those of the HT regime on day 1, indicating a delayed tensile strength progression. By day 28, emulsion reached 362 kPa, while foam reached 436 kPa, confirming that although cyclic humidity delays strength development in comparison with high temperature and low relative humidity (HT regime), it does not prevent long-term tensile strength growth. Moreover, the ITS results show that the impact of cyclic exposure to humidity variations is less pronounced for foam mixes than for emulsion mixes. Indeed, at day 28, the ITS values for the emulsion mix were 554 and 362 kPa, with a difference of 192 kPa under the HT and CRH cures, respectively. For foam, the ITS values were 489 and 436 kPa, under HT and CRH cures, respectively, with a difference of 53 kPa. This suggests that foamed bitumen mixes are less sensitive to moisture variations than emulsion mixes in terms of tensile strength development.

4.5.4 Indirect Tensile Stiffness Modulus results

4.5.4.1 Curing time: 1 to 28 days

Figure 4.7 illustrates the evolution of ITSM values for both emulsion and foam mixtures from 1 to 28 days under the studied curing regimes. Each series represents the average of the three tested samples, with error bars indicating the standard deviation. The coefficient of variation generally remaining within 25%. Exceptions include emulsion mixtures cured for 28 days under the 2S regime (40%), where a sample's plastic wrap was slightly torn, resulting in increased humidity exposure, and foam mixtures cured for 1 day under the HT regime, which had a coefficient of variation of 27%.

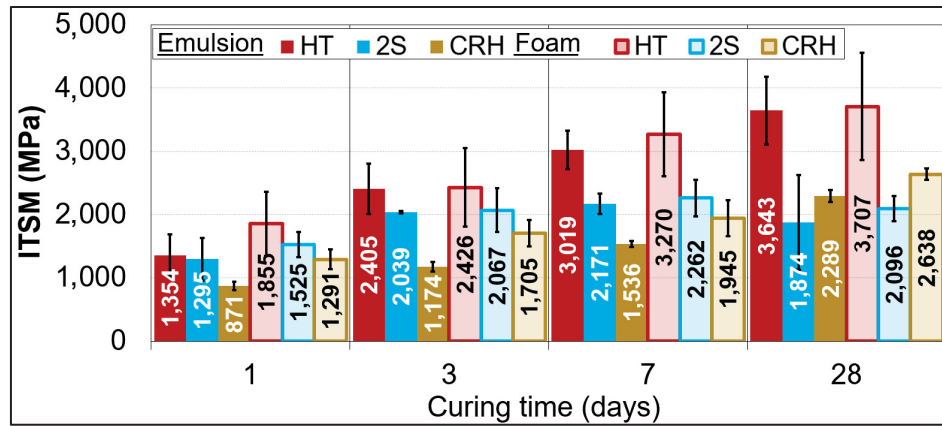


Figure 4.7 Evolution of ITSM for emulsion and foam mixtures according to the 3 curing regimes from 1 to 28 days (n = 3)

In Figure 4.7, results show that similar to tensile strength values, the HT-curing regime resulted in the highest ITSM values. However, stiffness modulus values for foam mixtures were higher than those for emulsion throughout the 28 days of curing, reaching 3,707 MPa, while emulsion reached 3,643 MPa by day 28. For the 2S curing regime, stiffness modulus increased during the first step (3 days), with foam displaying higher values than emulsion. After transitioning to high RH conditions, stiffness development slowed down, emulsion's stiffness modulus increased from 2,039 MPa on day 3 to 2,171 MPa on day 7, while foam's stiffness modulus increased from 2,067 MPa to 2,262 MPa. By day 28, stiffness modulus values had decreased to 1,874 MPa for emulsion and 2,096 MPa for foam, indicating that prolonged curing in high RH conditions (2nd step of 2S regime) reduces material stiffness. These results once again, show that foam mixtures seem to be less sensible to moisture exposition compared to emulsion mixtures. Under the CRH regime, stiffness development was slower compared to both the HT and early stages of the 2S regime, as the use of cyclic humidity delayed the progression of both indirect tensile strength (Figure 4.6) and stiffness modulus (Figure 4.7). However, stiffness modulus continued to increase over time, with emulsion mixtures reaching 2,289 MPa and foam reaching 2,638 MPa by day 28.

4.5.4.2 Curing time: 28 to 90 days

To further investigate the effect of temperature and relative humidity on long-term stiffness, emulsion samples underwent extended curing up to 90 days under different conditions presented in Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Extended curing conditions for emulsion mixtures

Curing time (days)	Curing regime		
	HT	2S	CRH
28-56	38±2°C in the oven	T = 23±1°C + ambient RH	T = 23±1°C + ambient RH
56-70	38±2°C in the oven	T = 23±1°C + 100% RH	T = 23±1°C + 100% RH
70-90	38±2°C in the oven	38±2°C in the oven	38±2°C in the oven

For HT curing set of samples, the same curing parameters (38°C and low relative humidity) were maintained for up to 90 days. The aim was to verify the effect of exposure to elevated temperature on the development of stiffness modulus over a long period of time. Stiffness modulus was assessed after 56 and 90 days. For 2S and CRH curing set of samples, after exposure to 100% RH, the samples were subjected to exposure to ambient humidity and temperature of 23°C for a period of 28 days, the stiffness modulus was then evaluated at 56 days. The samples were then returned to an environment with high relative humidity (100%) for a period of 14 days (total of 70 days). The stiffness modulus was once again evaluated. Finally, the samples were placed in an oven at 38°C and low relative humidity for a period of 20 days, after which the final stiffness modulus was evaluated (total 90 days). The aim was to verify the effect of prolonged exposure to various temperature and humidity conditions on stiffness modulus development. Emulsion-treated mixes were chosen for this portion of the study as they showed higher sensitivity to humidity. Extended curing results of emulsion mixtures are presented in Figure 4.8.

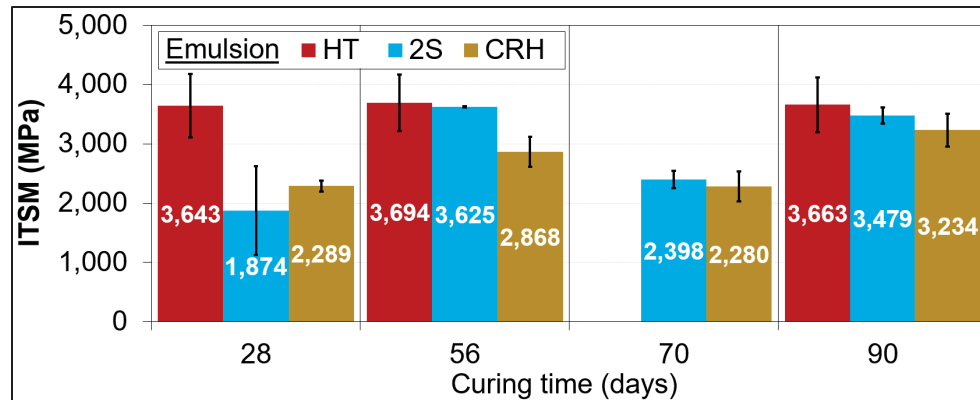


Figure 4.8 Extended curing results of ITSM for emulsion mixtures (n = 3)

Initially, for HT curing, prolonged exposure to high temperature and low relative humidity for a further 62 days (28 to 90 days) did not appear to have any effect on stiffness modulus evolution (Figure 4.8). Indeed, the modulus values measured after 56 and 90 days are very similar to the values measured at 28 days. These results suggest that exposure to high temperature and low relative humidity for 28 days enables the ultimate stiffness modulus of the material to be measured. For the 2S curing regime, where samples were transferred from 100% RH (28 days) to ambient RH (56 days), there was a significant increase in stiffness caused by changes in humidity exposure. ITSM values reached 3,625 MPa by day 56, which is similar to the stiffness observed under HT conditions. This suggests that material stiffness temporarily decreases when subjected to high RH environments, but regains and even surpasses its initial values once transferred to drier conditions. However, continued curing in high RH for another 14 days caused a notable reduction in ITSM, with values dropping to 2,398 MPa by day 70, confirming the material's sensitivity to relative humidity. Further curing at 38°C for an additional 20 days led to a stiffness increase, as ITSM values reached 3,479 MPa by day 90, showing that stiffness loss in high RH is reversible when reintroduced to higher temperatures or drier environments. Samples under the CRH regime were subjected to the same alternating temperature and RH curing conditions presented in Tableau 4.3. ITSM increased from 2,289 MPa on day 28 to 2,868 MPa after 28 days of ambient RH (Figure 4.8). However, like in the 2S regime, a 14-day curing period at 100% RH resulted in a decrease in stiffness, with ITSM values dropping to 2,280 MPa by day 70. Once cured at 38°C for another 20 days, stiffness showed a significant increase, reaching 3,335 MPa by day 90, confirming

that the long-term stiffness of CBTM varies significantly depending on climatic conditions the materials are exposed to.

4.5.5 Correlation between ITS and ITSM results from 1 to 28 days

To better understand the effect of curing conditions on the development of indirect tensile strength and indirect stiffness modulus, examining their correlation provides a more comprehensive understanding of CBTM's mechanical performance. Figure 4.9 shows a strong linear correlation between ITSM and ITS for both materials under the HT and CRH regimes. This linear relationship suggests that, for these curing regimes, there is a steady progression in both tensile strength and stiffness modulus over time, but according to a different rate of growth. However, under the 2S regime, where extended exposure to 100% RH occurs, the development of ITS and ITSM values diverges. This results in a slower growth or even a decrease in mechanical properties, causing deviations from the regression line and leading to lower coefficients of determination (R^2) for both foam and emulsion. These observations indicate that while the HT and CRH regimes maintain a unique linear relationship between indirect tensile strength and indirect stiffness evolution, this correlation does not hold for the 2S regime. Mechanical properties in the 2S regime are highly influenced by the amount of moisture absorbed (Figure 4.5) and the duration of exposure to high RH, leading to the observed variations in both ITS and ITSM values.

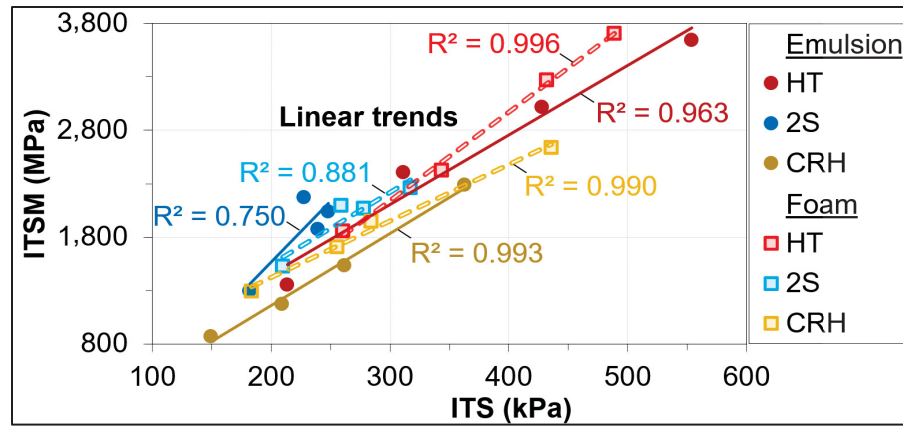


Figure 4.9 Correlation between ITSM and ITS according to the studied curing regimes for emulsion and foam mixtures (datapoint: n = 3)

4.5.6 Influence of curing time on ITS and ITSM values

A statistical study was conducted to evaluate the impact of curing time on ITS and ITSM values from 1 to 28 days, following the same approach. A one-way ANOVA was performed for each curing regime and type of binder separately. Tableau 4.4 presents the results from the one-way ANOVA results for 1 to 28 days comparison. The results revealed significant differences for both ITS and ITSM values across curing times ($F\text{-value} > F\text{-crit}$ and $p\text{-value} < 0.05$). This means that for all the curing combinations evaluated, the results obtained after 28 days are significantly different from those evaluated after 1 day. A 28-day laboratory cure is therefore appropriate for assessing the effect of temperature and/or humidity on indirect tensile strength and indirect stiffness modulus development regardless of the type of curing involved

Tableau 4.4 One-way ANOVA results for ITS and ITSM values from 1 to 28 days for each mixture (significance level = 0.05)

Curing regime	ITS values					
	Emulsion			Foam		
	F-Value	P-Value	F-Crit	F-Value	P-Value	F-Crit
HT	55.543	0.000	4.066	40.055	0.000	4.066
2S	11.122	0.003	4.066	5.261	0.026	4.066
CRH	83.972	0.000	4.066	160.549	0.000	4.066
Curing regime	ITSM values					
	Emulsion			Foam		
	F-Value	P-Value	F-Crit	F-Value	P-Value	F-Crit
HT	34.574	0.000	3.098	10.997	0.000	3.098
2S	9.445	0.000	3.098	8.730	0.001	3.098
CRH	132.723	0.000	3.098	34.445	0.000	3.098

Following this, pairwise comparisons using t-tests with Bonferroni correction were conducted to identify which specific curing times differed. This post hoc test is applied only after an initial analysis indicates statistically significant differences, to determine where those differences lie. The Bonferroni correction is a statistical method used to adjust the significance level when performing multiple comparisons in a dataset. Without this adjustment, conducting multiple hypothesis tests increases the probability of detecting false positives meaning that results that appear significant purely by chance (a Type I error). To address this, the Bonferroni correction reduces the threshold for statistical significance by dividing the original significance level ($\alpha = 0.05$) by the number of comparisons (Haynes, 2013). In this study, the significance level was adjusted to $\alpha = 0.05/3$ where 3 is the number of comparisons conducted per curing regime. The detailed results of the statistical tests are shown in Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Pairwise Comparisons for ITS and ITSM values from 1 to 28 days (adjusted significance level = 0.017)

Curing regime and number of days	ITS values			
	Emulsion		Foam	
HT	p-Value	Significance	p-Value	Significance
1D vs 3D	0.003	True	0.016	True
3D vs 7D	0.008	True	0.034	False
7D vs 28D	0.025	False	0.076	False
2S	p-Value	Significance	p-Value	Significance
1D vs 3D	0.013	True	0.057	False
3D vs 7D	0.221	False	0.253	False
7D vs 28D	0.244	False	0.117	False
CRH	p-Value	Significance	p-Value	Significance
1D vs 3D	0.010	True	0.000	True
3D vs 7D	0.025	False	0.056	False
7D vs 28D	0.003	True	0.001	True
Curing regime and number of days	ITSM values			
	Emulsion		Foam	
HT	p-Value	Significance	p-Value	Significance
1D vs 3D	0.000	True	0.085	False
3D vs 7D	0.013	True	0.032	False
7D vs 28D	0.037	False	0.304	False
2S	p-Value	Significance	p-Value	Significance
1D vs 3D	0.001	True	0.010	True
3D vs 7D	0.185	False	0.278	False
7D vs 28D	0.167	False	0.237	False
CRH	p-Value	Significance	p-Value	Significance
1D vs 3D	0.000	True	0.005	True
3D vs 7D	0.000	True	0.173	False
7D vs 28D	0.000	True	0.001	True

First, the results show that for the HT regime, significant differences in ITS and ITSM were observed between 1 and 3 days, as well as between 3 and 7 days for emulsion, with no significant differences between 7 and 28 days (Tableau 4.5). This indicates that emulsion mixtures achieved most of its indirect tensile strength and indirect tensile stiffness modulus gain after 7 days. For foam, a significant difference in ITS was observed only between 1 and 3 days, with no significant differences between other curing times for both ITS and ITSM,

suggesting a rapid gain in strength and stiffness in early curing stages, with slower progression afterward. Overall, the results of the statistical analysis show that the effect of exposure to high temperature and low humidity leads to rapid development of the material's properties, and that this effect is even more marked for mixtures with foam.

Under the 2S regime, significant differences were observed between 1 day and 3 days for ITS and ITSM values of emulsion and for ITSM values of foam, while no significant differences were seen for other curing times (Tableau 4.5). This confirms the negative effect of prolonged exposure to high relative humidity on the development of the material properties.

For the CRH regime, no significant differences were observed between 3 and 7 days for ITS values of emulsion and for ITS and ITSM values of foam, but significant differences were observed between 7 and 28 days, suggesting a slower gain in indirect tensile strength and indirect tensile stiffness modulus during this intermediate period for both emulsion and foam.

For the extended curing results, the evaluation of the influence of extended curing time on ITSM values was conducted only for the HT regime, as the conditions (temperature and RH) vary significantly across the different curing durations in the extended 2S and CRH regimes. This variation means that changes in ITSM could result from a combined effect of time and changing environmental conditions, rather than curing time alone. The statistical study, performed using a one-way ANOVA (Tableau 4.6), confirmed that there is no significant impact of extended curing time on ITSM values within the HT regime. This suggests that evaluation of the stiffness modulus at 28 days following exposure to high temperature and low relative humidity reveals what appear to be the ultimate properties of the material.

Tableau 4.6 One-way ANOVA results for extended HT-ITSM values (significance level = 0.05)

Curing regime	Emulsion		
	F-Value	p-Value	F-Crit
HT	0.017	0.984	3.682

4.6 Conclusion

The present study aimed to evaluate the effect of temperature, relative humidity and curing time on cement-bitumen treated materials (CBTM) produced with bitumen emulsion and with foamed bitumen, characterized by the same volumetric composition. The evolution of physical and mechanical properties of CBTM during curing were monitored in order to evaluate the effect of curing environments and the impact of changing the bituminous binder in the mix design. Additionally, emulsion samples underwent extended curing up to 90 days under different conditions to evaluate the impact of long-term temperature and relative humidity variations on material stiffness. The main findings are presented in the following paragraphs.

Elevated curing temperatures and low relative humidity (curing regime HT: 38°C and an average of 17% of RH) accelerates water evaporation in the material, while high relative humidity (100%: curing regimes 2S and CRH) slows evaporation process and can increase water content. Foamed bitumen mixtures lose water faster than emulsion mixtures, reaching equilibrium more quickly under high-temperature and/or dry environment.

The indirect tensile strength (ITS) and indirect tensile stiffness modulus (ITSM) results show that foam bitumen mixtures achieve higher short-term tensile strength and stiffness modulus under high-temperature and low-humidity curing compared to emulsion mixtures. However, long term properties (ITS and ITSM) converge for both mixtures. High relative humidity slows or reduce the evolution of those properties but does not hinder long term evolution. Cyclic humidity delays development compared to high-temperature and low relative humidity curing, but still allows for long term evolution. Foamed bitumen mixtures showed lower sensitivity to moisture variations than emulsion mixtures, as reflected in their indirect tensile strength and indirect tensile stiffness modulus at 28 days.

Prolonged curing results (until 90 days) show that 28 days of high-temperature and low-humidity curing (HT curing) is sufficient to determine the material's ultimate stiffness modulus, as no significant differences were observed between 28- and 90-days results. Also, a 28-day cure is an appropriate timeframe for assessing the effect of temperature and/or humidity on ITS and ITSM development, regardless of the type of curing involved.

Moreover, the outcomes of prolonged curing under varying relative humidity (ambient vs. 100%) demonstrated that the loss of stiffness modulus experienced by the material when subjected to high relative humidity is reversible. The stiffness modulus increases when the material is subsequently exposed to an environment with low relative humidity. Consequently, long-term stiffness modulus is significantly influenced by the climatic conditions to which the material is exposed.

These findings provide practical guidelines for predicting the long-term physical and mechanical behavior of CBTM in FDR-treated pavements, enhancing durability and reducing construction time under diverse climatic conditions. Future research should explore the effects of varying binder contents in mix design, focusing on resistance to rutting or fatigue. Additionally, an environmental assessment of greenhouse gas (GHG) emissions from foamed and emulsion mixtures is recommended to identify the more sustainable stabilization method.

CHAPITRE 5

SOMMAIRE DES RÉSULTATS PUBLIÉS ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS NON PUBLIÉS

Ce chapitre a pour objectif de présenter un sommaire des résultats exposés dans CHAPITRE 4, ainsi que les résultats de la cure étendue des matériaux formulés avec la mousse de bitume. La synthèse des résultats publiés vise à établir une base de comparaison entre les performances des matériaux formulés avec l'émulsion et ceux à la mousse de bitume sur le long terme.

Les résultats de la cure étendue des matériaux à la mousse n'ont pas été intégrés dans l'article en raison des différences de durées de cure adoptées entre les matériaux formulés à la mousse et à l'émulsion, notamment pour les régimes 2É et HRC, rendant leur suivi et leur comparaison directe plus complexes. Toutefois, ces résultats apportent des éléments essentiels pour mieux comprendre l'évolution à long terme des matériaux formulés à la mousse de bitume en fonction des conditions de température et d'humidité relative.

5.1 Sommaire des conclusions de l'article

L'étude présentée au CHAPITRE 4 a exploré l'influence du temps, de la température et de l'HR sur les propriétés évolutives (physiques et mécaniques) des MTCB. Les matériaux, formulés avec de l'émulsion de bitume ou de la mousse de bitume, ont été étudiés selon des compositions volumétriques identiques pour assurer une comparaison juste. L'évolution de la teneur en eau, de la résistance à la traction indirecte (ITS) et du module de rigidité en traction indirecte (ITSM) a été étudiée sur une période de 28 jours sous trois régimes de cure distincts : 1) HT : haute température ($38 \pm 1^\circ\text{C}$) ; 2) 2É : cure en deux étapes (3 jours à $23 \pm 1^\circ\text{C}$ et humidité ambiante suivis de 25 jours à $23 \pm 1^\circ\text{C}$ et 100% RH) ; 3) HRC : humidité relative cyclique (cycles jour/nuite alternant 12 heures à HR ambiante et 12 heures à HR de 100%). Les résultats obtenus ont permis d'identifier plusieurs observations, détaillées dans les paragraphes suivants.

1. Effet de la température et de l'HR sur les propriétés physiques et mécaniques à **28 jours** :

- Une cure à haute température de $38 \pm 1^\circ\text{C}$ et faible HR (moyenne de 17%) accélère la perte d'eau dans le matériau, permettant d'atteindre rapidement un état d'équilibre hydrique.
- Une cure dans un environnement caractérisé par une forte HR (100%) ralentit la perte d'eau et mène à une augmentation de la teneur en eau pour des expositions prolongées.
- En termes de propriétés mécaniques, le régime à HT produit les valeurs les plus élevées pour l'ITS et l'ITSM.
- Une cure prolongée dans un environnement à haute HR peut ralentir et même réduire le développement de la résistance à la traction et du module de rigidité.

2. Effet du **procédé de retraitement** :

- Les matériaux traités avec de la mousse de bitume perdent de l'eau plus rapidement que ceux traités avec de l'émulsion de bitume, atteignant un équilibre hydrique plus rapidement, en particulier sous le régime à HT.
- Pour la cure HT, à court terme (3 jours), les matériaux à la mousse de bitume présentent des valeurs d'ITS et d'ITSM plus élevées que ceux à l'émulsion. Cependant, à long terme (28 jours), les propriétés mécaniques convergent pour les deux types de liants.
- Les matériaux à la mousse de bitume se montrent moins sensibles aux variations de l'HR que ceux à l'émulsion, en termes de résistance à la traction et de module de rigidité, particulièrement sous la cure HRC.

3. Évolution du module de rigidité des MTCB à l'émulsion de bitume sous différentes conditions (**28 à 90 jours**) : Une cure à long terme a été réalisée sur les matériaux à l'émulsion afin d'évaluer l'impact des variations climatiques à long terme sur la rigidité :

- Sous le régime à HT, la rigidité mesurée à 28 jours présente la valeur ultime du matériau, puisqu'aucune évolution significative n'ayant été observée jusqu'à 90 jours.
- Les régimes de cure impliquant des environnements à haute HR ont montré une diminution temporaire de la rigidité. Cependant, cette perte est réversible lorsque le matériau est remis dans des conditions sèches ou à haute température.

Les sections suivantes présenteront les résultats des essais de module de rigidité à long terme pour les matériaux formulés avec la mousse de bitume. L'objectif est d'évaluer l'impact du procédé de retraitement sur l'évolution de la rigidité après 28 jours de cure et d'analyser la sensibilité des matériaux traités à la mousse aux variations environnementales. Ces résultats seront systématiquement comparés à ceux des matériaux formulés à l'émulsion afin d'approfondir l'analyse comparative et de mieux caractériser les différences de comportement mécanique à long terme entre les deux types de liants.

5.2 Cure à long terme pour les matériaux formulés à la mousse de bitume

5.2.1 Cure sous le régime à haute température

Les éprouvettes des matériaux formulés à la mousse de bitume, ayant subi une cure sous le régime HT pendant 28 jours, ont été soumises à une cure étendue jusqu'à 90 jours, conformément à la section 3.1.6 du CHAPITRE 3. Le module de rigidité, déterminé par l'essai ITSM, a été mesuré aux jours 56 et 90, en appliquant la même méthodologie que celle utilisée pour les matériaux formulés à l'émulsion. Pour faire la comparaison, les résultats de l'émulsion ont également été ajoutés. Les résultats des essais ITSM réalisés tout au long du régime HT pour les deux types de liants sont illustrés à la Figure 5.1.

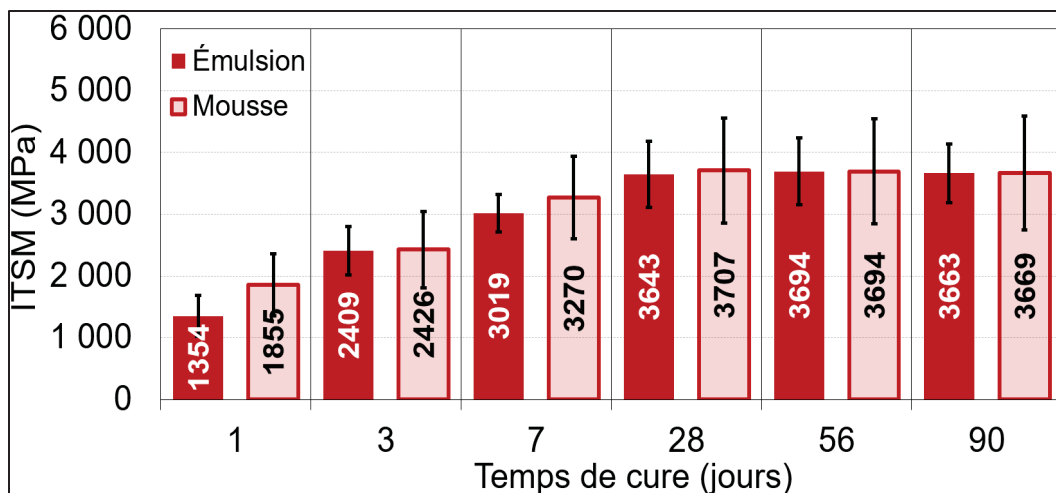


Figure 5.1 Résultats de la cure à long terme sous le régime HT pour les deux liants

Les résultats indiquent que similairement aux matériaux formulés avec l'émulsion, le module de rigidité des matériaux formulés à la mousse de bitume devient pratiquement stable après 28 jours de cure sous une température de 38°C et une humidité relative faible (moyenne de 17%).

Afin d'évaluer l'impact d'un temps de cure supplémentaire sur les valeurs du module de rigidité, une analyse statistique a été réalisée à l'aide d'une analyse de variance à un facteur. Comme présenté dans le Tableau 5.1, les résultats confirment que pour les matériaux formulés à la mousse de bitume, la cure prolongée sous HT n'a pas d'effet statistiquement significatif sur le module de rigidité ($p\text{-value} = 0,997 > 0,05$).

Ce constat confirme les conclusions obtenues pour les matériaux formulés à l'émulsion et indique que, sous ces conditions de cure, la rigidité mesurée à 28 jours représente la valeur ultime du module de rigidité pour les deux types de liants.

Tableau 5.1 Résultats de l'analyse de variance à un facteur pour le temps de cure prolongé sous le régime HT pour les matériaux à la mousse de bitume (niveau de signification = 0,05)

Régime de cure	Mousse		
	F-Value	p-Value	F-Crit
HT	0,003	0,997	3,682

Une étude similaire menée par Graziani et al. (2016), a évalué l'impact d'une cure prolongée sur le module de rigidité des MTCB soumis à une température de 40 ± 2 °C et une humidité relative de 70 ± 5 %. Des essais ITSM ont été réalisés aux jours 1, 3, 7, 14, 28 et 100, et les résultats ont révélé que pour des MTCB formulés avec un ratio B/C = 2 (2 % de bitume résiduel provenant de l'émulsion et 1 % de ciment), le module de rigidité atteignait une valeur asymptotique d'environ 4000 MPa dès le 14^e jour, et cette rigidité restait pratiquement constante jusqu'au 100^e jour.

Bien que les conditions de cure de cette étude diffèrent légèrement de celles adoptées dans la présente recherche, les matériaux formulés à la mousse de bitume montrent un comportement similaire, avec un module de rigidité stable à partir du 28^{ème} jour de cure.

Pour évaluer davantage les différences entre les matériaux à la mousse et ceux à l'émulsion, des tests-t indépendants à deux échantillons (éprouvettes) ont été réalisés pour chaque jour de cure afin de déterminer si les valeurs du module de rigidité différaient significativement entre les deux types de liants. Les résultats de ces tests sont résumés dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 Résultats des tests-t indépendants comparant les valeurs ITSM des matériaux : mousse vs émulsion pour chaque jour de cure (niveau de signification = 0,05).

Jour de cure	p-Value	Signification
1 Jour	0,056	FAUX
3 Jours	0,943	FAUX
7 Jours	0,395	FAUX
28 Jours	0,874	FAUX
56 Jours	0,999	FAUX
90 Jours	0,988	FAUX

Les résultats des tests t montrent que, bien que les matériaux à la mousse de bitume aient présenté des valeurs d'ITSM légèrement supérieures à celles des matériaux à l'émulsion après 1 jour de cure à haute température, cette différence observée n'est pas statistiquement significative ($p\text{-value} > 0,05$). Cette tendance se confirme pour toutes les périodes de cure suivantes, aucune différence statistiquement significative n'étant observée entre les valeurs du module de rigidité des deux types de liants aux jours 3, 7, 28, 56 et 90.

Ces résultats suggèrent que, même si les matériaux à la mousse semblent présenter un module de rigidité légèrement supérieur à court terme (3 jours à haute température), cette différence n'est pas statistiquement significative. Par conséquent, le choix du type de procédé (émulsion ou mousse) utilisé pour la formulation ne semble pas influencer la rigidité à long terme.

5.2.2 Cure à long terme après les régimes en deux étapes et à humidité cyclique

Après avoir subi les régimes 2É et HRC à 28 jours, les éprouvettes ont été transférées à une HR ambiante et une température de 23 °C pour une période de 42 jours supplémentaire et un total de 70. Le module de rigidité a ensuite été évalué à 70 jours. Par la suite, les éprouvettes ont été replacées dans un environnement à forte HR (100 %) pour une période de 14 jours (total de 84 jours). Le module de rigidité a de nouveau été évalué. Enfin, les éprouvettes ont été placées dans une étuve à 38 °C et à faible humidité relative pour une période de 16 jours et le module de rigidité final a été mesuré (total de 100 jours). Comme pour les matériaux formulés avec l'émulsion, cette démarche vise à étudier l'évolution du module de rigidité des matériaux à la mousse de bitume en fonction de différentes conditions environnementales à long terme. Les résultats des essais d'ITSM sur les matériaux à la mousse, ainsi que les conditions de cure avant chaque essai sont présentées dans la Figure 5.2.

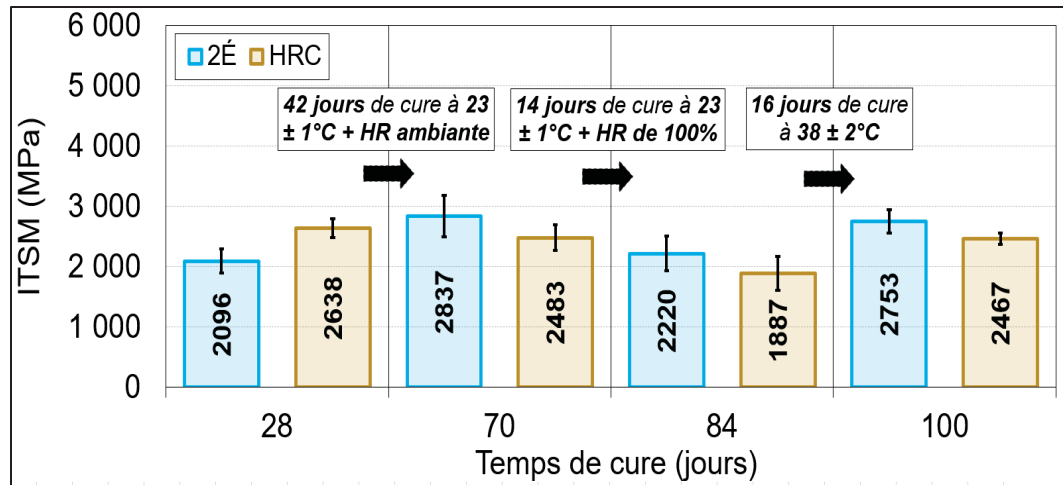


Figure 5.2 Évolution de l'ITSM à 23°C après cure à long terme sous les régimes 2É et HRC pour les matériaux formulés à la mousse de bitume

Pour le régime de cure en 2É, où les éprouvettes ont été transférées d'une HR de 100 % (28 jours) à une humidité ambiante (70 jours), une augmentation de la rigidité a été observée, due aux changements dans les conditions d'humidité. La moyenne des modules a atteint 2837 MPa à 70 jours, suivant une tendance similaire à celle observée pour les matériaux à l'émulsion. Toutefois, même avec une exposition plus longue à une humidité ambiante (14 jours supplémentaires par rapport aux éprouvettes à l'émulsion), le taux d'augmentation du module de rigidité était plus faible que celui des matériaux à l'émulsion.

Une cure supplémentaire de 14 jours dans un environnement à haute HR a également provoqué une diminution de la moyenne des modules. De manière similaire aux éprouvettes à l'émulsion, une cure supplémentaire à 38 °C pendant 16 jours a conduit à une augmentation de la rigidité. Cependant, comme présenté dans la Figure 5.2, la moyenne des modules de rigidité diminue de 617 MPa après 14 jours de cure à une HR de 100 %, puis augmente de 533 MPa après une cure supplémentaire à haute température, comparé à une baisse de 1227 MPa et une augmentation de 1081 MPa pour les matériaux à l'émulsion (4.5.4.2 du CHAPITRE 4).

Les éprouvettes soumis au régime de cure à HRC ont été exposés aux mêmes conditions alternantes de température et d'HR décrites au CHAPITRE 3. La moyenne des modules a légèrement diminué après 42 jours de cure sous une humidité ambiante, passant de 2638 MPa

à 28 jours à 2483 MPa (Figure 5.2). Cette tendance diffère de celle observée pour les matériaux à l'émulsion au CHAPITRE 4, où une cure supplémentaire dans des conditions d'humidité ambiante augmentait la rigidité du matériau. Une période de 14 jours de cure à 100 % d'HR a entraîné une diminution de la rigidité, suivant une tendance similaire pour les deux types de matériaux. Cependant, une cure supplémentaire à 38 °C pendant 16 jours a montré une augmentation de la rigidité.

Pour les deux cures étendues (2É et HRC), les matériaux formulés avec la mousse de bitume suivent une évolution similaire à ceux formulés avec l'émulsion, alternant entre une diminution et une augmentation de la rigidité en fonction des conditions environnementales. Toutefois, les variations du module de rigidité sont moins marquées pour les matériaux à la mousse de bitume, indiquant une moindre sensibilité aux changements d'humidité et de température. De plus, la perte de rigidité observée sous une humidité élevée, pour les deux types de matériaux, est réversible lorsque les éprouvettes sont replacées dans des conditions sèches ou à haute température.

Ces résultats, combinés aux observations de la cure à long terme sous le régime HT, confirment que le choix du liant bitumineux dans la formulation des MTCB ne doit pas se baser uniquement sur la rigidité du matériau et son comportement face aux variations climatiques. Il doit également être argumenté par d'autres considérations, telles que l'impact environnemental et le coût de fabrication.

CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'influence de différents environnements de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux traités au ciment et au bitume (MTCB) au cours du temps, en utilisant soit de l'émulsion, soit de la mousse de bitume. Ces matériaux, issus de la technique du retraitement en place pour la réhabilitation des chaussées, présentent un comportement flexible grâce à la présence de bitume, tout en bénéficiant d'une rigidité élevée à jeune âge due à l'ajout de ciment. L'enjeu principal de cette recherche était de combler les lacunes existantes dans la caractérisation de ces matériaux, en particulier en ce qui concerne leur processus de cure, un facteur clé dans le développement de leurs propriétés mécaniques. Ce processus est fortement influencé par des phénomènes liés à la composition, tels que l'évolution de la teneur en eau, la rupture de l'émulsion et l'hydratation du ciment. Afin de reproduire en laboratoire les conditions réelles de cure sur le terrain, la méthodologie adoptée devait tenir compte de la composition du matériau, de la forme et des dimensions des éprouvettes, ainsi que du choix de la température et de l'humidité relative les plus représentatives des conditions de la région concernée.

Dans ce contexte, la revue de la littérature a mis en évidence l'intérêt du retraitement en place comme solution efficace et durable pour la réhabilitation des chaussées. Cette technique offre des avantages significatifs sur les plans technique, économique et environnemental, notamment en renforçant la capacité portante des structures de chaussée et en prolongeant leur durée de vie. Les MTCB se distinguent par un comportement mécanique évolutif au cours du temps, phénomène connu sous le nom de cure des matériaux. Cependant, ce phénomène reste un défi pour les chercheurs, en particulier pour la caractérisation en laboratoire, où les conditions de cure sur le terrain sont difficiles à reproduire en raison de la variabilité et de la complexité des facteurs environnementaux. Au Québec, les pratiques actuelles de caractérisation en laboratoire reposent sur des directives empiriques qui ne tiennent pas compte de la variabilité climatique, limitant ainsi le plein potentiel de cette technique. De plus, la majorité des recherches existantes se concentrent sur des paramètres fixes de température et d'humidité, sans analyser leur effet combiné. Par ailleurs, bien que l'émulsion et la mousse de

bitume soient couramment employées, peu d'études comparent directement leur comportement dans des conditions identique.

Pour répondre à ces enjeux, un programme expérimental a été conçu en tenant compte du climat et des pratiques industrielles au Québec. Ce programme, présenté dans le CHAPITRE 3, visait à évaluer l'effet de différentes conditions de cure sur les propriétés évolutives des MTCB. Dans un premier temps, une étude volumétrique des matériaux avec de l'émulsion a été réalisée afin de déterminer la teneur en eau optimale à employer pour la fabrication des éprouvettes. Puis, des éprouvettes représentatives des couches de matériaux recyclés ont été fabriquées avec de l'émulsion de bitume et de la mousse de bitume. Ces éprouvettes ont été caractérisées par la même composition volumétrique afin d'assurer une comparaison juste. Par la suite, le suivi de la teneur en eau, de la résistance à la traction et du module de rigidité a été effectué sur une période de 28 jours sous trois régimes de cure distincts, caractérisés par différentes combinaisons de température et d'humidité relative. Enfin, une cure étendue a été adoptée afin d'examiner le comportement à long terme des MTCB sous divers climats.

Les résultats et analyses, détaillés dans les CHAPITRES 4 et 5, ont conduit aux conclusions présentées dans les paragraphes suivants.

Une cure à haute température (38°C) et faible humidité relative (moyenne de 17%) accélère la perte d'eau et favorise un développement rapide des propriétés mécaniques, tandis qu'une cure sous forte humidité relative (100%) ralentit la perte d'eau et peut temporairement réduire la rigidité. Toutefois, cet effet est réversible lors du retour à des conditions sèches ou chaudes. L'utilisation des cycles d'humidité relative (de 30 à 100 %), pour simuler les conditions sur terrain, a conduit à un ralentissement dans l'évolution des propriétés, tout en permettant une progression continue à long terme.

En ce qui concerne le procédé de retraitement, les matériaux produits avec la mousse de bitume présentent des propriétés mécaniques légèrement supérieures à court terme (3 jours) par rapport à ceux formulés avec de l'émulsion. Cependant, après 28 jours, ces différences

s'atténuent et les deux procédés de retraitement montrent des performances équivalentes. De plus, les matériaux à la mousse de bitume se révèlent moins sensibles aux variations d'humidité, ce qui est confirmé par les résultats de la cure à long terme dans le CHAPITRE 5.

Enfin, les propriétés mécaniques mesurées après 28 jours de cure à haute température et faible humidité relative (régime HT) n'ont pas présenté d'augmentation significative, indiquant que les valeurs obtenues à 28 jours représentent les caractéristiques ultimes des matériaux pour les deux types de liants. De plus, à long terme, les différences observées entre les matériaux formulés avec l'émulsion et la mousse disparaissent, ce qui suggère qu'à long terme, le type de liant choisi n'a pas d'effet sur la rigidité.

Cette étude présente néanmoins certaines limites. La formulation employée reposait sur des teneurs fixes en liants, choisies de manière empirique conformément aux pratiques actuelles de l'industrie de la construction routière au Québec. Ce choix restreint l'exploration d'autres formulations susceptibles d'améliorer les performances des matériaux. De plus, la comparaison des procédés de retraitement s'est limitée aux propriétés physiques et mécaniques évaluées en laboratoire, sans inclure d'analyse approfondie des impacts environnementaux, économiques ou des performances en conditions réelles sur le terrain. Une corrélation entre les résultats obtenus en laboratoire et ceux mesurés sur le terrain permettrait de mieux comprendre le comportement des matériaux et de vérifier si leur évolution en laboratoire reflète fidèlement celle observée en conditions réelles. Par ailleurs, l'étude du ratio bitume/ciment (B/C) et son optimisation pourraient être approfondies afin de mieux cerner l'impact de ce paramètre sur les propriétés finales des MTCB.

Malgré ses limitations, cette recherche fournit une base solide pour la prédiction du comportement des matériaux et pour l'optimisation des pratiques de cure des couches recyclées. En proposant une méthodologie expérimentale adaptée, elle renforce la pertinence du retraitement en place comme une solution durable et performante. L'intégration de ces connaissances dans les pratiques industrielles actuelles pourrait non seulement aider les décideurs à concevoir des infrastructures plus résilientes, mais également répondre aux défis

des générations futures en prévoyant le comportement des matériaux dans des conditions réelles.

RECOMMANDATIONS

Sur la base des conclusions de cette recherche, les recommandations suivantes sont proposées pour explorer davantage le comportement des MTCB et optimiser leur utilisation dans les travaux de retraitement en place :

- Formulations alternatives : La présente étude s'est limitée à une formulation avec des teneurs fixes en liants, conformément aux pratiques québécoises actuelles. Il est recommandé d'explorer différentes teneurs en liants, notamment des ratios bitume/ciment (B/C) inférieurs à 1. Ces études permettraient d'évaluer l'impact de la variation des liants sur la résistance à l'humidité des matériaux traités recyclés.
- Températures employées pour les essais du module de rigidité : Pour mieux représenter les conditions climatiques de la région étudiée, il est recommandé d'élargir les plages de températures utilisées pour le conditionnement et les essais mécaniques. Cela permettrait d'évaluer la sensibilité thermique des matériaux et d'anticiper leur comportement sous des climats extrêmes.
- Influence de la teneur en eau sur la rigidité des matériaux : Cette étude a présenté l'évolution de la perte en eau dans le matériau en fonction des conditions de cure employées. Toutefois, une analyse approfondie de la relation entre la teneur en eau résiduelle et l'évolution des propriétés mécaniques des MTCB, notamment la rigidité permettra d'identifier davantage le lien entre ces deux paramètres.
- Investigation de la fatigue et de la déformation permanente : Les propriétés mécaniques des MTCB, étudiées dans cette recherche, ne couvrent pas les aspects liés à la fatigue ou à la déformation permanente. Il est recommandé d'intégrer des essais cycliques pour évaluer la résistance des matériaux aux charges répétées, simulant les conditions de trafic.

- Évaluation environnementale et économique : La comparaison entre l'émulsion de bitume et la mousse de bitume dans cette étude s'est concentrée sur les propriétés physiques et mécaniques des MTCB. Pour une évaluation globale, il serait pertinent de mener une analyse approfondie des impacts environnementaux (émissions de GES, consommation énergétique) et des coûts associés à chaque type de liant. Cela fournirait des bases solides pour orienter le choix des liants en fonction des objectifs de durabilité.
- Corrélation laboratoire/terrain : Les résultats obtenus en laboratoire ne prennent pas toujours en compte les conditions réelles sur le terrain. Il est recommandé de réaliser des études sur chantier pour corréler les résultats expérimentaux avec les performances réelles des matériaux en service. Ces travaux devraient inclure un suivi détaillé des propriétés mécaniques au cours du temps, ainsi que des données sur les conditions climatiques et le trafic.

En mettant en œuvre ces recommandations, il serait possible de maximiser l'efficacité et la durabilité des travaux de retraitement en place, tout en répondant aux exigences environnementales, économiques et techniques des infrastructures routières modernes.

ANNEXE I

DÉTAILS DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS

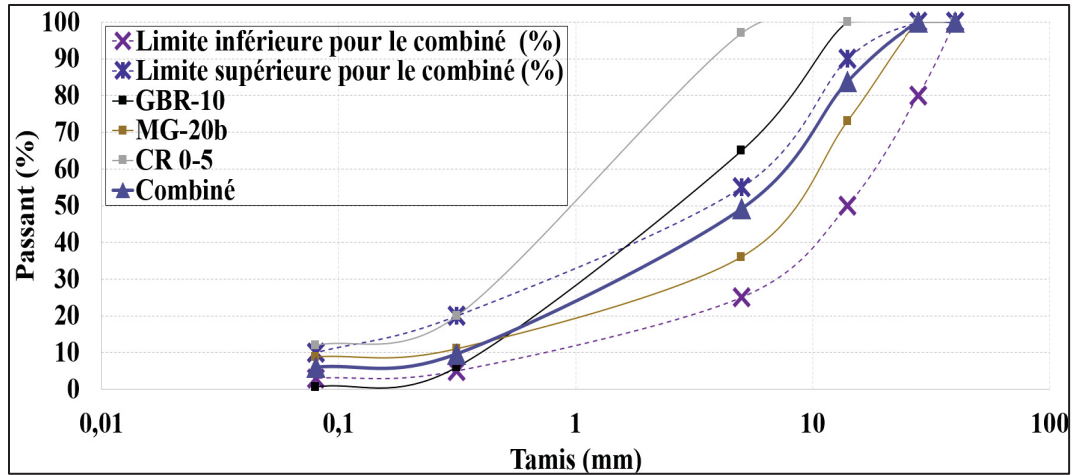


Figure-A I-1 Granulométrie des différents composants, du combiné et du fuseau granulométrique à respecter

Tableau-A I-1 Résultats de l'analyse granulométrique des différents composants, du combiné et exigences à respecter

	% des passants à chaque tamis				
Tamais (mm)	MG-20b	GBR 0-10	CR 0-5	Combiné	Exigences
28	100	100	100	100	80-100
20	92	100	100	96	--
14	73	100	100	84	50-90
10	59	96	100	74	--
5	36	65	97	49	25-55
2,5	26	43	65	34	--
1,25	18	28	41	23	--
0,63	14	17	27	16	--
0,315	11	6	19	10	5-20
0,16	10	1	15	7	--
0,08	9	1	12	6	3-10

ANNEXE II

DÉTAILS DES ESSAIS DE DENSITÉ ET D'ABSORPTION

Tableau-A II-1 Résultats des essais de densité et d'absorption des différentes fractions granulaires des granulats étudiés

MG-20b							
Fraction	Proportion	Abs par fraction	Abs moyenne	Densité brute par fraction	Densité brute moyenne	Densité apparente par fraction	Densité apparente moyenne
0-2,5	26%	2,35%	1,21%	2,603	2,655	2,772	2,744
2,5-5	10%	0,95%		2,672		2,742	
d>5	64%	0,79%		2,675		2,733	
GBR-10							
Fraction	Proportion	Abs par fraction	Abs moyenne	Densité brute par fraction	Densité brute moyenne	Densité apparente par fraction	Densité apparente moyenne
0-2,5	43%	2,17%	1,88%	2,293	2,381	2,413	2,492
2,5-5	22%	1,34%		2,462		2,546	
d>5	35%	1,86%		2,445		2,562	
CR 0-5							
Fraction	Proportion	Abs par fraction	Abs moyenne	Densité brute par fraction	Densité brute moyenne	Densité apparente par fraction	Densité apparente moyenne
0-2,5	35%	3,02%	1,57%	2,538	2,628	2,748	2,742
2,5-5	65%	0,80%		2,680		2,738	

ANNEXE III

FICHE TECHNIQUE DE L'ÉMULSION DE BITUME EMPLOYÉE

ATTESTATION DE CONFORMITÉ								
INFORMATIONS GÉNÉRALES				EXPÉDITION				
Identification du fabricant et le lieu de fabrication Les Industries McAsphalt ltée MONTRÉAL-EST				Nom du centre de service				
Identification du distributeur et le lieu de distribution Les Industries McAsphalt ltée MONTRÉAL-EST				Nom du transporteur				
<u>Type de produit</u> CSS-1	<u>Réservoir</u> 348	<u>Date fabrication</u> 5 oct. 2023	<u>N° de lot</u> LOT175316	<u>N° de la citerne</u>	<u>Date chargement</u>			<u>Quantité livrée</u>
					jj	mm	aaaa	
ESSAIS		RÉSULTATS		Spécifications		Méthode d'essai		
Date d'essais		5 oct. 2023		Min.	Max.			
Tamis, 850 µm (% masse)		0.02		---	0.10	ASTM D6933		
Viscosité Saybolt Furol à 25°C (s)		36.7		20	100	ASTM D7496		
Résidu de distillation à 260°C (%)		65.1		57	---	ASTM D6997		
Huile dans le distillat (%)		0.2		---	5	ASTM D6997		
Pénétration, 25°C, 100 g, 5 s (0,1 mm)		168		100	250	ASTM D5		
Type d'émulsion		Cationique		CATIONIQUE		ASTM D7402		
Notes:				TEMPÉRATURE D'UTILISATION RECOMMANDÉE				
						Minimale	Maximale	
AUTORISATION				Entreposage		20°C (68°F)	85°C (185°F)	
Préparé par J. Delgrange, tech.		Approuvé par V. Plourde, superviseure de lab		Application		20°C (68°F)	90°C (194°F)	
				Air ambiant		10°C (50°F)	---	

Figure-A III-1 Émulsion de bitume CSS-1 fournie par McAsphalt

ANNEXE IV

FICHE TECHNIQUE DU BITUME EMPLOYÉ POUR LA FABRICATION DE LA MOUSSE

Bitumes - Attestation de conformité				
RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX		RECOMMANDATION DES TEMPÉRATURES D'UTILISATION		
Distributeur lieu d'entreposage et d'expédition Les Industries McAsphalt Itée - VALLEYFIELD		Conditions		°C
		Entreposage	Min. Max.	140
Fabricant et lieu de fabrication Les Industries McAsphalt Itée - VALLEYFIELD			Malaxage (à chaud)	Min. Max.
		151		
Classe de performance PG 58S-28		Temp. basées sur la viscosité rotationnelle	0.170 Pa.s	144
			0.280 Pa.s	133
			0.350 Pa.s	129
N° de lot LOT175341	Date de fabrication 05-10-2023	RÉSULTATS DES ESSAIS DE CONTRÔLE		
RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION		Date des essais de contrôle		05-10-2023
Date de la caractérisation	05-10-2023	G* /sin (bitume d'origine) (kPa)		1 283
G*/sin Orig (kPa)	1 283	Module de rigidité S contrôle		129
Temp. élevée de caractérisation (Te) (°C)	59.9	Pente m contrôle (60)		0.469
Viscosité Brookfield à 135°C (Pa.s)	0.258	Jnr3.2 (kPa)		2.55
Viscosité Brookfield à 165°C (Pa.s)	0.075	Jnrdiff (%)		8.69
Point d'éclair (°C)	310	R3.2(%)		3.00
Stabilité au stockage (°C)	0.2	Niveau de sollicitation Selon Jnr		"S"
TBA Moyenne (°C)	41.9	EXPEDITION		
Teneur en cendre (%)	0.000	Numéro et nom de la centrale d'enrobage		
Masse volumique à 25°C (g/cm³)	1 025	Transporteur		
Masse volumique à 15°C (g/cm³)	1 030	N° de la citerne	Date du chargement	Quantité livrée(Kg)
Enrobage Résiduel (%)				
Module de rigidité S origine (60) (MPa)	129	Notes		
Pente m origine (60)	0.469			
Variation de masse au RTFO (%)	-0.630			
Température de l'essai MSCR (°C)	58			
Comp.non-rec. Jnr, 3.2 kPa (1/kPa)	2.55			
Comp. non-rec. diff. Jnr-diff (%)	8.69			
Recouvrance d'élasticité, 3.2kPa (%)	3.00			
Niveau de sollicitation Selon Jnr 3.2	"S"			
Température base de caractérisation Tb (°C)	-29.6			
Delta Tc après RTFOT et PAV 40 h				
Préparé par Jeremy Tremblay tech	Date 06-10-2023	Approuvé par Valerie Plourde Lab Supervisor		Date 06-10-2023

Figure-A IV-1 Bitume PG 58S-28 fourni par McAsphalt

ANNEXE V

FICHE TECHNIQUE DU CIMENT EMPLOYÉ


	
CERTIFICAT D'ANALYSE TYPIQUE DU CIMENT	
Ciment à usage général type	GU
<u>Essais physiques</u>	<u>Analyses chimiques (%)</u>
<u>Temps de prise Vicat (minutes)</u>	<u>SiO₂</u> 19.1
Initial..... 115	<u>Al₂O₃</u> 4.8
Final 245	<u>Fe₂O₃</u> 3.6
<u>Finesse</u>	<u>CaO</u> 60.2
Blaine (m ² /kg)..... 393	<u>CaO libre</u> 1.5
Retenu 45 µm (%) 5	<u>MgO</u> 2.6
<u>Fausse prise (%)</u> 63	<u>SO₃</u> 3.8
<u>Expansion</u>	<u>Perte au feu</u> 1.9
à l'autoclave (%) 0.10	<u>Insolubles</u> 0.5
<u>Teneur en air (%)</u> 6	<u>Alcalis (équivalent Na₂O)</u> 0.92
<u>Résistance à la compression (MPa)</u>	<u>Composition Minéralogique</u>
3 jours 26.4	<u>C₃S</u> 51.2
7 jours 30.9	<u>C₂S</u> 16.2
28 jours 37.8	<u>C₃A</u> 6.7
<u>Expansion des barres de mortier</u>	<u>C₄AF</u> 11.0
à 14 jours (%) 0.008	
<i>Par la présente, nous certifions que le ciment livré est conforme aux exigences de la norme CSA A3000-13 section A3001-13, type GU.</i>	
<p>Pour tout renseignement concernant ce certificat d'analyse, veuillez contacter nos services techniques au (418) 329-2100, poste 3276.</p>	
<p>Michel Chabot, ing. Ingénieur chimiste</p>	

Figure-A V-1 Ciment GU CSA-A3000 fourni par Ciment Québec

ANNEXE VI

CARACTÉRISTIQUES DE FORMULATION ET DE FABRICATION DES ÉPROUVETTES

Tableau-A VI-1 Caractéristiques de formulation et de fabrication des éprouvettes à l'émulsion et à la mousse de bitume

Caractéristique	Matériaux formulés à l'émulsion	Matériaux formulés à la mousse
Eau ajoutée avant malaxage (état SSS) (%)	0	1,61
Teneur en eau total dans le matériau (%)	3,07	3,07
Teneur en eau provenant de l'émulsion (%)	1,61	--
Teneur en bitume résiduel et en mousse de bitume ajoutée (%)	3,00	3,00
Teneur en ciment (%)	1,5	1,5
V _m (%)	12	12
VFL (%)	52	52
Nombre moyen de girations	61	73
Type de malaxage	Manuel	Mécanique (Pug-Mill)
Cure préliminaire	Durant la nuit dans le moule à une température ambiante	Non effectuée

ANNEXE VII

DÉTAILS DES MESURES DE LA PERTE D'EAU DES ÉPROUVETTES

Tableau-A VII-1 Détails des mesures de la perte d'eau pour le régime de cure à haute température pour les matériaux formulés avec l'émulsion

Régime HT				
Émulsion				
Masse après démoulage (g)		Masse perdue (g)	Teneur en eau initiale (%)	Perte de granulats (%)
Ep1	2940	4	3,07%	0,14%
Ep2	2941	5	3,07%	0,17%
Ep3	2942	3	3,07%	0,10%
Masse après cure 1J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2898,7	41,3	1,66%	45,82%
Ep2	2898,5	42,5	1,62%	47,15%
Ep3	2896,4	45,6	1,52%	50,54%
Masse après cure 3J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2884,6	55,4	1,18%	61,46%
Ep2	2885,1	55,9	1,16%	62,02%
Ep3	2883,6	58,4	1,08%	64,73%
Masse après cure 7J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2876,6	63,4	0,91%	70,34%
Ep2	2877,6	63,4	0,91%	70,34%
Ep3	2877,7	64,3	0,88%	71,26%
Masse après cure 28J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (g)	Perte d'eau (%)
Ep1	2873,1	66,9	0,79%	74,26%
Ep2	2875,1	65,9	0,82%	73,16%
Ep3	2874,6	67,4	0,78%	74,73%

Tableau-A VII-2 Détails des mesures de la perte d'eau pour le régime de cure à haute température pour les matériaux formulés avec la mousse de bitume

Régime HT				
Mousse				
Masse après démoulage (g)		Masse perdue (g)	Teneur en eau initiale (%)	Perte de granulats (%)
Ep1	2941	3	3,07%	0,10%
Ep2	2943	2	3,07%	0,07%
Ep3	2944	2	3,07%	0,07%
Masse après cure 1J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2892,2	48,8	1,66%	45,82%
Ep2	2894,1	48,9	1,62%	47,15%
Ep3	2892,8	51,2	1,52%	50,54%
Masse après cure 3J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2881,2	11	1,034%	66,30%
Ep2	2880,5	13,6	0,944%	69,22%
Ep3	2879,2	13,6	0,87%	71,75%
Masse après cure 7J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2871,8	9,4	0,714%	76,72%
Ep2	2872,9	7,6	0,686%	77,64%
Ep3	2872,9	6,3	0,65%	78,72%
Masse après cure 28J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2869,8	2	0,646%	78,94%
Ep2	2871,9	1	0,652%	78,75%
Ep3	2871,6	1,3	0,61%	80,16%

Tableau-A VII-3 Détails des mesures de la perte d'eau pour le régime de cure à 2 étapes pour les matériaux formulés avec l'émulsion

Régime 2É				
Émulsion				
Masse après démoulage (g)		Masse perdue (g)	Teneur en eau initiale (%)	Perte de granulats (%)
Ep1	2941	3	3,07%	0,10%
Ep2	2940	5	3,07%	0,17%
Ep3	2941	4	3,07%	0,14%
Masse après cure 1J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2908,5	32,5	1,96%	36,03%
Ep2	2908,1	31,9	1,98%	35,40%
Ep3	2906,7	34,3	1,90%	38,04%
Masse après cure 3J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2898,1	42,9	1,61%	47,56%
Ep2	2897	43	1,60%	47,72%
Ep3	2896,3	44,7	1,55%	49,58%
Masse après cure 7J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Gain d'eau (%)
Ep1	2904,6	6,5	1,83%	40,36%
Ep2	2904,3	7,3	1,85%	39,62%
Ep3	2919,5	23,2	2,33%	23,84%
Masse après cure 28J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Gain d'eau (%)
Ep1	2945	40,4	3,20%	--
Ep2	2952,1	47,8	3,48%	--
Ep3	2947,3	27,8	3,28%	--

Tableau-A VII-4 Détails des mesures de la perte d'eau pour le régime de cure à 2 étapes pour les matériaux formulés avec la mousse de bitume

Régime 2É				
Mousse				
Masse après démoulage (g)		Masse perdue (g)	Teneur en eau initiale (%)	Perte de granulats (%)
Ep1	2944	2	3,07%	0,07%
Ep2	2943	3	3,07%	0,10%
Ep3	2944	1	3,07%	0,03%
Masse après cure 1J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2910,5	33,5	1,930%	37,09%
Ep2	2907	36	1,844%	39,89%
Ep3	2902,5	41,5	1,66%	45,93%
Masse après cure 3J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2899	11,5	1,539%	49,82%
Ep2	2892,4	14,6	1,348%	56,06%
Ep3	2888,4	14,1	1,18%	61,54%
Masse après cure 7J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Gain d'eau (%)
Ep1	2903,5	4,5	1,692%	44,84%
Ep2	2897,4	5	1,517%	50,52%
Ep3	2897,6	9,2	1,49%	51,36%
Masse après cure 28J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2946,5	43	3,153%	--
Ep2	2935,8	38,4	2,822%	7,98%
Ep3	2922,3	24,7	2,33%	24,02%

Tableau-A VII-5 Détails des mesures de la perte d'eau pour le régime de cure à humidité relative cyclique pour les matériaux formulés avec l'émulsion

Régime HRC				
Émulsion				
Masse après démoulage (g)		Masse perdue (g)	Teneur en eau initiale (%)	Perte de granulats (%)
Ep1	2939	6	3,07%	0,20%
Ep2	2940	4	3,07%	0,14%
Ep3	2941	4	3,07%	0,14%
Masse après cure 1J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2907,6	7,5	2,00%	34,87%
Ep2	2909,1	8	2,01%	34,28%
Ep3	2908,8	8,6	1,97%	35,71%
Masse après cure 3J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2899,9	4,6	1,73%	43,42%
Ep2	2900,5	4,7	1,72%	43,82%
Ep3	2900,2	4,7	1,68%	45,25%
Masse après cure 7J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2895	2,3	1,57%	48,87%
Ep2	2895	3,3	1,54%	49,92%
Ep3	2894,1	2,7	1,47%	52,02%
Masse après cure 28J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2887,7	0,8	1,32%	56,97%
Ep2	2886,7	0,8	1,25%	59,13%
Ep3	2884,4	1	1,14%	62,77%

Tableau-A VII-6 Détails des mesures de la perte d'eau pour le régime de cure à humidité relative cyclique pour les matériaux formulés avec la mousse de bitume

Régime HRC				
Mousse				
Masse après démoulage (g)		Masse perdue (g)	Teneur en eau initiale (%)	Perte de granulats (%)
Ep1	2944	2	3,068%	0,07%
Ep2	2943	2	3,068%	0,07%
Ep3	2944	3	3,067%	0,10%
Masse après cure 1J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau (%)	Perte d'eau (%)
Ep1	2914,7	29,3	2,073%	32,44%
Ep2	2911,5	31,5	1,998%	34,89%
Ep3	2914,7	29,3	2,07%	32,45%
Masse après cure 3J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau	Perte d'eau (%)
Ep1	2906,8	7,9	1,804%	41,19%
Ep2	2903,4	8,1	1,722%	43,86%
Ep3	2907,5	7,2	1,83%	40,43%
Masse après cure 7J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau	Perte d'eau (%)
Ep1	2899	7,8	1,539%	49,82%
Ep2	2895	8,4	1,437%	53,16%
Ep3	2900,1	7,4	1,58%	48,62%
Masse après cure 28J (g)		Masse d'eau perdue (cumulative) (g)	Teneur en eau	Perte d'eau (%)
Ep1	2889,7	9,3	1,223%	60,12%
Ep2	2886,1	8,9	1,135%	63,02%
Ep3	2888,9	11,2	1,20%	61,05%

ANNEXE VIII

DÉTAILS DES MESURES DES ESSAIS DE TRACTION INDIRECTE (ITS)

Tableau-A VIII-1 Détails des mesures des ITS pour le régime de cure à haute température pour les matériaux formulés avec l'émulsion et la mousse de bitume

Régime HT				
Émulsion				
Grandeur	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J
ITS 1 (kPa)	211,6	331,6	401,8	616,6
ITS 2 (kPa)	218,3	281,0	462,5	526,4
ITS 3 (kPa)	210,6	320,5	419,5	518,4
ITS _{moy} (kPa)	213,5	311,0	427,9	553,8
Mousse				
Grandeur	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J
ITS 1 (kPa)	280,1	346,8	473,2	480,5
ITS 2 (kPa)	245,1	310,7	421,7	510,0
ITS 3 (kPa)	255,8	373,5	401,6	476,2
ITS _{moy} (kPa)	260,3	343,7	432,2	488,9

Tableau-A VIII-2 Détails des mesures des ITS pour le régime de cure à 2 étapes pour les matériaux formulés avec l'émulsion et la mousse de bitume

Régime 2É				
Émulsion				
Grandeur	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J
ITS 1 (kPa)	174,7	272,1	233,0	232,9
ITS 2 (kPa)	171,0	230,5	215,0	249,7
ITS 3 (kPa)	200,4	241,5	235,3	234,7
ITS _{moy} (kPa)	182,0	248,0	227,7	239,1
Mousse				
Grandeur	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J
ITS 1 (kPa)	217,8	235,6	342,6	215,7
ITS 2 (kPa)	197,8	275,9	287,3	260,7
ITS 3 (kPa)	214,1	321,3	321,3	300,1
ITS _{moy} (kPa)	209,9	277,6	317,1	258,8

Tableau-A VIII-3 Détails des mesures des ITS pour le régime de cure à humidité relative cyclique pour les matériaux formulés avec l'émulsion et la mousse de bitume

Régime HRC				
Émulsion				
Grandeur	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J
ITS 1 (kPa)	171,9	201,4	253,9	352,5
ITS 2 (kPa)	132,6	207,0	242,3	369,9
ITS 3 (kPa)	143,3	219,4	289,0	364,9
ITS _{moy} (kPa)	149,3	209,3	261,8	362,5
Mousse				
Grandeur	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J
ITS 1 (kPa)	179,7	259,2	301,7	452,9
ITS 2 (kPa)	185,0	253,0	285,7	411,0
ITS 3 (kPa)	186,2	254,9	265,3	444,3
ITS _{moy} (kPa)	183,6	255,7	284,2	436,1

ANNEXE IX

DÉTAILS DES MESURES DES ESSAIS DU MODULE DE RIGIDITÉ EN TRACTION INDIRECTE (ITSM)

Tableau-A IX-1 Détails des mesures des ITSM pour le régime de cure à haute température pour les matériaux formulés avec l'émulsion et la mousse de bitume

Régime HT						
Émulsion						
Série	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J	Série 56J	Série 90J
ITSM 1 (MPa)	982	2446	3147	4107	4105	4104
ITSM 2 (MPa)	1477	1992	2673	3055	3172	3183
ITSM 3 (MPa)	1604	2778	3238	3768	3805	3702
ITSM _{Moy} (MPa)	1354	2409	3019	3643	3694	3663
Mousse						
Série	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J	Série 56J	Série 90J
ITSM 1 (MPa)	2328	2971	3837	4457	4402	4393
ITSM 2 (MPa)	1913	2555	3431	3880	4026	3932
ITSM 3 (MPa)	1323	1752	2541	2783	2655	2683
ITSM _{Moy} (MPa)	1855	2426	3270	3707	3694	3669

Tableau-A IX-2 Détails des mesures des ITSM pour le régime de cure à 2 étapes pour les matériaux formulés avec l'émulsion et la mousse de bitume

Régime 2É							
Émulsion							
Série	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J	Série 56J	Série 70J	Série 90J
ITSM 1 (MPa)	1140	2026	2058	2404	3629	2499	3381
ITSM 2 (MPa)	1064	--	--	--	--	--	--
ITSM 3 (MPa)	1681	2051	2283	1344	3621	2297	3577
ITSM _{Moy} (MPa)	1295	2038	2170	1874	3625	2398	3479
Mousse							
Série	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J	Série 70J	Série 84J	Série 100J
ITSM 1 (MPa)	1479	1983	2264	2242	3031	2134	2827
ITSM 2 (MPa)	2448	2548	2174	2448	3333	2655	3285
ITSM 3 (MPa)	1357	1770	1974	1871	2147	1872	2148
ITSM _{Moy} (MPa)	1525	2067	2262	2096	2837	2220	2753

Tableau-A IX-3 Détails des mesures des ITSM pour le régime de cure à humidité relative cyclique pour les matériaux formulés avec l'émulsion et la mousse de bitume

Régime HRC							
Émulsion							
Série	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J	Série 56J	Série 70J	Série 90J
ITSM 1 (MPa)	791	1093	1503	2255	2620	1994	2983
ITSM 2 (MPa)	913	1185	1518	2217	2860	2364	3186
ITSM 3 (MPa)	910	1243	1587	2395	3125	2481	3534
ITSM _{Moy} (MPa)	871	1174	1536	2289	2868	2279	3234
Mousse							
Série	Série 1J	Série 3J	Série 7J	Série 28J	Série 70J	Série 84J	Série 100J
ITSM 1 (MPa)	1215	1622	1912	2573	2554	1976	2753
ITSM 2 (MPa)	1186	1550	1680	1943	2285	1743	2241
ITSM 3 (MPa)	1471	1942	2244	2702	2609	1941	2408
ITSM _{Moy} (MPa)	1291	1705	1945	2638	2483	1887	2467

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. 2012. *Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud-Annexe C*. l'Association Française de Normalisation (AFNOR)-Norme EN 12697-26.
- ARRA. 2015. *Basic asphalt recycling manual*. 2nd edition. Asphalt Recycling and Reclaiming Association.
- Asphalt Academy. 2020. *Technical Guideline TG2: Bitumen Stabilised Materials: A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials*. 3rd edition. Southern African Bitumen Association (Sabita).
- ASTM International. 2017. *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures (ASTM D6931 – 17)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bitume Québec. 2014a. « Évaluer votre route Entretien des routes ». *Entretien des routes*. Consulté le 27 novembre 2024 (<https://www.entretiendesroutes.ca/fr/evaluer-votre-route>).
- Bitume Québec. 2014b. « Fiche promotionnelle sur le retraitement de chaussée – Recyclage et réhabilitation ». <https://www.entretiendesroutes.ca/fr/>. Consulté le 23 janvier 2025 (<https://cdn.ca.yapla.com/company/CPYN3MoxlytcLv8TGiuQSzVUf/asset/files/edrfichepromorrv8.pdf>).
- Bitume Québec. 2014c. « La dégradation des routes Entretien des routes ». *Entretien des routes*. Consulté le 27 novembre 2024 (<https://entretien-des-routes.s1.yapla.com/fr/la-degradation-des-routes>).
- Bitume Québec. 2020a. « Fiche descriptive : Retraitement de Type I Recyclage à froid ». <https://www.entretiendesroutes.ca/fr/>. Consulté le 23 janvier 2025 (<https://cdn.ca.yapla.com/company/CPYN3MoxlytcLv8TGiuQSzVUf/asset/files/bq-2020-fiche-descriptive-retraitement-de-type-i-web.pdf>).
- Bitume Québec. 2020b. « Fiche descriptive : Retraitement de Type II décohéssionnement / stabilisation ». <https://www.entretiendesroutes.ca/fr/>. Consulté le 23 janvier 2025 (<https://cdn.ca.yapla.com/company/CPYN3MoxlytcLv8TGiuQSzVUf/asset/files/bq-2020-fiche-descriptive-retraitement-de-type-ii-web.pdf>).
- BluePlan Engineering. 2019. « Bulletin de rendement des infrastructures Canadiennes ». <http://canadianinfrastructure.ca>. Consulté le 25 janvier 2025 (<http://canadianinfrastructure.ca/fr/index.html>).

- BNQ. 2002. *Granulats-Matériaux recyclés fabriqués à partir de résidus de béton, d'enrobés bitumineux et de briques - Classification et caractéristiques*. Bureau de normalisation du Québec-Norme 2560-600/2002.
- BNQ. 2014. *Travaux de génie civil - Granulats*. Bureau de normalisation du Québec-Norme 2560-114/2014.
- Bocci, Maurizio, Andrea Grilli, Fabrizio Cardone, et Andrea Graziani. 2011. « A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials ». *Construction and Building Materials* 25(2):773-78. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007.
- Braham, Andrew. 2024. « A Brief Synthesis of Flexible Full Depth Reclamation Performance Testing ». P. 553-64 in *Proceedings of the 10th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*, édité par P. Pereira et J. Pais. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Cardone, Fabrizio, Andrea Grilli, Maurizio Bocci, et Andrea Graziani. 2015. « Curing and temperature sensitivity of cement-bitumen treated materials ». *International Journal of Pavement Engineering* 16(10):868-80. doi: 10.1080/10298436.2014.966710.
- Costa, Carla. 2015. « Hydraulic Binders ». P. 1-52 in *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design*, édité par M. C. Gonçalves et F. Margarido. Cham: Springer International Publishing.
- Deng, Changqing, Yingjun Jiang, Hongwei Lin, Zhejiang Chen, et Xiaoping Ji. 2021. « Influence of gradations on performance of emulsified asphalt cold recycled mixture produced using vertical vibration compaction method ». *Road Materials and Pavement Design* 22(5):983-1003. doi: 10.1080/14680629.2019.1659174.
- Ferjani, Amel, Alan Carter, Michel Vaillancourt, Adrien Dardeau, et Apparao Gandi. 2019. « Effect of Cement Content on Cracking Resistance of Full-Depth Reclamation Materials Using the Semicircular Bending Test ». *Advances in Civil Engineering Materials* 8(1):411-22. doi: 10.1520/ACEM20190062.
- Global Platform for Sustainable Cities. 2020. « A Review of Integrated Urban Planning Tools for Greenhouse Gas Mitigation ». <https://Openknowledge.Worldbank.Org>. Consulté le 23 novembre 2024 (<https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/797ce8b2-1ff2-5346-abc7-857aa052e475/content>).
- Godenzoni, Carlotta. 2017. « Multiscale Rheological and Mechanical Characterization of Cold Mixtures ». Thèse de doctorat, Università Politecnica delle Marche, Ancona, ITALY.

Consulté le 24 janvier 2025 (https://iris.univpm.it/retrieve/e18b8790-c0b1-d302-e053-1705fe0a27c8/Tesi_Godenzoni.pdf).

- Godenzoni, Carlotta, Andrea Graziani, Edoardo Bocci, et Maurizio Bocci. 2018. « The evolution of the mechanical behaviour of cold recycled mixtures stabilised with cement and bitumen: field and laboratory study ». *Road Materials and Pavement Design* 19(4):856-77. doi: 10.1080/14680629.2017.1279073.
- Godenzoni, Carlotta, Andrea Graziani, et Daniel Perraton. 2017. « Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt ». *Road Materials and Pavement Design* 18(1):130-50. doi: 10.1080/14680629.2016.1142467.
- Goli, Arunkumar, Deepa Sasidharan, B. Raj Kumar, et Gottumukkala Bharath. 2023. « Effect of Curing Regime on Mechanical Characteristics of Cold Recycled Bituminous Mixes ». *Materials and Structures* 56(7):138. doi: 10.1617/s11527-023-02229-2.
- González, Álvaro, Fernando Paniagua, Guillermo Thenoux, et Carlos López. 2016. « Evaluation of Additional Laboratory Tests for Design of Full-Depth Reclamation Mixtures Using Foamed Bitumen ». *Transportation Research Record* 2573(1):40-48. doi: 10.3141/2573-06.
- Graziani, Andrea, Carlotta Godenzoni, Fabrizio Cardone, Edoardo Bocci, et Maurizio Bocci. 2017. « An application of the Michaelis–Menten model to analyze the curing process of cold recycled bituminous mixtures ». *International Journal of Pavement Research and Technology* 10(1):62-74. doi: 10.1016/j.ijprt.2016.09.002.
- Graziani, Andrea, Carlotta Godenzoni, Fabrizio Cardone, et Maurizio Bocci. 2016. « Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures ». *Materials & Design* 95:358-69. doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.094.
- Graziani, Andrea, Christian Iafelice, Simone Raschia, Daniel Perraton, et Alan Carter. 2018. « A procedure for characterizing the curing process of cold recycled bitumen emulsion mixtures ». *Construction and Building Materials* 173:754-62. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.091.
- Graziani, Andrea, Sara Spadoni, Lorenzo Ingrassia, Amedeo Virgili, et Francesco Canestrari. 2023. « Composite fatigue failure of cold recycled material mixtures: new insights into the role of bitumen and cement ». *Materials and Structures* 57:10. doi: 10.1617/s11527-023-02285-8.

- Grilli, Andrea, Fabrizio Cardone, et Edoardo Bocci. 2018. « Mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials containing different amounts of reclaimed asphalt ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 22(7):836-51. doi: 10.1080/19648189.2016.1219972.
- Grilli, Andrea, Andrea Graziani, Edoardo Bocci, et Maurizio Bocci. 2016. « Volumetric Properties and Influence of Water Content on the Compactability of Cold Recycled Mixtures ». *Materials and Structures* 49(10):4349-62. doi: 10.1617/s11527-016-0792-x.
- Grilli, Andrea, Andrea Graziani, et Maurizio Bocci. 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.
- Grilli, Vittoria, Amedeo Virgili, et Andrea Graziani. 2023. « Evaluation of complex modulus and fatigue properties of cold recycled material mixtures using small-scale specimens ». *Road Materials and Pavement Design* 25:1-16. doi: 10.1080/14680629.2023.2194450.
- Haynes, Winston. 2013. « Bonferroni Correction ». P. 154-154 in *Encyclopedia of Systems Biology*, édité par W. Dubitzky, O. Wolkenhauer, K.-H. Cho, et H. Yokota. New York, NY: Springer.
- Hu, Wei, Xiaoyang Jia, Baoshan Huang, et Hong Park. 2017. « Evaluation of compactability of asphalt mixture utilizing asphalt vibratory compactor ». *Construction and Building Materials* 139:419-29. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.070.
- Jain, Shobhit, et Bhupendra Singh. 2021. « Cold mix asphalt: An overview ». *Journal of Cleaner Production* 280:124378. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124378.
- Jones, David, Stefan Louw, et John Harvey. 2020. *Guide for Partial and Full-Depth Pavement Recycling in California*. University of California-Pavement Research Center.
- Kim, Yongjoo, Soohyok Im, et Hosin “David” Lee. 2011. « Impacts of Curing Time and Moisture Content on Engineering Properties of Cold In-Place Recycling Mixtures Using Foamed or Emulsified Asphalt ». *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(5):542-53. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000209.
- Laboratoire des chaussées. 1996. *Retraitement en place des chaussées*. Bibliothèque nationale du Québec. Québec, Canada.
- Laboratoire des chaussées. 1998. *Variations saisonnières de l'endommagement structural de quelques chaussées souples*. Transport Québec-Bulletin d'information technique. Québec, Canada.

- Lachance-Tremblay, Éric. 2023. « Guide d'aide à la conception structurale des chaussées municipales ». Consulté le 26 novembre 2024 (<http://www.ceriu.qc.ca/bibliotheque/guide-aide-conception-structurale-chaussees-municipales>).
- Lamothe, Sébastien, Manon Rinieri, Michel Vaillancourt, et Éric Lachance-Tremblay. 2024. « Assessment of the quality of full-depth reclamation (FDR) using a dynamic cone penetrometer (DCP): a case study ». *Canadian Journal of Civil Engineering*. doi: 10.1139/cjce-2024-0333.
- Liu, Ziming, et Lijun Sun. 2023. « A review of effect of compaction methods on cold recycling asphalt mixtures ». *Construction and Building Materials* 401:132758. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132758.
- Liu, Ziming, Lijun Sun, Jiahui Zhai, et Weiqi Huang. 2022. « A review of design methods for cold in-place recycling asphalt mixtures: Design processes, key parameters, and evaluation ». *Journal of Cleaner Production* 370:133530. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133530.
- Meocci, Monica, Andrea Grilli, Francesca La Torre, et Maurizio Bocci. 2017. « Evaluation of mechanical performance of cement-bitumen-treated materials through laboratory and in-situ testing ». *Road Materials and Pavement Design* 18(2):376-89. doi: 10.1080/14680629.2016.1213506.
- Mignini, Chiara, Fabrizio Cardone, et Andrea Graziani. 2021. « Using fine aggregate matrix mortars to predict the curing behaviour of cement bitumen treated materials produced with different cements ». *Construction and Building Materials* 268:121201. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121201.
- Mignini, Chiara, Fabrizio Cardone, et Andrea Graziani. 2022. « Complex Modulus of Cement-Bitumen Treated Materials Produced with Different Reclaimed Asphalt Gradations ». *Materials and Structures* 55(7):169. doi: 10.1617/s11527-022-02009-4.
- Mondal, Purbayan Ghosh, et Kranthi K. Kuna. 2022. « Mix design considerations for foamed bitumen stabilized materials: A review ». *Construction and Building Materials* 326:126783. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126783.
- Morian, Dennis A., Mansour Solaimanian, Barry Scheetz, et Shervin Jahangirnejad. 2012. *Developing Standards and Specifications for Full Depth Pavement Reclamation*. Pennsylvania Department of Transportation-Bureau of Planning and Research. Harrisburg, PA, USA.

- Mousa, Momen R., Daniel Game, et Marwa Hassan. 2022. « Field Evaluation and Cost-Effectiveness of Cement-Stabilized Full-Depth Reclamation of Asphalt Pavements in Hot and Humid Climates ». *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements* 148(1).
- MTMD. 2020. *Dessin normalisé - Terminologie relative aux chaussées*. Ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec-Tome II-Construction routière-Structures de chaussée. Québec, Canada.
- MTMD. 2023a. « CHOIX DES COMPOSANTS – ENROBÉS (Norme 4202) ». <https://www.transports.gouv.qc.ca>. Consulté le 26 novembre 2024 (<https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/chaussees/Documents/choix-composants-enrobes.pdf>).
- MTMD. 2023b. *Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées*. Ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec-Collection Normes-Tome VII – Matériaux. Québec, Canada.
- MTMD. 2023c. *Méthode de formulation à froids des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion*. Ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec-Recueil des méthodes d'essai LC-26-002. Québec, Canada.
- Ogbo, Chibuike. 2022. « Evaluation of Curing Effects on Cold In-Place Recycled (CIR) Materials ». Thèse de doctorat, University of New Hampshire, Durham, New Hampshire, USA.
- Ogbo, Chibuike, Eshan Dave, et Jo Sias. 2022. « Laboratory Investigation of Factors Affecting the Evolution of Curing in Cold In-Place Recycled Materials ». *Transportation Research Record* 2676(9):28-40. doi: 10.1177/03611981221085523.
- Ogbo, Chibuike, Eshan V. Dave, et Jo E. Sias. 2022. « Laboratory Performance of Stabilized Base with 100% Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Using Portland Cement, Bitumen Emulsion and Foamed-Bitumen ». P. 1257-63 in *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials*, édité par H. Di Benedetto, H. Baaj, E. Chailleux, G. Tebaldi, C. Sauzéat, et S. Mangiafico. Cham: Springer International Publishing.
- Ogbo, Chibuike, Eshan V. Dave, Jo E. Sias, et Eyoab Zegeye. 2022. « Correlating field and laboratory evolution of curing in cold in-place recycled (CIR) materials ». *Construction and Building Materials* 345:128352. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128352.

- PPRA-Pavement Preservation and Recycling Alliance. 2018. « About Asphalt Emulsions | RoadResource.Org ». *Https://Roadresource.Org*. Consulté le 8 décembre 2024 (<https://roadresource.org/emulsions/about>).
- Raschia, Simone. 2020. « Cement-Bitumen Treated Materials (CBTM) for Cold Regions: RAP Aggregate Source and Low Production Temperatures ». Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, Québec, Canada.
- Raschia, Simone, Tushar Chauhan, Shalu Panwar, Alan Carter, Andrea Graziani, et Daniel Perraton. 2020. « Effect of Water and Cement Content on the Mechanical Properties of Cold Recycled Mixtures (CRM) with Bitumen Emulsion ». P. 274-82 in *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE)*, édité par M. Pasetto, M. N. Partl, et G. Tebaldi. Cham: Springer International Publishing.
- Raschia, Simone, Herve Di Benedetto, Sebastien Lamothe, Alan Carter, Andrea Graziani, et Daniel Perraton. 2021. « Thermo-rheological modelling of cement-bitumen treated materials in the small strain domain ». *Transportation Geotechnics* 31. doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100647.
- Raschia, Simone, Andrea Graziani, Alan Carter, et Daniel Perraton. 2019. « Laboratory mechanical characterisation of cold recycled mixtures produced with different RAP sources ». *Road Materials and Pavement Design* 1-14. doi: 10.1080/14680629.2019.1588775.
- Raschia, Simone, Chiara Mignini, Andrea Graziani, Alan Carter, Daniel Perraton, et Michel Vaillancourt. 2019. « Effect of gradation on volumetric and mechanical properties of cold recycled mixtures (CRM) ». *Road Materials and Pavement Design* 20(sup2):S740-54. doi: 10.1080/14680629.2019.1633754.
- Raschia, Simone, Daniel Perraton, Alan Carter, Andrea Grilli, et Andrea Graziani. 2018. *Inter-Laboratory investigation of the TGI- Cold Recycling of the RILEM TC-RAP Committee: Mixing and compaction procedure for Cement-Bitumen Treated Materials (CBTM)*. 17th SIV International Summer School and 5th International SIV Arena. San Marino, Republic of San Marino.
- Raschia, Simone, Daniel Perraton, Hervé Di Benedetto, Sébastien Lamothe, Andrea Graziani, et Alan Carter. 2021. « Visco-Elasto-Plastic Characterization in the Small Strain Domain of Cement Bitumen–Treated Materials Produced at Low Temperatures ». *Journal of Materials in Civil Engineering* 33(4):04021039. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003653.
- Reeder, Garret D., Dale S. Harrington, Michael E. Ayers, et Wayne Adaska. 2017. *Guide to Full-Depth Reclamation (FDR) with Cement*. Portland Cement Association, National

Concrete Pavement Technology Center-Institute for Transportation, Iowa State University. Ames, IA, USA.

Saeed, Saeed Modibbo, Muslich Hartadi Sutanto, Madzlan Napiah, Fadhli Wong, et Mastura Bujang. 2021. « Review on the Effect of Curing on Cold Recycled Asphalt Mixture ». P. 1052-60 in *ICCOEE2020*, édité par B. S. Mohammed, N. Shafiq, S. Rahman M. Kutty, H. Mohamad, et A.-L. Balogun. Singapore: Springer.

Schmitt, Laura, Annie Levasseur, Michel Vaillancourt, et Éric Lachance-Tremblay. 2025. « Life cycle assessment of various pavement rehabilitation techniques: A case study ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 139:104476. doi: 10.1016/j.trd.2024.104476.

Souza, Jessica, Alan Ezaoui, et Mustapha Masdan. 2024. « Environmental Assessment of Two Road Rehabilitation Processes: Full-Depth Reclamation vs. Mill and Fill ». P. 349-59 in *Proceedings of the 10th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*, édité par P. Pereira et J. Pais. Cham: Springer Nature Switzerland.

Tebaldi, Gabriele, Eshan V. Dave, Paul Marsac, Patrick Muraya, Martin Hugener, Marco Pasetto, Andrea Graziani, Andrea Grilli, Maurizio Bocci, Alessandro Marradi, Louisette Wendling, Vincent Gaudefroy, Kim Jenkins, Andreas Loizos, et Francesco Canestrari. 2014. « Synthesis of standards and procedures for specimen preparation and in-field evaluation of cold-recycled asphalt mixtures ». *Road Materials and Pavement Design* 15(2):272-99. doi: 10.1080/14680629.2013.866707.

Transports Québec. 2002. *Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples*. Bibliothèque nationale du Québec. Québec, Canada.

Wang, Shenglin. 2019. « Hydraulic Road Binder (HRB) and Its Use for Subgrade Stabilization in Ontario, Canada ». Thèse de doctorat, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

Wirtgen. 2012. *Wirtgen cold recycling technology*. Wirtgen GmbH.

Xiao, Feipeng, Shenglei Yao, Jingang Wang, Xinghai Li, et Serji Amirkhanian. 2018. « A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement ». *Construction and Building Materials* 180:579-604. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006.

Xu, Ouming, Zhenjun Wang, et Rui Wang. 2017. « Effects of aggregate gradations and binder contents on engineering properties of cement emulsified asphalt mixtures ». *Construction and Building Materials* 135:632-40. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.095.

Zhao, Bin. 2007. « Bounding recycled aggregate pavement mixtures using hydraulic binders and cold bitumen emulsion ». Thèse de doctorat, Sheffield Hallam University, Sheffield, Angleterre, Royaume-Uni.