

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Ing.

PAR
Jose Alberto CARDENAS

ÉVALUATION DE L'EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE CURE SUR LE
COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX BITUMINEUX DE TYPE MR-5 TRAITÉS
À LA MOUSSE DE BITUME

MONTRÉAL, LE 6 SEPTEMBRE 2013



Jose Alberto Cardenas, 2013



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

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

M. Yannic A. Ethier, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Vaillancourt, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 26 AVRIL 2013

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le résultat d'un long parcours au sein du LCMB où j'ai appris plusieurs choses autant de point de vue personnel, ainsi que professionnel. Remercier à toutes les personnes qui m'ont supporté de près ou de loin à la réussite de celui-ci pourrait être difficile, je pourrai manquer plusieurs. Cependant, je tiens à remercier spécial et personnellement à :

Mon directeur de maîtrise M. Alan Carter qui, en plus de me soutenir financière et moralement, sa grande disponibilité et son implication m'on fait sentir privilégié. Sa patience est remarquablement remerciée. Mon co-directeur de recherche M. Daniel Perraton qui sans son judicieux conseil ce mémoire n'aurait pas été possible. Toutes ses observations, ses considérations techniques et son temps m'ont appris le mot « rigueur ». Aussi aux membres du jury, qui ont bien voulu accepter la charge d'examiner ce travail.

J'aimerais remercier également au personnel technique du LCMB : Francis Bilodeau, Alain Desjardins et Mauricio Rios, son aide à été plus qu'appréciée dans l'étape d'expérimentation. Les stagiaires Sergi Canela, Roger Garcia et Amal Benaissa. Leurs travaux antérieurs au sujet des ERF, et sa collaboration pendant l'étape d'expérimentation ont été la base de ce projet. À Élodie Bordeaux, pour la révision linguistique de ce mémoire.

À mon épouse Carolina, ma main droite, ma conseillère, correctrice et critique de première ligne. Elle est aussi responsable de la réussite de ce projet et grâce à elle nous sommes arrivés à bon terme. À Teresa, Alberto, Felipe, Isabel, Mateo, Hugo, Luz Marina. À toute ma famille, pour son soutien et encouragement, pour m'aider à persévérer pendant les moments difficiles. Il n'y a pas de mots pour leur remercier de tout mon cœur pour tous les sacrifices et le temps que j'aie pu les enlever. Finalement, d'une façon particulière, ce mémoire est dédié à mon petit garçon Manuel Alberto. Le jour qu'il ait l'occasion de lire ce mémoire, ça sera le sommet de cet effort.

ÉVALUATION DE L'EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE CURE SUR LE COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX BITUMINEUX DE TYPE MR-5 TRAITÉS À LA MOUSSE DE BITUME

Jose Alberto CARDENAS

RÉSUMÉ

Les enrobés recyclés à froid (ERF) sont utilisés au Québec depuis 1991. Cependant, cette pratique est déconseillée à des températures inférieures à 10 °C. Très peu de recherches portent sur le sujet ou, d'une façon plus concrète sur les effets d'une basse température et le comportement à jeune âge de ce type de mélange.

La présente étude évalue le comportement d'un matériau retraité de type MR-5 soumis à différentes températures de cure, soient 0 °C, 5 °C, 10 °C, en prenant comme référence la température ambiante (23°C). On parle ainsi des conditions de cure à froid.

La recherche est basée sur deux aspects principaux : 1) l'effet de la température de cure sur un matériau recyclé de type MR-5 traité à la mousse de bitume et 2) la comparaison entre deux méthodes de mesure de la résistance mécanique effectuées, soit la stabilité Marshall et la Résistance à la compression diamétral ITS (*Indirect Tensile Strength*).

L'étude se divise en trois étapes. Une première étape comprend la formulation du mélange et l'optimisation des propriétés de la mousse, ainsi que la formulation du mélange pour la confection des éprouvettes de MR-5 MB. La deuxième étape consiste en la confection des éprouvettes et l'entreposage dans les conditions de cure prédéterminées. Finalement, la troisième étape comprend les essais de résistance mécanique.

Parallèlement, on a considéré des paramètres associés, tels que l'indice de moussabilité et la surface de contraction, pour l'étape 1 de l'étude, et l'indice de fracture (IF) et l'indice de ductilité (ID) associés à la résistance mécanique. Une analyse complémentaire, compare la résistance mécanique du MR-5 MB à l'égard d'une MR-5 à l'émulsion du bitume. Cette dernière est plus utilisée au Québec.

On a constaté qu'il y a une augmentation de la résistance pendant le temps de cure, pour les deux méthodes d'essai y compris à températures inférieures à 10 °C. On peut souligner qu'il y a des différences substantielles entre les pourcentages d'augmentation de la résistance des essais Marshall et ceux-ci de la résistance ITS. Les valeurs des paramètres associés à l'optimisation de la mousse et à la résistance mécanique sont effectives pour la caractérisation des ERF et donnent plus de détails sur le comportement de ce type de matériaux.

Mots Clés : Enrobés recyclés à froid - Mousse de bitume - Recyclage des chaussées - Résistance ITS

EVALUATION OF THE EFFECT OF CURE TEMPERATURE ON THE BEHAVIOUR OF RECYCLED ASPHALT MATERIALS TREATED WITH FOAM BITUMEN

Jose Alberto CARDENAS

ABSTRACT

Cold recycling mixes and cold mixes with RAP are used in Quebec since 1991. However, this practice is not recommended at temperatures below 10 ° C. Very little research on this subject and the effects of low temperatures on the behavior of early mixes are being done.

The present study compares the behavior of a MR-5 mix under different cure temperature, 0 ° C, 5 ° C, 10 ° C, and 23 ° C as the reference temperature. The cold curing conditions are explained in details.

The research is based on two main aspects: the effect of curing temperature on the cold recycling materials with foamed asphalt and the comparison between two methods of testing the mechanical properties, there are the Marshall stability and the Indirect Tensile Strength ITS.

The study is divided into three stages. The first stage is the optimization of the foam properties and the mix design of test. The second stage is to prepare the specimens of MR-5 MB and the storage on the predefined cure conditions. Finally, the third stage consists of mechanical strength testing of briquettes at the curing time appointed.

Meanwhile, at each stage, we evaluate the associated parameters, which are little known and highly useful in road construction. Firstly, we assess the foam index and the surface of contraction, which is used for formulating and optimization of the foam bitumen mixes. Secondly, we evaluate the index of fracture (IF) and the ductility index (ID) associated with the mechanical strength. At the end of the project, we compare the resistance of the MR-5 foamed bitumen used in this research with the MR-5 bitumen emulsion. The latter is more used in the road industry in Quebec and serves as a reference for the comparison.

Both tests show that there is an increase in the resistance of the materials with time, even at temperature below 10 ° C. We notice that the percentage of increase in the resistance of the materials is significantly different in both tests. However, the ITS is highly effective in cold mixes characterization and gives more details on the behavior of the MR-5 materials in different temperature.

Key words: RAP – Cold mixes - foamed bitumen - roads recycling – ITS test – Marshall Test.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE	3
1.1 Recyclage des enrobés bitumineux	3
1.2 GBR comme source de matériaux granulaires.....	5
1.2.1 Classification des matériaux recyclés	6
1.3 Techniques de retraitement des chaussées	7
1.3.1 Recyclage en centrale à chaud	9
1.3.2 Recyclage en place à chaud	10
1.3.3 Recyclage en centrale à froid.....	11
1.3.4 Recyclage en place à froid	12
1.3.4.1 Techniques de retraitement en place à froid	13
1.3.4.2 Formulation des enrobés recyclés à froid	15
1.3.4.3 Avantages et désavantages du recyclage en place à froid.....	19
1.4 Les liants dans les matériaux recyclés	20
1.4.1 Ciment Portand	22
1.4.2 L'émulsion de bitume	22
1.4.3 Mousse de bitume	24
1.4.3.1 Méthode d'ajout de la mousse de bitume en chantier.....	25
1.5 État des connaissances – Recyclage en place à la mousse de bitume.....	26
1.5.1 Recherches	27
1.5.2 Guides et manuels de référence	31
1.5.2.1 Manuel de recyclage à froid, Allemagne	32
1.5.2.2 Intérim Technical Guidelines TG-2, Afrique du Sud	32
1.5.2.3 Rapports Association mondiale de la route, PIARC, France.....	33
1.5.2.4 Guides et manuels variés, Amérique du Nord	33
1.5.3 Banc d'essai WLB-10	34
1.5.4 Caractéristiques de la mousse de bitume	37
1.5.4.1 Rapport d'expansion (Ex)	38
1.5.4.2 Demi-vie ($t_{1/2}$)	39
1.5.4.3 Surface de contraction et indice de moussabilité.....	41
1.5.5 La cure	43
1.5.6 Effet de la température dans les ERF-MB	47
1.6 Méthodes d'essais de résistance mécanique pour les matériaux retraités.....	47
1.6.1 Stabilité Marshall	48
1.6.2 Résistance à la compression diamétrale (ITS).....	50
1.6.3 Paramètres associés.....	52
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	55
2.1 Objectif de l'expérimentation	55
2.2 Méthodologie	55

2.2.1	Étape 1 : Formulation.....	56
2.2.1.1	Caractérisation des matières premières.....	57
2.2.1.2	Détermination de la teneur en eau et de la température optimale pour le moussage.....	58
2.2.1.3	Détermination du pourcentage de bitume optimal pour la confection des éprouvettes du MR-5 MB	58
2.2.2	Étape 2 : Confection et cure des éprouvettes pour les essais mécaniques.....	59
2.2.2.1	Préparation et entreposage du MR-5.....	59
2.2.2.2	Malaxage du MR-5 MB.....	61
2.2.2.3	Compaction et démoulage des éprouvettes.....	63
2.2.2.4	Conditions de cure des éprouvettes.....	64
2.2.1	Étape 3 : Essais de résistance mécanique. Stabilité Marshall et résistance à la traction indirecte (ITS)	65
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....		69
3.1	Caractérisation des matières premières.....	69
3.1.1	Caractérisation du GBR.....	71
3.1.1.1	Teneur en eau du GBR.....	71
3.1.1.2	Granulométrie du GBR.....	72
3.1.1.3	Granulométrie avant extraction du bitume	73
3.1.1.4	Granulométrie après extraction du bitume.....	74
3.1.1.5	Densité maximale (d_{mm}) du GBR	76
3.1.2	MG-20.....	76
3.1.2.1	Granulométrie du MG-20	76
3.1.3	Matériau recyclé de type 5, MR-5	77
3.1.4	Bitume.....	78
3.1.4.1	Teneur en bitume du GBR.....	78
3.1.4.2	Détermination du PG du bitume extrait du GBR.....	79
3.2	Optimisation des paramètres pour produire une mousse de bitume optimale	81
3.2.1	Optimisation du moussage par rapport aux critères d'Expansion (Ex) et du temps de Demi-vie ($t_{1/2}$).....	82
3.2.2	Surface de Contraction (S_c) et indice de moussabilité ($M_{(T)}$).....	84
3.3	Détermination du pourcentage de bitume optimal pour MR-5 MB.....	86
3.3.1	Formulation d'après les résultats de stabilité Marshall.....	88
3.3.2	Formulation d'après résultats de résistance ITS	92
3.4	Résultats sur les éprouvettes soumises à des essais de résistance	96
3.4.1	Teneur en eau des éprouvettes lors des essais de résistance mécanique	96
3.4.2	Courbes Force-Déplacement dans les essais de résistance mécanique	99
3.4.3	Pente de la courbe force-déplacement (pseudo-module).....	100
3.4.4	Aire sous la courbe force-déplacement.....	101
3.4.5	Résultats stabilité Marshall vs ITS	102

3.4.5.1	Résultats stabilité Marshall et ITS à la température ambiante 23 °C.....	102
3.4.5.2	Résultats stabilité Marshall et ITS à 10 °C.....	103
3.4.5.3	Résultats stabilité Marshall et ITS à 5 °C.....	104
3.4.5.4	Résultats stabilité Marshall et ITS à 0 °C.....	105
3.5	Sommaire des résultats	106
CHAPITRE 4 ANALYSE DES RÉSULTATS.....		107
4.1	Évolution des courbes de résistance en fonction du temps de cure	107
4.1.1	Évolution des résistances d'après la méthode Marshall	107
4.1.2	Évolution des résistances d'après la méthode ITS.....	111
4.2	Comparaison de l'évolution des courbes de résistance.....	114
4.2.1	Résistance mécanique en fonction du temps de cure.....	119
4.3	Paramètres et indices associés à la résistance mécanique.....	119
4.3.1	Évolution de IF, ID et du pseudo-module pour les essais Marshall	120
4.3.2	Évolution de IF, ID et du pseudo-module pour les essais ITS.....	123
4.4	Bilan de l'analyse des résultats de résistance et des paramètres associés.....	125
4.5	Essais complémentaires	127
4.5.1	Résultats pour les MR-5 fabriqués à la MB, curés entre 4 °C et 7 °C	128
4.5.2	Résultats pour les MR5 curés à la température ambiante (23 °C), en changeant le type de liant.....	130
CONCLUSIONS.....		133
RECOMMANDATIONS		137
ANNEXE I RÉSULTATS DE LABORATOIRE.....		139
BIBLIOGRAPHIE.....		295

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Comparatif des taux de recyclage de GBR dans différents pays.	4
Tableau 1.2 Synthèse des propriétés de mousse selon différents auteurs.....	29
Tableau 1.3 Conditions de cure utilisées pour des ERF — MB	44
Tableau 1.4 Méthodes de cure et leurs équivalences en chantier avant l'année 2000	45
Tableau 1.5 Protocoles de cure et leur équivalence en chantier après les années 2000.....	46
Tableau 2.1 Essais de caractérisation des matériaux	57
Tableau 2.2 Étapes de la méthodologie.....	62
Tableau 3.1 Comparaison de la détermination de la teneur en eau.....	72
Tableau 3.2 Résumé des granulométries du GBR avant extraction.....	73
Tableau 3.3 Résumé des granulométries GBR après extraction	74
Tableau 3.4 Résultats de la teneur en bitume par extraction du GBR	79
Tableau 3.5 Résultats essais de caractérisation bitume extrait	80
Tableau 3.6 Paramètres idéaux pour une mousse de bitume à une T° donnée	84
Tableau 3.7 Paramètres de la mousse bitume (MB) calculés pour différentes températures de bitume	85
Tableau 3.8 Résultats Stabilité Marshall pour détermination du bitume optimale	89
Tableau 3.9 Résultats ITS pour détermination de pourcentage de bitume optimal	92
Tableau 3.10 Paramètres de formulation pour ERF-MB dans la présente étude	96
Tableau 4.1 Valeurs représentatives des droites de régression de a Figure 4.2 pour les différentes températures de cure étudiées.....	109
Tableau 4.2 Valeurs représentatives des courbes de tendance (Fig. 4.5).....	113
Tableau 4.3 Valeurs de résistance mécanique pour méthode d'essai et température de cure	114

Tableau 4.4	Valeurs de résistances représentatives	115
Tableau 4.5	Résultats de résistance par méthode d'essai et température de cure	129
Tableau 4.6	Formulation du MR-5 à l'émulsion du bitume.....	130

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Classification des matériaux recyclés	6
Figure 1.2	Schéma d'une chaussée existante et des techniques de réhabilitation éventuelle	7
Figure 1.3	Classement des différents retraitements des chaussées.....	9
Figure 1.4	Principes techniques pour le décohesionnement (Bergeron, 2006b)	15
Figure 1.5	Propriétés et comportements des différents types de matériaux	16
Figure 1.6	Dosages typiques pour le retraitement en place	18
Figure 1.7	Types de liant utilisé pour le recyclage.....	21
Figure 1.8	Schéma des différents types d'émulsions.....	23
Figure 1.9	Schéma de la formation de la mousse de bitume dans une chambre à pression.....	24
Figure 1.10	Principe du traitement à la mousse de bitume.....	25
Figure 1.11	Limites granulométriques pour matériaux granulaires à traiter à la MB	27
Figure 1.12	Limites granulométriques d'après la TG-2	28
Figure 1.13	Banc d'essai pour la production de la MB. Wirtgen WLB-10.....	35
Figure 1.14	Schéma de fonctionnement du banc d'essai WLB-10	35
Figure 1.15	Photographie de la chambre d'expansion du WLB-10	36
Figure 1.16	Aspect de la mousse au moment de sortir par la buse.....	37
Figure 1.17	Courbe type d'expansion d'une mousse de bitume.....	38
Figure 1.18	Schéma de l'expansion du bitume dans un seau	39
Figure 1.19	Détermination de la teneur en eau optimum pour moussage	41
Figure 1.20	Schéma de l'appareillage Marshall pour la mesure de la stabilité	49
Figure 1.21	Schéma de la distribution des efforts dans un essai ITS	51

XVIII

Figure 1.22	Courbe Force-Deplacement typique dans essais de résistance mécanique.....	53
Figure 2.1	Étapes du programme expérimental.....	56
Figure 2.2	Photos des composantes sèches utilisées pour constituer le MR-5.....	60
Figure 2.3	Malaxage et séparation du MR-5.....	61
Figure 2.4	Aspect du MR-5 à la mousse de bitume.....	63
Figure 2.5	Marteau Marshall pour le compactage des échantillons. LCMB, 2012.....	63
Figure 2.6	Installation pour l'essai ITS de la Presse Marshall.....	66
Figure 2.7	Schéma chronologique des éprouvettes.....	67
Figure 3.1	Pile de matériau à l'usine où le GBR a été échantillonné.....	69
Figure 3.2	Matériaux types présents dans le GBR utilisé.....	70
Figure 3.3	Courbe granulométrique du GBR avant extraction.....	73
Figure 3.4	Courbe granulométrique du GBR après extraction.....	75
Figure 3.5	Courbe granulométrie du MG-20.....	77
Figure 3.6	Granulométrie MR-5.....	78
Figure 3.7	Représentation de la relation entre la viscosité et la température pour les bitumes utilisés.....	81
Figure 3.8	Détermination de la teneur en eau optimum pour moussage à 170 °C.....	83
Figure 3.9	Courbe d'expansion de la MB à 170 °C.....	85
Figure 3.10	Évolution de paramètres Sc et M(T) de la mousse bitume (MB) à différentes températures d'essai.....	86
Figure 3.11	Diagrammes de caractéristiques physiques essai Marshall.....	91
Figure 3.12	Diagrammes des caractéristiques physiques essais ITS.....	93
Figure 3.13	Variation des teneurs en eau (% Wc) en cours de cure à différentes températures.....	98
Figure 3.14	Teneur en eau des échantillons après les essais Marshall et ITS.....	99

Figure 3.15	Exemple, calcul de pente (module) pour une courbe type	101
Figure 3.16	Aire sous la courbe force déplacement déterminé pour les mélanges M1 et M2	101
Figure 3.17	Graphiques de l'évolution de la résistance Marshall et ITS à température ambiante	103
Figure 3.18	Graphiques de l'évolution de la résistance Marshall et ITS à 10 °C.....	104
Figure 3.19	Graphiques de l'évolution de la résistance Marshall et ITS à 5 °C.....	105
Figure 3.20	Graphiques de l'évolution de la résistance Marshall et ITS à 0 °C.....	106
Figure 4.1	Ensemble des courbes de résistance Marshall. Échelle arithmétique	108
Figure 4.2	Ensemble des courbes de résistance obtenues avec la méthode d'essai Marshall.....	109
Figure 4.3	Corrélation de l'ensemble des valeurs de résistance Marshall.....	110
Figure 4.4	Courbes de résistance ITS à différentes températures de cure.....	111
Figure 4.5	Ensemble des courbes pour la méthode d'essai ITS	112
Figure 4.6	Corrélation des données de résistance ITS.....	113
Figure 4.7	Évolution de la résistance pour les deux méthodes d'essai réalisées	116
Figure 4.8	Temps pour atteindre le 25% de la résistance maximale pour méthode d'essai	117
Figure 4.9	Temps pour atteindre le 75% de la résistance pour les deux méthodes d'essai	117
Figure 4.10	Pentes des courbes de tendance pour les deux méthodes d'essai.....	118
Figure 4.11	Comparaison courbes de temps de cure pour chaque essai de résistance	119
Figure 4.12	$IF_{MARSHALL}$ à différentes températures	121
Figure 4.13	$ID_{MARSHALL}$ à différentes températures	121
Figure 4.14	« Pseudo-modules » essai MARSHALL à différentes températures	122
Figure 4.15	IF_{ITS} à différentes températures de cure	123

Figure 4.16	ID des essais ITS à différentes températures de cure	124
Figure 4.17	« pseudo-modules » ITS à différentes températures	125
Figure 4.18	Relation directe entre les deux méthodes d'essai	127
Figure 4.19	Résistances à 3 et 7 jours pour deux températures de cure	129
Figure 4.20	Stabilités Marshall pour deux MR-5 avec différents types de liant	131
Figure 4.21	Résistance ITS pour deux MR-5 avec différents types de liant	132

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHTO	American Association of State Highway and Transport Officials
AICPR-PIARC	Association mondiale de la route/World Road Association
APG	Asphalt Pavement Guide
ARRA	Asphalt Recycling and reclaiming association
ASC	Aire sous la courbe
ASTM	American Society for Testing and Materials
BARM	Basic Asphalt Recycling Manual
BBR	Bending Beam Rheometer
BNQ	Bureau de Normalisation du Québec
CALTRANS	California Department of Transportation
CBR	California Bearing Ratio
CCA-ACC	Association canadienne de la Construction
CERIU	Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines
CFIPR	Cold Foam In-place Recycling
CIR	Cold In-place Recycling
CMC	Compaction moisture content
DLC-MTQ	Direction de laboratoire des chaussées.
Dmb	Densité du mélange brute
Dmm	Densité maximale du mélange
DSR	Dynamic Shear Reometer
Ex	Rapport d'expansion
ER _m	Expansion maximale
ERF	Enrobés recyclés à froid
ERF-MB	Enrobés recyclés à froid à la mousse de bitume
ESAL	Equivalent standard axle load
FDR	Full-depth reclamation or full-depth recycling
FDR-FA	Full-depth reclamation using foamed asphalt
FHWA	Federal Highway Administration

FI	Foam Index (Indice de foamabilité)
FWD	Falling Weight Deflectometer
GBR	Granulat Bitumineux Routier
GERCBC	Guide d'entretien et réhabilitation des chaussées en béton de ciment.
HIR	Hot In-place Recycling
HMA	Hot-mix asphalt
ID	Indice de ductilité
IF	Indice de fracture
IRI	International Roughness Index
ITS	Indirect tensile strength
LCMB	Laboratoire des chaussées et matériaux bitumineux (ÉTS)
MDD	Maximum dry density
MG	Matériel granulaire
MMC	Mixing moisture content
Mn-DOT	Minnesota Department of Transportation
MR	Matériaux recyclés
MR5	Enrobé recyclé de type MR5
MR-5 MB	Enrobé recyclé de type MR5 à la mousse de bitume
MR-5 É	Enrobé recyclé de type MR5 à l'émulsion de bitume
$M_{(T)}$	Indice de Moussabilité
MTQ	Ministère de Transports du Québec
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
OMC	Optimum moisture content
PAV	Pressure Aging Vessel
PCG	Presse de cisaillement giratoire
PEEIC	Program for energy conservation of natural resources Canada's office of Energy Efficiency
PG	Performance grade
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RTFOT	Rolling thin film oven test

Sc	Surface de contraction
SM	Stabilité Marshall
STEPPE-ÉTS	Station Expérimentale des Procédés Pilotes en Environnement – École de Technologie Supérieure
$t_{1/2}$	Foam half-life (Demi-vie)
TAC-ATC	Association des transports du Canada
TRB	Transportation Research Board
TSR	Tensile strength retained
USIRF	Union des syndicats de l'industrie routière française
WAPA	Washington Asphalt Pavement Associations
Waj	Eau d'ajout
Wopt	Teneur en eau optimal
WsDOT	Washington State Department of Transportation

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS GEOMETRIQUES

LONGUEUR

m	mètre
cm	centimètre
mm	millimètre
µm	micromètre

AIRE

m ²	mètre carré
cm ²	centimètre carré
mm ²	millimètre carré

VOLUME

m ³	mètre cube
cm ³	centimètre cube
mm ³	millimètre cube

UNITÉS DE MASSE

kg	kilogramme
g	gramme
mg	milligramme

MASSE VOLUMIQUE

kg/m ³	kilogramme par mètre cube
-------------------	---------------------------

UNITÉS DE TEMPS

h	heure
min	minute
s	seconde
µs	microseconde

UNITÉS DE FORCE ET PRESSION

N	newtons
Pa	pascals
kPa	kilopascals
MPa	megapascals
bar	bar

MOMENT D'UNE FORCE

N.m	newton-mètre
-----	--------------

ENERGIE

J	Joule
---	-------

UNITÉS CALORIFIQUES

°C	degré Celsius
----	---------------

INTRODUCTION

Le recyclage des matériaux de chaussées bitumineuses est une pratique de réhabilitation amplement connue. Il existe plusieurs techniques de retraitement en fonction du matériau à recycler, du lieu de fabrication du nouvel enrobé, ainsi que du type de liant utilisé. Parmi ces techniques, le recyclage en place à froid s'avère le choix le plus économique et celui qui requiert le moins de consommation d'énergie.

Le présent mémoire vise à contribuer au développement des connaissances quant au comportement des enrobés recyclés à froid (ERF). La recherche vise à évaluer l'impact de la température de cure à jeune âge sur la montée en résistance mécanique des matériaux recyclés de type 5, traités à la mousse de bitume (MR-5 MB).

Le premier chapitre présente une revue exhaustive de la littérature allant d'un bref portrait de l'état des connaissances sur le recyclage des chaussées, à la description technique du recyclage en place à la mousse de bitume. Cette revue de la littérature met l'accent sur le calcul des paramètres d'optimisation des propriétés de la mousse de bitume, ainsi que des indices associées aux résultats de résistance obtenus.

Le deuxième chapitre porte sur les objectifs de la recherche réalisée dans le cadre de ce mémoire ainsi que sur la description de la méthodologie et des matériaux utilisés. Le troisième chapitre présente les résultats obtenus et le quatrième chapitre porte sur l'analyse des résultats. Finalement, on présente les conclusions et on propose certaines recommandations et quelques sujets pour de futures recherches.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Recyclage des enrobés bitumineux

L'association mondiale de la route définit le recyclage des matériaux des chaussées comme : « Réutilisation de matériaux routiers existants dans la construction des chaussées, avec ou sans changement des caractéristiques des matériaux » (PIARC, 2001). Cela signifie que tout enrobé bitumineux ou tout matériau granulaire provenant des chaussées est susceptible d'être recyclé, régénéré ou réutilisé pour la reconstruction ou la réfection routière (ARRA, 2001).

Les granulats issus du décohesionnement de chaussées bitumineuses sont communément désignés au Québec, Granulat Bitumineux Recyclé (GBR), ou encore, sous son acronyme anglais : *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Parmi les différentes techniques de réhabilitation routière, les enrobés recyclés à froid (ERF) constituent une alternative écoénergétique, économique et environnementale intéressante (ARRA, 2001; PIARC, 2008a; Thenoux, Gonzalez et Dowling, 2007)

Il y a trois exigences pour le recyclage d'enrobés : 1) être rentable, 2) être respectueux de l'environnement et 3) avoir de bons résultats (Kandhal et Mallick, 1997). En 2004, le Conseil des Constructeurs de routes et de grands travaux de l'Association Canadienne de la Construction (CCA-ACC) a fait de la réduction de la consommation d'énergie l'une des priorités de l'industrie de la construction routière (CCA-ACC, 2005). Les avantages du recyclage sont plus marqués du point de vue de l'environnement, de la technique et, bien sûr de l'économie (Thenoux, Gonzalez et Dowling, 2007).

Quoi qu'il en soit, le recours à des agrégats d'enrobés dans la confection de nouveaux enrobés pour la construction routière doit se faire dans la perspective d'atteindre le même niveau de qualité et de performance que celui obtenu pour les enrobés conventionnels : ce sont les propriétés d'usage attendues qui gouvernent la formulation de ces enrobés. À cet

égard, les efforts de recherche ont permis jusqu'à aujourd'hui de formuler des enrobés contenant différentes proportions de GBR. Le Tableau 1.1 montre les taux d'acceptation de matériau provenant des anciennes chaussées ainsi que la quantité annuelle produite durant l'année 2009, dans différents pays.

Tableau 1.1 Comparatif des taux de recyclage de GBR dans différents pays.

	Production GBR millions de tonnes	Taux de recyclage du GBR réutilisé dans des infrastructures routières et dans des nouveaux revêtements	% d'acceptation de GBR dans un nouvel enrobé	Remarques
Europe	54	jusqu'à 90% *	10% surface de roulement 50 % couches de base	Pour ERF peut être jusqu'à 100%. Cependant, l'utilisation du GBR dépend de la couche à traiter (Planche, 2008) (EAPA, 2012)
France	5,9	45%	10%	Limite sans besoin d'essais de validation (EAPA, 2012)
États Unis	90,7	95 %	10 % — 20 % dans la couche de roulement 20% - 50 % dans les couches de base	80% des Départements de transports aux États-Unis acceptent l'utilisation du GBR dans la couche de roulement(FHWA, 2011)
Ontario	4	95%	20 % — 50 %	85 % dans la fabrication des enrobés à chaud et tièdes et 10% dans couches de support (EAPA, 2012)
Québec	9	5 %	15 % — 50 %	(Bitumequebec, 2012)

*Le taux de recyclage et le pourcentage d'acceptation varient d'après les politiques de gestion des déchets de chaque pays.

Au Québec, la production de GBR est passée d'une tonne en 1993 à presque 9 millions de tonnes en 2009. Les pourcentages d'acceptation du GBR proviennent du résultat des sondages réalisés en Europe et aux États-Unis (Planche, 2008). Il est important de

mentionner qu'il y a un consensus par rapport au développement des normes et spécifications que vise à augmenter l'usage du GBR dans les nouveaux enrobés.

1.2 GBR comme source de matériaux granulaires

Aux États Unis, plus de 90 % des routes et des autoroutes sont construites en enrobé bitumineux (FHWA, 2011). Au Québec, 94 % des routes gérées par le Ministère des transports du Québec (MTQ) et 80 % des pistes d'aéroport correspondent à des chaussées bitumineuses (Bitume Quebec, 2010). Quand la vie utile du revêtement de ces routes est achevée, ce sont les mêmes matériaux qui peuvent être réutilisés.

Les GBR sont produits lorsqu'on fait des travaux de planage, réhabilitation ou reconstruction de la chaussée (FHWA, 2011). Le matériau pulvérisé ou décohesioné devient le fraisât, lequel contient une partie de bitume et peut être recyclé à 100% (Serfass, 2007).

La réhabilitation de chaussées est considéré un procédé courant suite à l'imposition de l'embargo pétrolier des années 1970 (Carter, 2011). Depuis les 20 dernières années, le développement du recyclage des chaussées a pris de l'ampleur partout dans le monde. Aux États-Unis, plusieurs études ont favorisé l'utilisation de GBR, notamment les recherches effectuées pour la *Federal Highway Administration* et les différents départements de transport de chaque état. Au Québec, l'usage des enrobés recyclés à froid, est une pratique commune depuis le début des années 90 (Bergeron, 2008).

Étant donné que le GBR contient du bitume, on peut considérer le GBR comme un matériau granulaire enrichi (PIARC, 2003). Le développement des techniques et des procédures est lié au type de retraitement à faire, la couche à traiter, les pourcentages des matériaux et de liants d'ajout, etc. Dans les prochaines pages, les aspects les plus importants seront présentés.

1.2.1 Classification des matériaux recyclés

La norme NQ-2560-600/2002 du Bureau de normalisation du Québec classe les matériaux recyclés (MR). Ces matériaux recyclés peuvent être constitués du mélange des résidus de béton, d'enrobés bitumineux, de briques et de granulats naturels. La Figure 1.1 est une représentation graphique de la classification des MR suivant les différents pourcentages de matériaux constituants. On peut distinguer sept catégories de MR en fonction des divers éléments qui les composent. Notons que la recherche menée dans le cadre du présent mémoire se concentre essentiellement sur un MR de type 5.

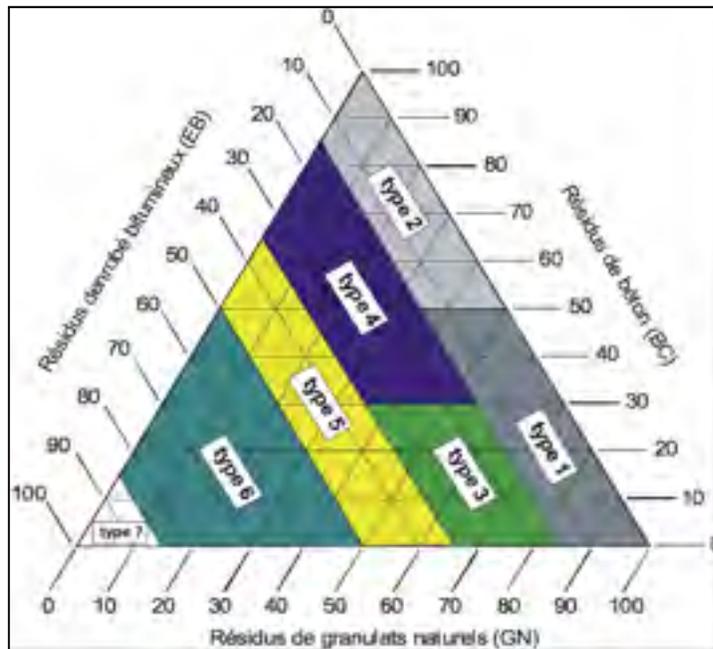


Figure 1.1 Classification des matériaux recyclés
Tiré de (NQ, 2002) dans Paradis (2006)

La réutilisation des matériaux provenant des chaussées est fortement liée aux caractéristiques de la chaussée existante. Le type de retraitement dépend de certaines conditions techniques : équipements; main-d'œuvre; type et méthode d'ajout de liant; de plusieurs enjeux environnementaux : disponibilité des matériaux, climat, liant utilisé; et du niveau d'intervention : les couches à traiter, la profondeur d'intervention, et bien sûr, des facteurs de nature économique (PIARC, 2003; Thenoux, Gonzalez et Dowling, 2007).

1.3 Techniques de retraitement des chaussées

Une fois que la durée de vie (cycle de vie) d'une chaussée est achevée, on doit envisager différents scénarios pour rétablir son état initial ou bien pour l'adapter aux sollicitations des conditions actuelles et futures.

D'après la Guide d'entretien et réhabilitation des chaussées en béton de ciment (GERCBC), le terme réhabilitation fait référence à « la remise en état d'une chaussée ». La Direction du Laboratoire des Chaussées (LC) du Ministère de transports du Québec fait une remarque importante en précisant qu'il s'agit d'« interventions habituellement plus lourdes et plus étendues que celles pratiquées dans le cadre des opérations d'entretien » (MTQ, 1999).

Du point de vue de l'intervention, les retraitements d'une chaussée peuvent être divisés en deux catégories : les interventions de surface et celles en profondeur. La Figure 1.2 présente un schéma des types d'interventions pouvant être menées lorsqu'une réhabilitation s'avère nécessaire. Chaque couche correspond à un matériau ou à une intervention en particulier.

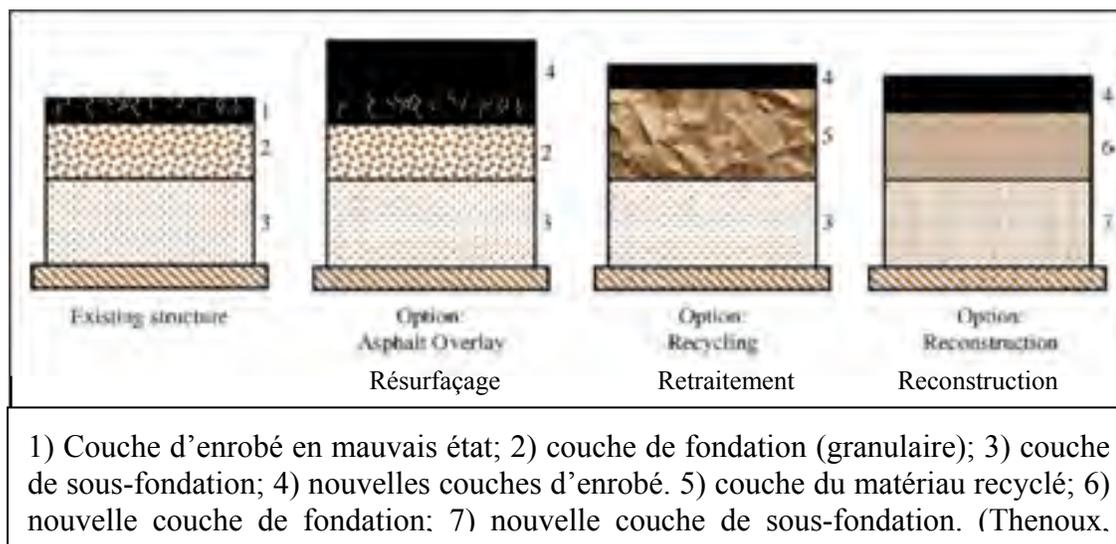


Figure 1.2 Schéma d'une chaussée existante et des techniques de réhabilitation éventuelle
Tirée de (Thenoux, Gonzalez et Dowling, 2007).

L'intervention qui consiste à mettre en œuvre une couche bitumineuse en surface, un resurfaçage (overlay), avec ou sans planage, vise la protection du revêtement sans contribution structurelle. L'application et la portée de ce type d'intervention sont définies par l'agence ou le gestionnaire de la route, car cela peut être considéré comme des travaux d'entretien périodique (WAPA, 2011a). Cependant, si la cause de la dégradation de la structure de la chaussée qui a nécessité un resurfaçage est négligée, les fissures d'une couche sous-jacente pourraient éventuellement se refléter dans la nouvelle couche et limiter la durée de vie utile du resurfaçage.

Par ailleurs, les interventions en profondeur sont des solutions à plus long terme et dirigées vers des problèmes plus spécifiques qui requièrent des interventions directement sur les couches d'assise ou de fondation. Une auscultation rigoureuse de l'ouvrage doit être réalisée afin de permettre d'identifier la nature des problèmes.

Si le but d'une intervention est de ramener à des conditions idéales une chaussée dans laquelle on a identifié des problèmes majeurs ou structurels, il est possible que les conditions nécessitent des travaux plus étendus et à une profondeur qui peut atteindre le sol support. Il s'agira alors d'une reconstruction. C'est l'option à privilégier lorsque la réfection va de pair avec un réaménagement de la route qui rend nécessaire des modifications importantes du tracé (Wirtgen, 2004b). Cependant, il est clair que cette solution est souvent l'option la plus chère.

En ce qui concerne les techniques de recyclage d'enrobés, elles peuvent être divisées en différentes catégories, lesquelles, à leur tour, peuvent être subdivisées selon le lieu où le traitement est fait, la température de fabrication et le type de liant utilisé. La Figure 1.3 illustre les trois différentes conditions de traitement et permet de retracer le type de traitement abordé dans ce projet.

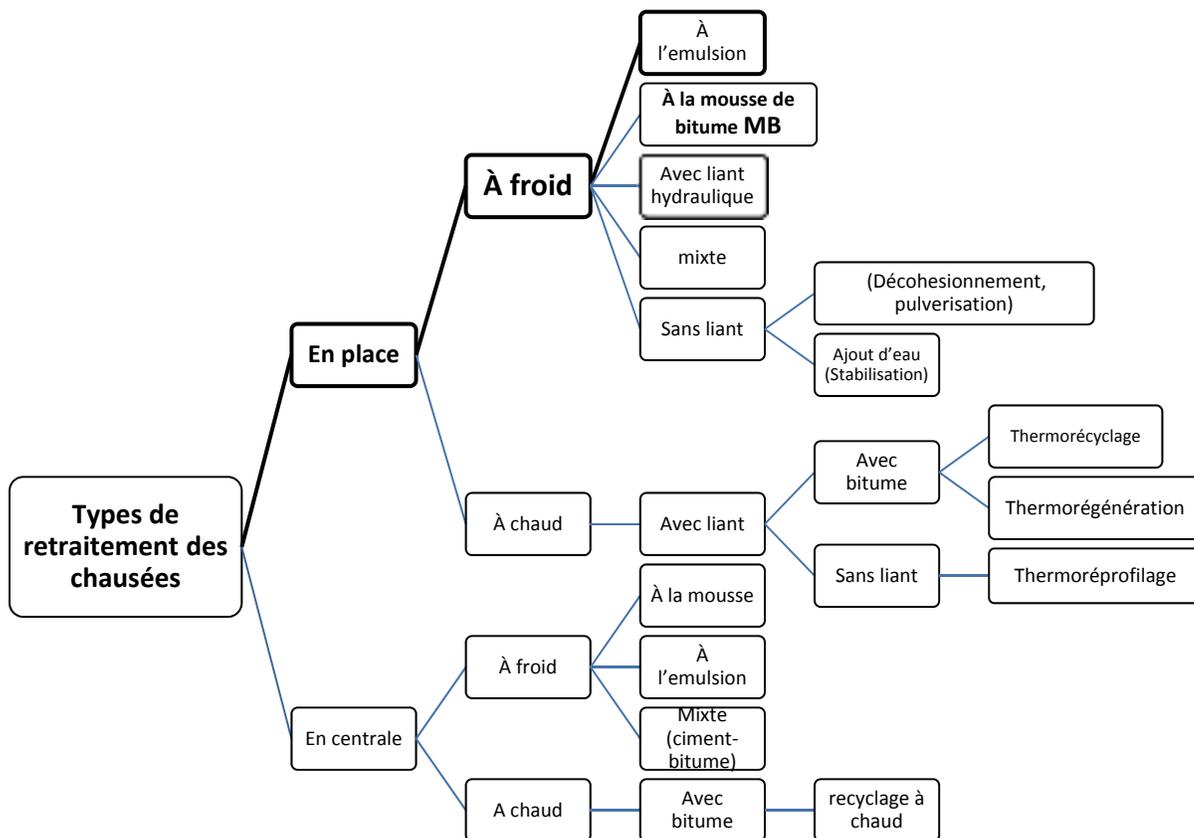


Figure 1.3 Classement des différents retraitements des chaussées

Étant donné la classification tirée des Figures 1.1 et 1.3, dorénavant, on fera référence au matériau recyclé de type 5 traité à la mousse de bitume comme MR-5 MB. À la section suivante, on présentera en détail chaque type de retraitement selon le lieu et la température de fabrication, et ce, en référence à la Figure 1.3.

1.3.1 Recyclage en centrale à chaud

L'Office de la langue française (QC, 2010) définit le recyclage en centrale comme : « Traitement curatif d'une chaussée bitumineuse avec malaxage en centrale d'enrobés de récupération, apport variable de granulats et de liants, et recomptage ultérieur ». Cela

donne une idée immédiate du lieu de traitement et de la possibilité d'ajouts au matériau retraité.

La fabrication d'un enrobé recyclé à chaud n'est pas très différente de celle des enrobés conventionnels. Le fraisât mobilisé en centrale est fragmenté au besoin et stocké suivant de la granulométrie appropriée. Pour la confection d'un nouveau matériau bitumineux, le fraisât est mélangé avec des granulats vierges au besoin et un liant bitumineux d'apport (ARRA, 2001; PIARC, 2003; Serfass, 2009). Le matériau retraité en central d'enrobage à chaud est ensuite transporté sur le site où il est répandu et compacté mécaniquement, comme un enrobé traditionnel à chaud (PIARC, 2001).

La réutilisation du liant vieilli est un critère essentiel à la réussite de l'opération du retraitement d'un GBR (Serfass, 2007). De ce fait, si le procédé d'ajout du liant d'apport est fait à une température excessive ou si le malaxage est trop long, le bitume risque d'être oxydé, entraînant ainsi une diminution de la performance de l'enrobé bitumineux.

1.3.2 Recyclage en place à chaud

Le recyclage en place à chaud, (Serfass, 2009b) comprend trois étapes de type « thermo – R »: 1) le chauffage progressif par le haut de la couche d'enrobé à retraiter, 2) la scarification de la couche d'enrobé existante et, 3) la remise en place. En fait, le procédé consiste à faire passer une plaque chauffante ou un thermorégénérateur automoteur au-dessus de la surface de la couche d'enrobé à retraitée, pour ramollir l'enrobé et, par la suite, de retraiter le matériau suivant la technique choisie. Les trois procédés de type « thermo — R » sont :

Le thermoreprofilage correspond à une remise en profil de la couche d'enrobé sans enlever le matériau et sans apport d'enrobé neuf. En conséquence, l'enrobé ramolli devient apte pour une nouvelle compaction ce qui aura comme effet de corriger les petites différences de profil

du revêtement ou les imperfections de la surface de roulement (ARRA, 2001; Bergeron, 1996; Serfass, 2009).

La thermorégénération considère un processus de scarification jusqu'à une profondeur spécifique en fonction du type de correction à faire. Par la suite, un préchauffement de la surface permet de traiter la couche sous-jacente à la couche scarifiée afin de corriger les profils. Finalement, une nouvelle couche d'enrobé à chaud est mis en œuvre comme mesure de protection la couche retraitée (ARRA, 2001; Bergeron, 1996; Serfass, 2009).

Finalement, le procédé par **thermorécyclage** prévoit une scarification de la couche de surface du revêtement sur une profondeur plus importante (décohésionnement). Le matériau décohésionné est alors mélangé à de nouveaux matériaux granulaires et éventuellement, à des additifs régénérants pour redonner des propriétés rhéologiques satisfaisantes du bitume de l'enrobé scarifié. On obtient ainsi une nouvelle couche d'enrobé (ARRA, 2001; Bergeron, 1996; Serfass, 2009a)

Il faut souligner que les traitements à chaud en place exigent une consommation d'énergie considérable, bien supérieure à celle requise par les traitements à froid.

1.3.3 Recyclage en centrale à froid

Dans ce type de retraitement, ni le GBR ni les granulats à additionner ne sont chauffés dans un tambour séchoir d'une centrale d'enrobage alors que le liant ajouté, le liant d'ajout, sera conditionné suivant différentes températures au besoin. Par contre, le liant bitumineux d'ajout doit garder les limites de température prescrites en accord avec les normes et en fonction des caractéristiques du fabricant (Lelièvre, 1994). Par exemple, une émulsion doit être chauffée au moins à 60 °C, ou dans le cas de la production de mousse, le bitume doit être chauffé à une température comprise entre 160 °C et 180 °C.

Le recyclage en centrale à froid comporte certaines restrictions, en particulier sur les routes à faible trafic où les coûts de transport vers les sites d'usines sont susceptibles d'être plus élevés. Dans ce cas, le recyclage en place à froid est probablement plus fréquemment utilisé (FHWA, 2012). L'utilisation de centrales d'enrobage à froid, doit correspondre à des projets d'une envergure suffisamment grande pour justifier leur déplacement sur le chantier et réduire ainsi les coûts de transport des matériaux et de l'équipement (Serfass, 2009).

Du point de vue environnemental, le recyclage à froid consomme moins d'énergie que le recyclage à chaud, et ne produit pas d'évaporation d'eau ni de fumées nocives (fumées bleues) ni de brouillard sur le chantier. De plus, la production de CO₂ est considérablement réduite (SÉTRA, 2004).

1.3.4 Recyclage en place à froid

Le recyclage en place à froid est réalisé à partir des matériaux de la chaussée décohésionnée auquel on ajoute ou non des granulats vierges. Également, on peut ajouter des liants hydrauliques comme le ciment Portland ou la chaux hydraulique, lesquels peuvent être répandus sur la surface de la chaussée, avant du décohésionnement. Les liants hydrocarbonés, comme l'émulsion de bitume ou la mousse de bitume, sont alors injectés dans le matériau fraisé à l'intérieur de la machine avec les quantités définies dans la formulation du laboratoire.

Comme il est mentionné pour Serfass (2007), on ajout habituellement de l'eau pendant les phases de fraisage et de malaxage. Donc il est important de ne pas dépasser les quantités prescrites dans la formulation afin d'obtenir un matériau maniable et performant.

Les expériences pour le retraitement en place à froid sont très variées. Les premiers chantiers remontent à 1970, aux États-Unis, et à 1980 en France. Dans les dernières années, il y a eu un fort développement au Royaume-Uni, en Norvège, en Afrique du Sud et en France (Serfass, 2007). Ces expériences utilisant différents matériaux, formulations et additifs, tout en

assurant un suivi de la performance, ont permis d'améliorer significativement l'homogénéité des travaux ainsi que le contrôle de la qualité (PIARC, 2003).

Au Québec, on utilise avec succès cette technique depuis 1991. En 1994, 108 km de chaussées ont été retraitées suivant le procédé de retraitement en place à froid. Depuis, le développement de la technique a continué sans cesse. D'après Bergeron (2005), entre 1991 et 2004, plus de 968 km de chaussée avaient été retraités suivant cette technique.

Afin de traiter le matériau granulaire du nouvel enrobé, un liant bitumineux d'ajout sous forme d'émulsion de bitume ou de mousse de bitume est nécessaire. L'introduction d'un liant d'ajout se fait pendant la phase de décohésionnement ou lors d'une phase séparée du mélange, selon l'atelier de retraitement utilisé (Serfass, 2009). Au Québec, l'émulsion est le liant d'ajout le plus utilisé pour le retraitement des MR de type 7, tandis que pour les activités de retraitement des MR de type 5, la mousse de bitume est plus populaire.

1.3.4.1 Techniques de retraitement en place à froid

Selon la PIARC (2003), « Le retraitement en place à froid consiste à fraiser ou fragmenter les matériaux de l'ancienne chaussée ». Cette technique permet de recycler les matériaux d'une ou plusieurs couches de la chaussée. L'ajout d'un liant permet de donner de la cohésion au matériau de la couche retraitée (Thenoux, Gonzalez et Dowling, 2007).

Pour ce faire directement en place, on doit disposer d'un train de recyclage. Le train de recyclage est composé d'une citerne de bitume (ou à l'émulsion), d'une planeuse, d'un malaxeur et d'un finisseur. Une fois bien malaxé, le nouveau matériau traité est acheminé dans un finisseur qui étend l'ERF de la même manière qu'un enrobé pose à chaud. Des rouleaux assurent la compaction derrière le finisseur. Dans les cas nécessitant du ciment Portland, celui-ci est ajouté à sec devant la planeuse. (Bergeron, 2001; 2005; Lacombe, 2008; PIARC, 2008b)

Quand la cure du matériau est jugée terminée, une couche de roulement en enrobé bitumineux à chaud est appliquée sur l'ERF pour assurer une meilleure durée de vie à la chaussée et pouvoir résister adéquatement aux charges de trafic (Lacombe 2008; (Bergeron, 2006b). La technique de ERF rétablit partiellement la capacité structurale de la chaussée et réalise une excellente qualité de roulement (Theyse, 2004).

D'après Bergeron (2006), selon le contexte ou l'état de la chaussée à récupérer, on peut utiliser trois procédés. (voir Figure 1.4):

- **décohésionnement + revêtement** : Applicable aux routes à faible sollicitation de trafic (vers 100 véhicules lourds/jour/voie), à condition que les matériaux granulaires de fondation soient de bonne qualité et que l'épaisseur du revêtement bitumineux soit plus ou moins constant. Par la suite, il est nécessaire de recouvrir la couche de matériau retraitée avec une nouvelle couche d'enrobé à chaud (voir Figure 1.4 a);
- **décohésionnement + stabilisation** : Procédé recommandé pour les routes fortement sollicitées. Dans ce procédé, on ajoute le liant, soit hydrocarboné, hydraulique ou mixte, au matériau décohésionné. La quantité de liant d'ajout est déterminée après une étude de formulation basée sur des essais de compression Marshall (voir Figure 1.4 b);
- **décohésionnement + rechargement** : Cette technique consiste à fragmenter le revêtement bitumineux sur toute son épaisseur en y incorporant une nouvelle couche de fondation granulaire sous-jacente (Figure 1.4 c). Avant d'être recouvert, le matériau « décohésionné » peut être traité à froid sur une épaisseur de 100 à 150 mm à l'aide d'un liant hydrocarboné (émulsion, bitume moussé) ou d'un liant mixte avec ajout d'un liant hydraulique (Bergeron, 2005). Cette technique s'avère très efficace dans le milieu rural, car il inclut des modifications de profil ou d'élargissement de la chaussée (Bergeron, 2006a).

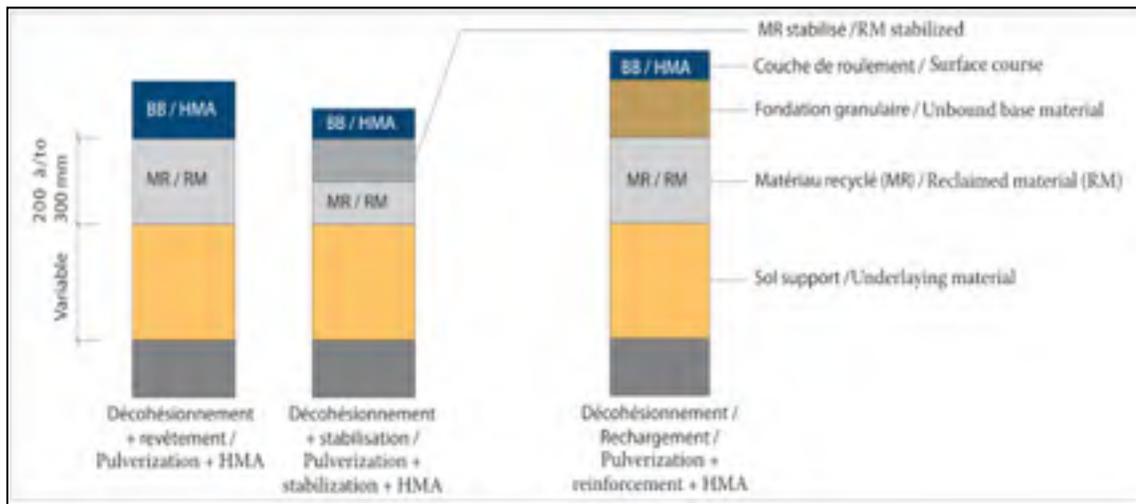


Figure 1.4 Principes techniques pour le décohesionnement (Bergeron, 2006b)

Les avantages du recyclage en place à froid, sont considérables : rapidité d'exécution, élimination du transport des matériaux, réduction des coûts en carburants, de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, diminution des temps d'attente des usagers, etc. Les économies en matériaux et son transport sont significatifs, puisque la totalité des granulats et du liant est réutilisée. Il s'agit d'une alternative efficace et économique pour la reconstruction des routes revêtues (matériaux bitumineux en surface) dégradées (Brosseaud, 2007).

1.3.4.2 Formulation des enrobés recyclés à froid

La formulation des enrobés recyclés à froid consiste à déterminer les quantités et les proportions optimales des composantes pour obtenir les meilleurs résultats du point de vue mécanique, technique, économique et environnemental. La Figure 1.5 montre un schéma des relations entre les quantités en pourcentage des matériaux de type liant et les propriétés en fonction de la résistance à la déformation permanente.

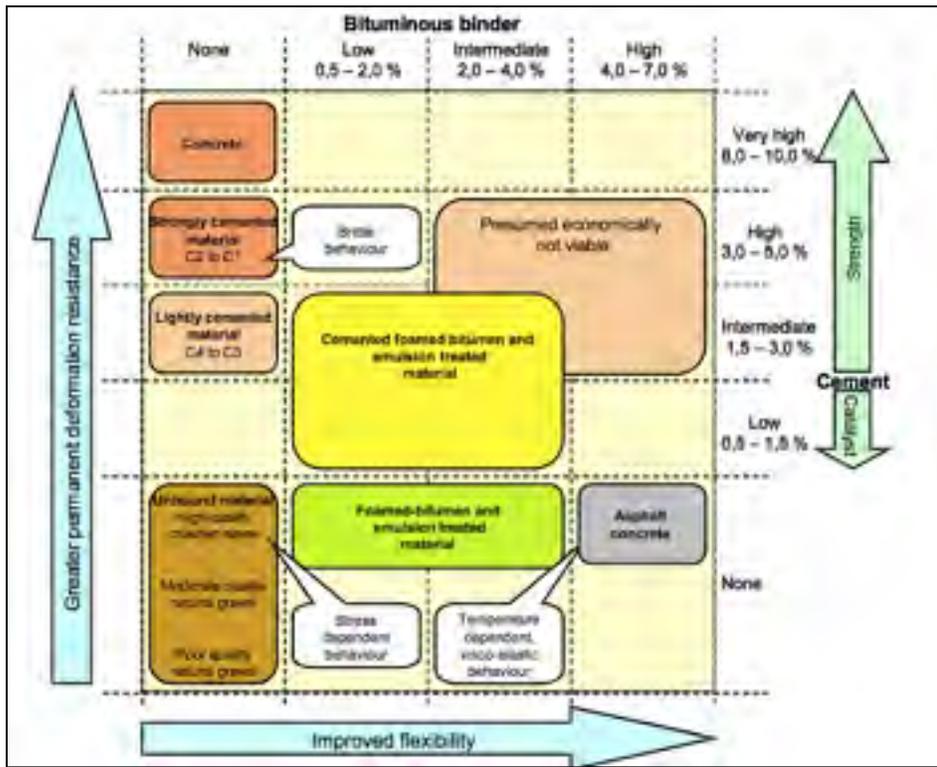


Figure 1.5 Propriétés et comportements des différents types de matériaux
Tirée de (Theyse, 2004)

Souvent le GBR contient une grande quantité de particules fines ou est contaminé avec des matériaux de couches sous-jacentes. En général, il est donc nécessaire d'ajuster le matériau afin d'améliorer la granulométrie du mélange recyclé (WAPA, 2011b). L'ajout de nouveaux granulats a aussi une influence sur les propriétés de mélange recyclé, telles que la stabilité, la durabilité ou la maniabilité (D. Jones, 2008b). C'est pourquoi les proportions de chaque composant d'un matériau recyclé (MR), doivent être très bien établies afin d'optimiser les propriétés des matériaux qui font partie du nouveau mélange.

L'équilibre entre les différents facteurs permettra une formulation en accord avec les objectifs du projet. Il est possible que les matériaux traités à la mousse de bitume donnent des résultats satisfaisants du point de vue des propriétés mécaniques et de l'utilisation des ressources. Par contre, ce type de traitement demande des équipements spécialisés et pour de petits projets cette technique pourrait s'avérer une option relativement coûteuse.

Les techniques de recyclage des enrobés, et spécialement des ERF, nécessitent une quantité optimale d'eau et de bitume pour permettre que le nouveau matériau soit économique et performant. La nouvelle couche d'enrobé qu'on obtient devra avoir une stabilité suffisante pour résister aux applications de charges sans présenter des déformations excessives ou de la fissuration. De même, le matériau retraité doit démontrer une certaine insensibilité aux effets de l'humidité (LC 26-002-MTQ, 2004). À cet effet, Bitume Québec et le Laboratoire sur les Chaussées et les Matériaux Bitumineux de l'ÉTS, le LCMB), présente une charte des dosages typiques suivant le procédé de recyclage à froid à l'émulsion ou à la mousse de bitume. (Figure 1.6).

TYPE I	ÉMULSION		Émulsion (L/m²)¹		Ciment (Kg/m²)	Eau (L/m²)			
			Teneur en bitume résiduel ajoutée (%)		Taux d'ajout (%)	Teneur en eau (%)			
		Épaisseur traitée (mm)	0,8 %	1,0 %	1,4 %	0,5 %	4,5 %	5,5 %	6,5 %
		75	2	2	3	1	7	9	10
		100	3	3	5	1	10	12	14
		150	4	5	7	2	14	17	21
		200	5	7	9	2	19	23	27
		250	7	8	12	3	24	29	34
TYPE II OU III	ÉMULSION		Émulsion (L/m²)¹		Ciment (Kg/m²)	Eau (L/m²)			
			Teneur en bitume résiduel ajoutée (%)		Taux d'ajout (%)	Teneur en eau (%)			
		Épaisseur traitée (mm)	1,8 %	2,2 %	2,6 %	1,0 %	4,5 %	5,5 %	6,5 %
		75	5	6	7	1	7	9	10
		100	6	8	9	2	10	12	14
		150	9	12	13	2	14	17	21
		200	12	15	18	3	19	23	27
		250	15	19	22	4	24	29	34
TYPE II OU III	MOUSSE		Bitume moussé (Kg/m²)		Ciment (Kg/m²)	Eau (L/m²)			
			Teneur en bitume résiduel ajoutée (%)		Taux d'ajout (%)	Teneur en eau (%)			
		Épaisseur traitée (mm)	2,4 %	2,7 %	3,0 %	1,0 %	4,5 %	5,5 %	6,5 %
		75	4	4	5	1	7	9	10
		100	5	6	6	2	10	12	14
		150	8	9	9	2	14	17	21
		200	10	11	13	3	19	23	27
		250	13	14	16	4	24	29	34

Dosages calculés à partir d'une densité brute à base sèche de 2100 kg/m³ Dosage le plus couramment utilisé

¹Pour 60% de bitume résiduel dans l'émulsion (S.G.= 1,017)

Figure 1.6 Dosages typiques pour le retraitement en place
Tirée de Bitume Québec (2007)

1.3.4.3 Avantages et désavantages du recyclage en place à froid

Comme il a déjà été mentionné, le choix de recycler des enrobés bitumineux répond à trois exigences : être rentable, être respectueux de l'environnement et obtenir de bons résultats (Kandhal et Mallick, 1997) . L'épargne dans l'utilisation des ressources naturelles réduit les coûts. Dans le cas des ERF, le bitume de l'ancien matériau devient une partie du liant du nouveau mélange, de sorte qu'il sera comptabilisé dans le calcul du dosage en bitume total et permettra ainsi de réduire la teneur en bitume d'ajout.

De même, aucun transport de matériaux ne s'avère nécessaire et il est possible d'ouvrir rapidement la voie pour la circulation automobile (PIARC, 2003). Pour ARRA (2003), le recyclage en place à froid avec la mousse de bitume peut réduire la consommation d'énergie de 20 % à 50 % par rapport à un nouveau projet de pavage avec enrobé à chaud, et jusqu'à 244 % par rapport à un projet de reconstruction.

Pour Thenoux (2007), les économies de consommation d'énergie par rapport au total de ressources utilisées lors de la production des ERF, dont le fuel, le transport, le temps des machines, etc. optimisent les ressources et font des ERF une option rentable. Bergeron, (2001; 2008) estime que la diminution de la température de chauffage des matériaux pour les ERF réduit considérablement la consommation d'énergie.

Par ailleurs, il est possible de réduire les émissions environnementales, comme les gaz à effets de serre ou la quantité des fumées à la centrale de fabrication (ARRA, 2001). Un dernier avantage à nommer consiste en la réduction jusqu'à 60 % à 70 % de l'usage des nouveaux granulats, ce que signifie une réduction importante en la consommation des ressources naturelles (PIARC, 2003).

Finalement, l'efficacité peut être mesurée du point de vue de la performance. Pour le MTQ, la technique ERF peut retarder la remontée des fissures jusqu'à un 70 % en termes de temps,

et le niveau de dégradations et de vieillissement de la chaussée peut être ralenti en permettant jusqu'à six ans de service additionnels (Bergeron 2001, DLC-MTQ).

Cependant, cette méthode comporte certains inconvénients du point de vue du comportement du nouveau matériau. Par exemple, leur hétérogénéité est plus marquée, et il favorise le développement des fissures longitudinales lorsque des bandes adjacentes ne sont pas correctement reliées. (ARRA, 2001).

Un autre désavantage important est que cette technique n'est pas recommandée si la température est inférieure à 10 °C ou s'il pleut (ARRA, 2001). Néanmoins, une présentation pendant la réunion annuelle de l'Association des transports du Canada (ATC-TAC) en 2004, a montré qu'il a été possible de poser des ERF pendant une pluie légère si l'humidité des matériaux est contrôlée et la quantité d'eau requise lors de la formulation est ajustée en chantier (Davidson, 2004).

Par ailleurs, une faible température de l'air peut influencer le processus de cure, affecter la viscosité du bitume résiduel qui reste dans l'agrégat bitumineux ou, encore provoquer une diminution de la cohésion du mélange. Cela pourrait entraîner des dégradations importantes, telles que les arrachements, dans les premières heures de sa mise en service (Davidson, 2004). On s'est intéressée à ce type d'incertitudes et c'est sur cet aspect particulier que porte cette recherche.

1.4 Les liants dans les matériaux recyclés

D'après Di Benedetto et Corté(2005), le comportement mécanique des enrobés avec matériaux retraités dépend du dosage du liant d'ajout ainsi que de la nature et des conditions d'homogénéité de la structure de la chaussée qui est retraitée. En conséquence, le type de liant utilisé est un des facteurs clés dans le retraitement.

La Figure 1.7 illustre, en bref, les différentes combinaisons de liants utilisées pour les retraitements en place des matériaux bitumineux ou granulaires. Chaque alternative exige des formulations, des équipements, des techniques et des procédures différents.

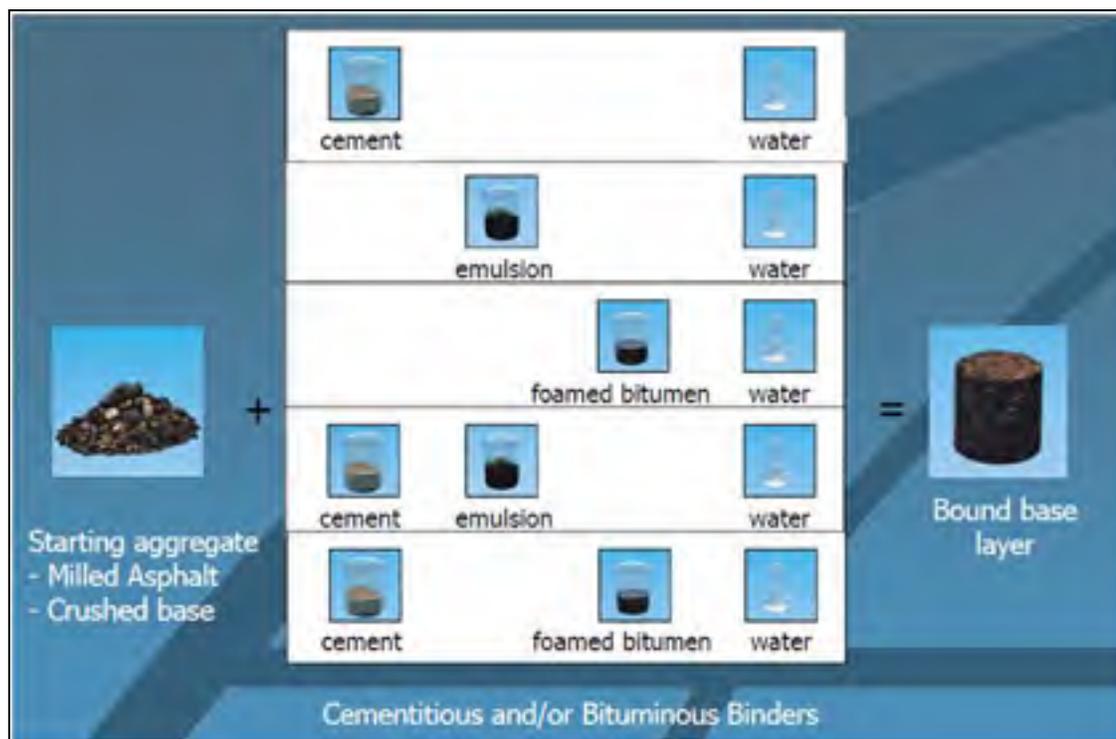


Figure 1.7 Types de liant utilisé pour le recyclage
Tirée de Wirtgen (2004b)

La guide de retraitement des matériaux recyclés (PIARC, 2003) fait un résumé des liants couramment utilisés pour la technique des ERF. Dans le cas de l'utilisation des liants bitumineux, les liants à durcissement lent sont préférés afin de minimiser la fissuration thermique et d'assurer un temps suffisant pour le compactage (PIARC, 2003).

Dans les sous-sections suivantes, il sera question des types de liants utilisés lors des activités de retraitement des chaussées. Le ciment comme liant hydraulique, de l'émulsion et de la mousse de bitume comme liants hydrocarbonés et ainsi que de la méthode d'ajout de la mousse de bitume.

1.4.1 Ciment Portland

Le ciment Portland, étant un liant « hydraulique », s'hydrate avec l'eau en formant une matrice plus rigide qui lie les particules granulaires entre-elles (Bellerose, 2008). Le ciment Portland permet d'obtenir un développement rapide de la résistance du matériau retraits (Rens, 2003). Quand on travaille avec des matériaux plastiques, comme certaines couches de fondation granulaires polluées par des argiles, utiliser une combinaison de chaux hydraulique et de ciment Portland peut être adapté. La chaux floclera les particules fines, par une réaction rapide d'échange ionique, tandis que la teneur en eau sera réduite en réagissant avec le ciment Portland (PIARC, 2001; Wirtgen, 2004b).

Le retraitement des routes bitumineuses peut se faire en combinaison avec un liant hydrocarboné, soit à l'aide d'une émulsion de bitume ou d'une mousse de bitume (Rens, 2003; Serfass, 2007; PIARC, 2001). La couche retraits offre une portance moins grande qu'une couche en enrobé à chaud et accuse une incapacité à long terme à résister au gel ainsi qu'aux infiltrations d'eau. L'utilisation de deux types de liants donne un liant mixte.

Il n'y a pas de contre-indication à l'utilisation de couches retraits au ciment Portland pour des chaussées à forte circulation, pourvu qu'elles soient recouvertes d'une couche de revêtement bitumineux à chaud d'épaisseur suffisante (PIARC, 2003).

1.4.2 L'émulsion de bitume

Une émulsion est la dispersion d'un liquide dans un autre liquide (TRB, 2006), une suspension hétérogène où il y a une phase continue (dispersante), celle de l'eau, et une phase dispersée, soit le bitume (Lombardi, 2007), tel que montrées dans la Figure 1.8. En chantier, lorsque l'eau est évaporée, le bitume fait coalescence autour des particules du squelette granulaire. On parle alors d'un processus de rupture, et à cette étape commence la montée en cohésion de l'enrobé (Deneuvillers et Cornet, 1999).

Les deux phases d'une émulsion ont tendance à se séparer (USIRF, 2006). Pour l'éviter, on utilise des agents émulsifiants afin d'enrober les gouttelettes de bitume et d'éviter l'agglomération dans la phase aqueuse (James, 2006).

La plupart des émulsions sont de type direct, c'est-à-dire, qu'elles sont comme de l'huile dans l'eau (Figure 1.8 a). Au contraire, si l'eau est dispersée dans la phase bitumineuse, l'émulsion est appelée inverse, comme de l'eau dans l'huile (Figure 1.8 b) (Lombardi, 2007). Cependant, il existe d'autres types d'émulsions plus complexes, appelées mixtes, où une partie de l'eau reste attrapée dans la phase du bitume (Figure 1.8 c) (TRB, 2006). À la Figure 1.8a et c, la couleur bleue représente la phase continue et la couleur orange la phase dispersé.

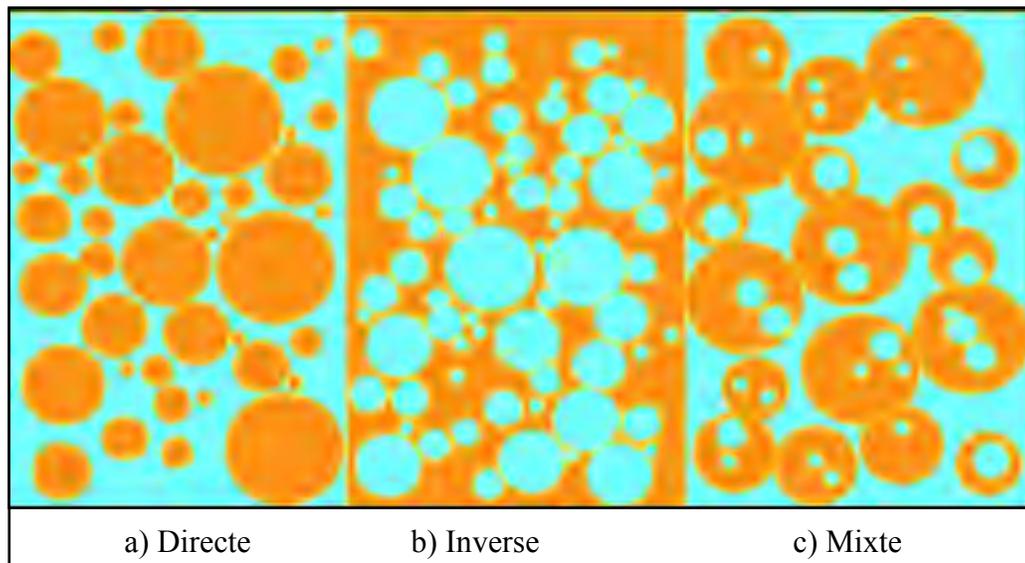


Figure 1.8 Schéma des différents types d'émulsions
Tirée de (James, 2006)

Les émulsions directes sont les plus couramment utilisées. La teneur en bitume oscille entre 40 % et 74 %(%-massique) alors que celle de l'émulsifiant est de l'ordre de 0,1 % et 2,5 %(TRB, 2006). Il existe aussi des émulsions modifiées, dans lesquelles on peut ajouter des agents chimiques pour améliorer l'adhérence de l'enrobage ou pour contrôler le processus de rupture (Asphalt Institute, 1989). Par exemple, l'émulsion modifiée aux polymères offre des avantages tels qu'un meilleur enrobage des granulats, une plus grande

résistance à la fatigue et une affectation mineure par la présence de particules fines dans le mélange (Lacombe, 2008).

1.4.3 Mousse de bitume

La mousse de bitume est produite lorsqu'une faible quantité d'eau froide (1,5 % à 3,0 %) entre en contact avec une masse de bitume chaud (160 °C à 180 °C) et de l'air sous pression (environ 5 bars) (Figure 1.9) (ARRA, 2003). Quand ce contact se produit, il y a un transfert d'énergie de la chaleur du bitume à l'eau, et dès que l'eau atteint son point d'ébullition, « elle change d'état et engendre de ce fait une bulle de bitume à la mince paroi et remplie de vapeur d'eau » (Wirtgen, 2004b). La viscosité du bitume diminue alors et le résultat est une mousse capable d'enrober les matériaux granulaires à traiter (PIARC, 2003). La mousse de bitume doit aussitôt être injectée dans le malaxeur qui contient les matériaux granulaires (Serfass, 2009b) : elle n'est pas stockable. Il est possible, cependant, de stocker le matériau retraité.

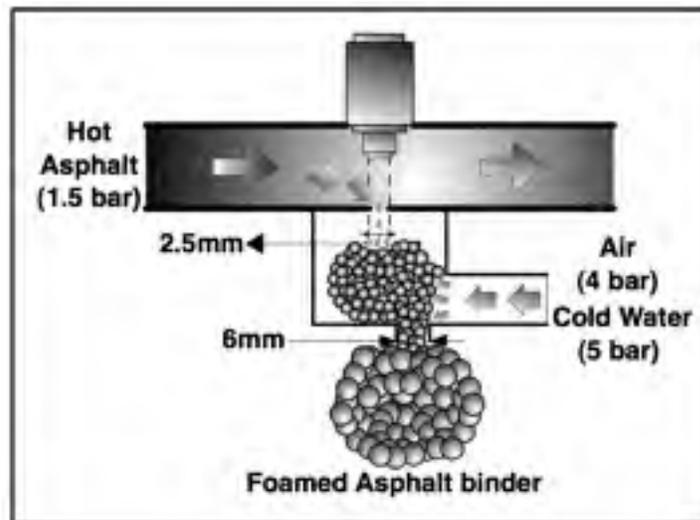


Figure 1.9 Schéma de la formation de la mousse de bitume dans une chambre à pression
Tirée de (Kim et Lee, 2006)

1.4.3.1 Méthode d'ajout de la mousse de bitume en chantier

Bien que l'on parle de retraitement en place, l'ajout de liant est fait à l'intérieur des engins en chantier afin de réaliser une répartition plus homogène sur le matériau à retraiter. Quand le retraitement en place est effectué en plusieurs étapes (apport d'eau et de la mousse de bitume), l'eau est incorporée au moment de la fragmentation de la chaussée. (PIARC, 2003). Cette opération contribue à réduire l'usure des outils et l'émission de poussière (Wirtgen, 2004b).

La Figure 1.10 montre un schéma d'une chambre de fragmentation. À la Figure 1.10, on peut noter le procédé d'injection du liant, et le système de pompes, qui sont différents pour l'eau de compactage et l'eau pour produire la mousse. Cela rend possibles les ajustements nécessaires en chantier s'il y a lieu.

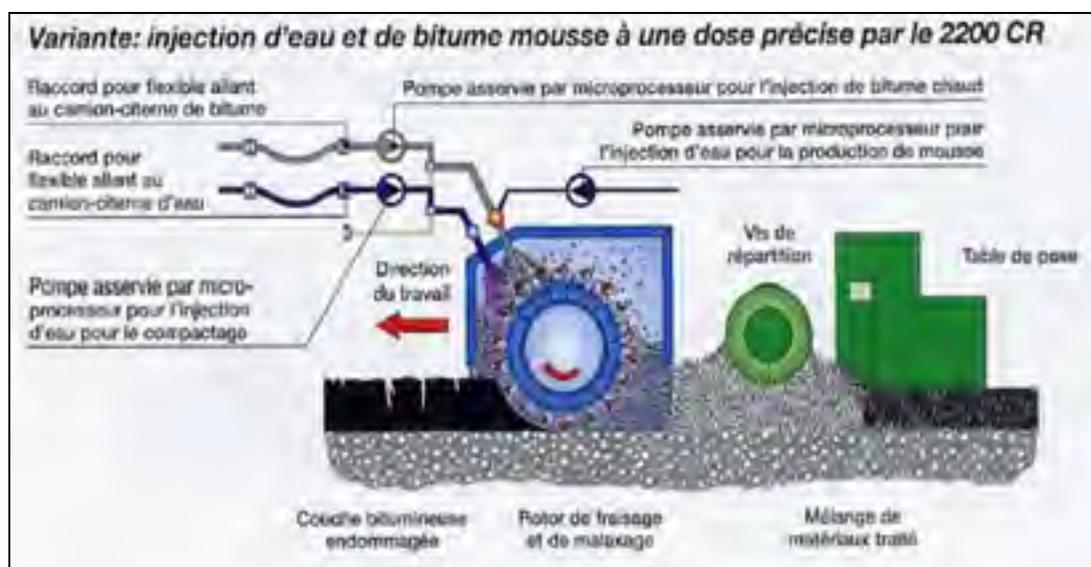


Figure 1.10 Principe du traitement à la mousse de bitume
Tirée de Wirtgen (2004)

1.5 État des connaissances – Recyclage en place à la mousse de bitume

La première mousse de bitume fut produite en 1928 par M. August Jacobi, en Allemagne (Gaudefroy *et al.*, 2007). Puis, en 1957, le professeur Ladis Csanyi de l'université d'Iowa a été le premier à utiliser la vapeur dans le bitume chaud pour le mélanger avec des granulats froids (Bowering et Martin, 1976). En Amérique du Nord, les premiers essais furent rapportés en Iowa (1957) et en Arizona (1960) (Kowalski et Starry Jr, 2007). Au Canada, le premier projet fut mené en 1962 à Nipawin (Romanoschi *et al.*, 2004). En 1968, la *Mobil Oil Australia* modifia le procédé proposé par Csanyi, en changeant la vapeur pour une injection contrôlée d'eau froide (Lee et Kim, 2006). Dans les années 70, la technologie et l'utilisation de la mousse de bitume furent connues comme FOAMSTAB avec un brevet des États-Unis.

Malgré ces progrès, l'utilisation fut limitée en raison de l'absence d'une procédure de conception du mélange standardisé. Cependant, plusieurs expériences en laboratoire furent conduites, spécialement pour les projets de type *Full Depth Reclamation* ou (Décohésionnement + stabilisation). Bowering (1970, 1976), (Ruckel, Acott et Bowering, 1983) étudia des mélanges à la mousse de bitume en utilisant des agrégats vierges.

D'autres auteurs ont fait des études en mettant l'accent sur des matériaux provenant des anciens enrobés (Akeroyd et Hicks, 1988; Brennen *et al.*, 1983; Wijk et Wood, 1983). Akeroyd (1988) décrivait le FOAMSTAB comme un matériau bitumineux très tolérant: *The FOAMSTAB could be the most significant breakthrough in value for money road rehabilitation ever introduced into UK [...]*.

En 1987, Mobil entreprit un programme d'essais en laboratoire et en chantier afin de développer une méthode de conception rationnelle (Akeroyd et Hicks, 1988). C'est à East Sussex et Kent, où les premières pistes d'essais du Royaume-Uni furent réalisées en 1986 (Akeroyd et Hicks, 1988). Pendant les années 1980, plusieurs projets furent réalisés aux États-Unis : Colorado, Wyoming, Iowa, Arizona, entre autres (Lee et Kim, 2003).

Au Canada, des expériences avec la mousse de bitume furent réalisées à Wawa, en Ontario, en 2001, lors d'un projet de réhabilitation de type décohésionnement/stabilisation (Chan *et al.*, 2009). À Perth (Ontario), le premier projet de ERF-MB date de 2003 (Kazmierowski, Marks et Lee, 1999). Au Québec, les premières expériences ont été reportées à la fin des années 1990 (Lane et Kazmierowski, 2005).

1.5.1 Recherches

Les premières études de Akeroyd mentionnaient la *FOAMSTABILISATION GUIDE* du Mobil Bitumen, dans lequel les matériaux étaient classés comme idéaux, désirables et indésirables, selon des limites granulométriques (Akeroyd. 1988). La Figure 1.11 illustre les limites proposées.

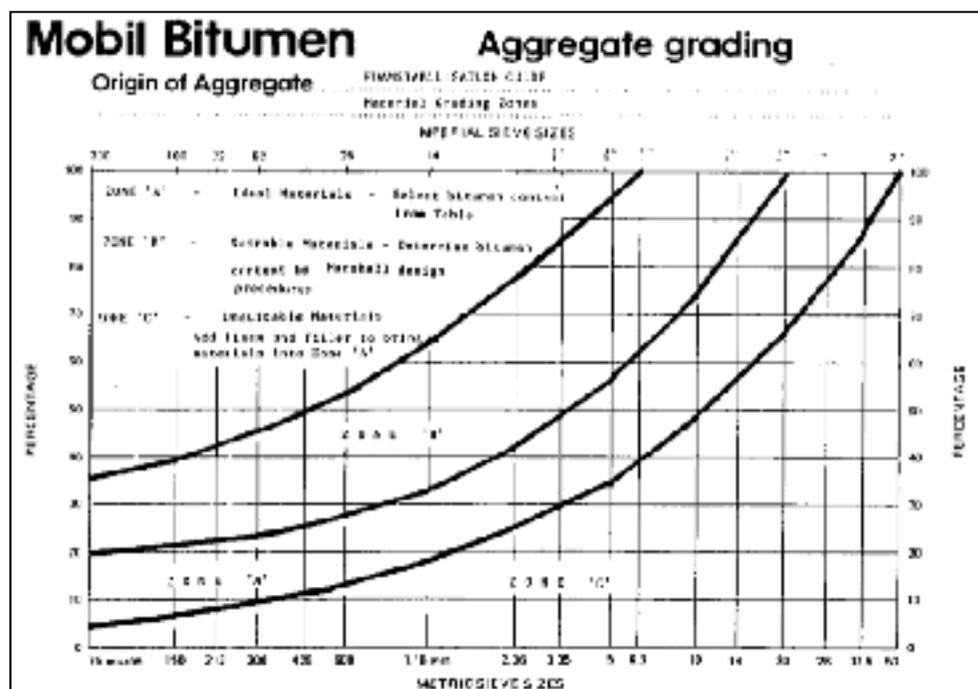


Figure 1.11 Limites granulométriques pour matériaux granulaires à traiter à la MB
 Tirée de Akeroyd (1988)

La Figure 1.11 montre les zones de classification des matériaux susceptibles à être traités à la mousse de bitume. D'une part, la zone C, marginale devient indésirable, car la teneur en particules fines est assez importante. D'autre part, la zone B représente les cas des matériaux trop grossiers pourtant sont considérées peu désirables, mais acceptables. En conséquence, la zone A est idéale parce que la distribution des particules est plus continue et dans les limites appropriées pour obtenir un mélange maniable.

En 2009, The Asphalt Academy en Afrique du Sud, a publié un guide technique, *Interim Technical Guide- TG-2*, en présentant des limites granulaires montrées dans la Figure 1.12.

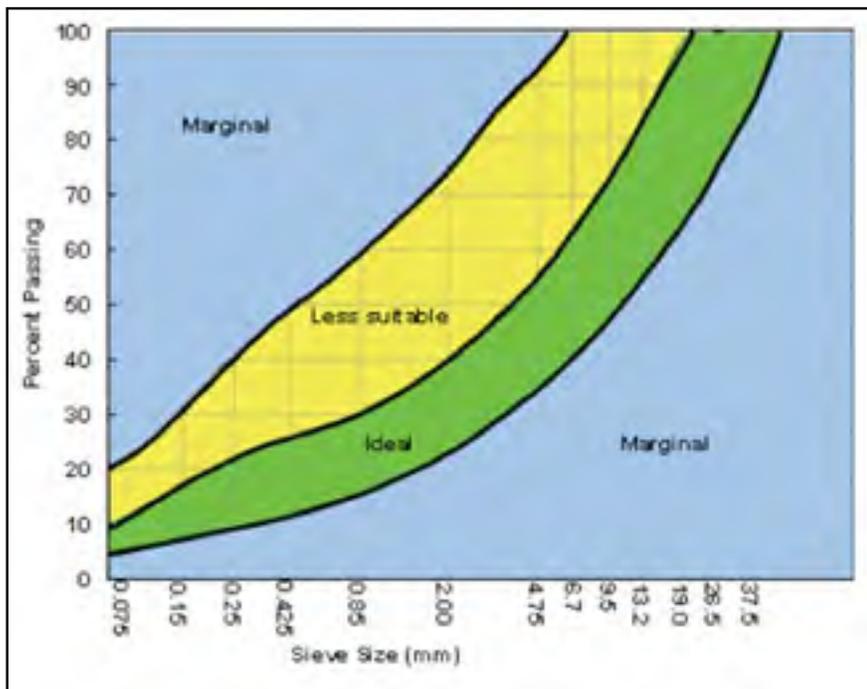


Figure 1.12 Limites granulométriques d'après la TG-2
Tirée de CSIR (2009)

La Figure 1.12 illustre avec des zones en couleur jaune et vert, les zones peu désirables et idéales d'après le guide TG-2 (Asphalt Academy, 2009a). À noter que la limite de pourcentage de particules fines passant le tamis 0,425 est plus serrée suivant le guide TG-2 que proposées par Akeroyd (1988).

Par ailleurs, certains chercheurs ont travaillé sur les effets de la température de cure des ERF-MB, en faisant des comparaisons entre différents paramètres en laboratoire. Bowering et Martine (1976), ont mis en relief une « température critique » comprise entre 13 °C et 23 °C pour la température des granulats vierges avant le traitement à la mousse de bitume. Castedo et Wood (1983) ont évalué les effets de la température du bitume sur les mélanges avec différentes teneurs en bitume. Ils ont montré que la plage de température de cure idéale était entre 10 °C et 38 °C (Castedo-Franco *et al.*, 1984). Au fil des décennies, de nombreuses études ont été menées pour améliorer les caractéristiques de moussabilité du bitume par rapport aux différents procédés de formulation. Le Tableau 1.2 présente les auteurs, les années et les paramètres étudiés.

Tableau 1.2 Synthèse des propriétés de mousse selon différents auteurs

AUTEUR	ANNÉE	TEMPÉRATURE DU BITUME	TENEUR EN EAU	EXPANSION (Ex) (cm)	DEMI-VIE (seg)	MOUSSE DE BITUME (%)	OMC	CIMENT
Bowering	1976		1 % — 2 %	3 - 10	120	1,5 %		
Brenen et coll.	1983	160 °	2 %					
(Maccarrone <i>et al.</i> , 1994)	1994		2.6 %					
Ruckell et coll.	1980			18-15	20			
Nataatmadja	2001		2 % -2,5 %				7.2 %	
Mohammed	2003	160 ° ((PG 58-28)	2,75 %				8 %	
Margus et coll.	2003	160 ° (PG 64-28)	3 %	11	8.5			
Yungjoo	2006	170 ° (PG 52-34)	1,3 %			2,5	OMC - 0,5 %	
Fu et coll.	2008	165	4 %	23	19,5			
Yungjoo	2011	160 °	2 %			2 %	4 %	
Yungjoo	2010	170 °	1.3 %			2%	4%	
Overby et coll.	2000	175 °	5 %	15-20		4.4 % (total)		
Jenkins	2000					2 %		1 %
Lung et coll.	2004					2.3 %		1 %
Loizos	2007					2.1 %		1 %
Thenoux	2009	150 °	3 %	17-20	23-26	0 % -3 %	6 %	1 %
Romanosh	2004	160 °	3 %			3 %		0,5 % -1 %
Gonzalez	2011	170 °	2.50 %				5.1 %	1 %
Leon (ÉTS)	2010	N.D.	2.76 %	11.2	7.6	1.1 %	6.50 %	0,5 % -1 %
Canela (ÉTS)	2010	180 °	2.67 %	8.9	8.85	2.5 %	7 %	0,5 % -1 %

Pour Roberts, Engelbrecht et Kennedy (1984), les modules et les densités des mélanges à la mousse de bitume chauffé à 160 °C étaient significativement plus élevés que ceux fabriqués à froid. Muthen (1998) soutenait que le préchauffement des granulats pouvait augmenter la dispersion de liant dans un mélange à la mousse et, de cette façon, aider à l'enrobage des granulats (Muthen, 1998).

Au sujet des propriétés de la mousse de bitume, la plupart des recherches ont porté sur la formulation de type structurale (Bissada, 1987). Brennen et coll. (1981) ont défini des paramètres pour déterminer le potentiel de moussabilité. Ruckel et coll. (1983) ont plutôt travaillé sur une méthode pour définir la teneur optimale du bitume. Dernièrement des recherches ont été menées sur les performances du matériel en service (Jenkins *et al.*, 2000) et des modèles de conception structurelle (Asphalt Academy, 2009).

Pour Jenkins (2000), le processus de formation de la mousse de bitume est défini comme suit : « ... une dispersion sélective à travers l'ensemble des granulats, en montrant une préférence à s'adhérer aux particules les plus fines ». D'une part, le facteur de l'humidité dans le mélange avant l'addition de la mousse de bitume joue un rôle important parce qu'il aide à disperser le liant pendant le malaxage. D'autre part, comme la mousse s'affaisse rapidement pendant le malaxage, seules quelques perles de bitume sont attachées à des particules plus grosses et il en résulte un enrobage partiel (Jenkins, 2000).

Jenkins (2000) soutient que la température des granulats est un facteur important qui influence le comportement des ERF. À cet égard, il souligne :

« Ce facteur a été souvent négligé dans les considérations pour la conception et la production de la mousse, même avec des variations importantes de température ambiante. Donc, considérer la température des granulats avant et pendant le processus de mélange est un facteur à prendre en compte dans la formulation ». Traduction libre. (Jenkins, 2000).

Bien qu'au cours des dernières années le développement des techniques pour produire des ERF-MB performantes et les efforts des agences et des universités pour produire des normes ou directives pour la formulation de ce type de matériaux aient été soutenus, il reste encore beaucoup de travail à faire.

Les paramètres de référence pour évaluer les ERF-MB ont évolué dans le temps. Les premières recherches d'Akeroyd (1988) évaluaient la résistance des matériaux retraités à la MB, par rapport à l'essai CBR. Ensuite, le fait qu'il s'agisse d'un matériau bitumineux, c'est la méthode Marshall, qui a permis d'analyser ces matériaux d'une façon plus détaillée. Dans les dernières années, les essais de résistance à la traction indirecte (ITS) ont gagné en notoriété et il existe déjà certaines normes basées sur cette méthode en Ontario et ailleurs.

À l'ÉTS, le LCMB a développé une série d'analyses sur les ERF-MB et les ERF-É. Notamment, des travaux faits sur la moussabilité du bitume (Canela, 2010; Garcia, 2011) et de la capacité portante des ERF (Benaissa, 2011). Divers formulations et liants utilisés ont été testés, afin d'analyser le comportement et la performance des ERF. Le LCMB de l'ÉTS est le seul laboratoire de recherche au Québec qui compte sur un banc d'essai constitué d'une unité de production de la mousse et une unité de malaxage, pour fabriquer des ERF-MB en laboratoire. Plus de détails sur le sujet seront exposés ultérieurement à la section 1.5.3.

1.5.2 Guides et manuels de référence

Bien que la technique de recyclage à froid en place soit connue depuis quelques années, elle est encore à l'étape de recherche et développement. Des lignes directrices ont été élaborées par plusieurs organismes, basées sur des tests de laboratoire, des formules empiriques ou des expériences menées en laboratoire et en chantier. Les principaux travaux sur le sujet menés dans différentes régions du monde ont conduit à la publication de guides de conception, de construction, de formulation ou d'utilisation de la mousse de bitume comme liant utilisé lors des activités de retraitement à froid.

Sans aucun doute, le document le plus complet, et le plus important consulté, est la thèse de doctorat du professeur Kim Jonathan Jenkins : « *Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen* », présentée à l'Université de Stellenbosch, en Afrique de Sud, en 2000. Toutefois, on a consulté beaucoup plus d'information dans journaux spécialisés, rapports, manuels et guides techniques.

Parmi les consultées, on peut mentionner : le Manuel de recyclage à froid, développé pour Wirtgen GmbH, une compagnie de production de machinerie lourde; la guide technique TG-2 (Interim Technical Guidelines) réalisée pour Asphalt Academy en Afrique du Sud; différents rapports de l'association mondiale de la route (PIARC), des guides, rapports techniques et articles des chercheurs américains qui ont travaillé en étroite collaboration avec des universités, la FHWA et des agences de transport locales dans les États-Unis, notamment les recherches du M. D. Jones à l'université d'Iowa. Finalement, le cahier de laboratoire sur le retraitement à froid des chaussées souples du LCMB à l'ÉTS a été très utile dans le processus des essais de laboratoire.

1.5.2.1 Manuel de recyclage à froid, Allemagne

Édition révisée d'une première publication de 1998, l'édition publiée en 2004, est aussi accompagnée des expériences recueillies en chantier et en laboratoire. Une version électronique est également disponible sur le site (Internet) de Wirtgen GbmH : <http://www.wirtgenamerica.com/Downloads>. Il s'agit d'un des documents auxquels on réfère le plus fréquemment dans cette étude. (Wirtgen, 2004a).

1.5.2.2 Intérim Technical Guidelines TG-2, Afrique du Sud

Il s'agit d'une méthodologie explicite sur la caractérisation des matériaux, la formulation et les expériences en chantier dans travaux de retraitement des chaussées. Le document est construit sur la base d'une comparaison entre les retraitements à l'émulsion et ceux à la mousse de bitume. La formulation des concepts de base est très importante dans cette étude.

Le document est disponible en ligne, dans le site web de *The Asphalt Academy* : <http://www.asphaltacademy.co.za/Documents/TG2May09.pdf>. (Asphalt Academy, 2009b).

1.5.2.3 Rapports Association mondiale de la route, PIARC, France

L'association mondiale de la route a publié des documents informatifs sur le recyclage des chaussées en faisant une synthèse très pertinente, des définitions, des renseignements, des expériences, etc., par rapport aux retraitements des chaussées avec liants bitumineux. Ce ne sont pas vraiment des guides de conception ou de formulation. Toutefois, ils sont d'excellents documents de référence. (PIARC, 2001; 2003; 2008b).

Dans l'expérience européenne, il est intéressant de noter que le projet SCORE, développé en France, en Suisse et en Espagne, a donné les premiers pas afin de normaliser les ERF.

1.5.2.4 Guides et manuels variés, Amérique du Nord

Plusieurs recherches et plusieurs programmes de suivi en chantier ont été développés pour différents départements fédéraux, diverses agences, et associations du milieu de la construction routière aux États-Unis et au Canada. Cependant, il n'y a pas guide complet du point de vue de la pratique, du développement, de la formulation et du comportement de ces mélanges. La normativité existante, dans tous les cas, dépend des autorités de transport de chaque état ou de chaque région. Plusieurs facteurs entravent la formation d'un consensus sur la technique de l'ERF-MB. (ARRA, 2001; D. Jones, 2008a; FHWA, 2011; Kim et Lee, 2006; Yongjoo, 2008).

Dernièrement, les recherches de M. David Jones et M Pengcheng Fu en 2009 constituent un premier pas dans cette direction. Ils ont publié le document : *Full-Depth Pavement Reclamation with Foamed Asphalt in California : Guidelines for project Selection, Design and Construction*. Bien qu'il s'agisse d'un projet particulier, ceci est un des documents les plus complets par rapport à la technique des ERF-MB.

Finalement, le reste de l'information se trouve dans des articles spécialisés, de présentations en conférences et des rapports finaux de construction et d'évolution de projets ponctuels, notamment, dans les travaux de (D. Jones, 2008c; Kim et Lee, 2006); Halles et Thenoux (2009), entre autres.

Il est important de mentionner que pour l'Ontario, il existe des spécifications techniques comme *Specification for cold in-place recycling with expanded asphalt. Metric, opss 335 november 2009*. Ou des procédures de laboratoire déjà établis, comme la norme *LS-297 Method of test for the determination of indirect tensile strength of expanded asphalt mixes construction*.

Au Québec, on utilise la norme LC-26002 « Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion », pour ce type de projets. Elle est très générale, cependant elle constitue un modèle afin de proposer une méthode de formulation à la mousse de bitume.

1.5.3 Banc d'essai WLB-10

Le LCMB, à l'ÉTS, possède des machines à échelle qui simule la production de la mousse de bitume, ainsi que le malaxage en chantier. Il s'agit du Banc d'essai de type WLB-10 pour la production de la mousse de bitume et un malaxeur pour les ERF-MB (voir Figure, 1.13).

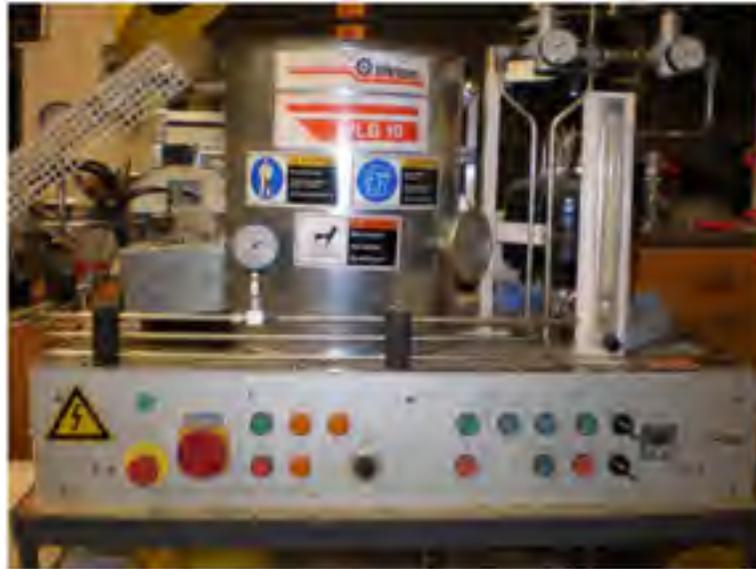


Figure 1.13 Banc d'essai pour la production de la MB. Wirtgen WLB-10

Le banc de production de mousse de bitume se compose, principalement, d'une cuve pour le chauffage du bitume, d'une chambre d'expansion, qui permet de contrôler la pression du bitume, la quantité d'eau et la disponibilité de l'air, et d'une buse pour injecter le bitume sur les granulats.

La Figure 1.14 montre un diagramme des connexions et des valves de circulation de l'air, de l'eau et du bitume ainsi que les points de contrôle de pression et de débit de l'eau et du bitume avant d'arriver à la chambre d'expansion.

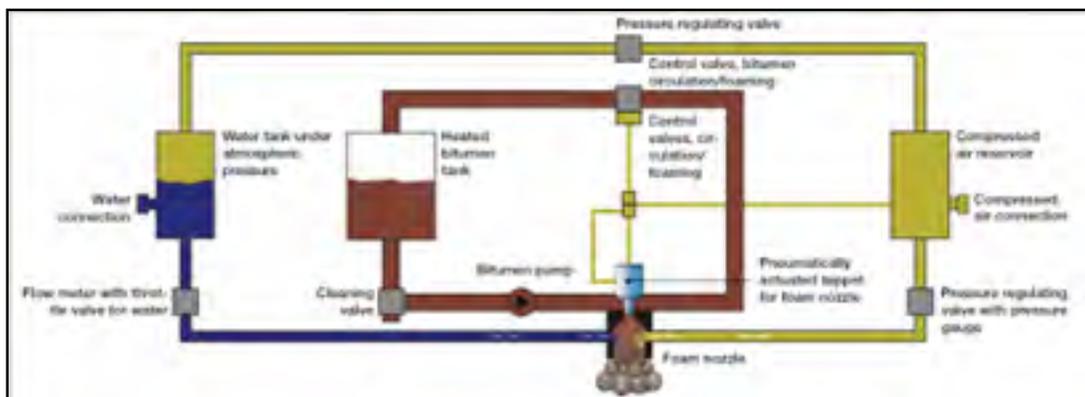


Figure 1.14 Schéma de fonctionnement du banc d'essai WLB-10
Tirée de (Wirtgen, 2001)

Dans la chambre d'expansion (Figure 1.15), l'eau et l'air sont injectés à une pression d'environ cinq (5) bars dans un bitume chauffé à une température entre 160 °C et 180 °C et dans les proportions nécessaires, pour permettre au bitume de mousser selon les caractéristiques requises.



Figure 1.15 Photographie de la chambre d'expansion du WLB-10

Une fois que la mousse de bitume est produite, l'eau se vaporise et le volume augmente entre 15 et 20 fois son volume initial (voir Figure 1.16). Lorsque la mousse perd la moitié de son volume maximal, on atteint la période de demi-vie ($t_{1/2}$) de la mousse. La demi-vie est, normalement, de l'ordre de 10 à 40 secondes (Wirtgen, 2001).



Figure 1.16 Aspect de la mousse au moment de sortir par la buse

Dans le mélange, la mousse de bitume ne se répartit pas en film continu, à la différence des émulsions. Elle forme une sorte de matrice de gouttelettes de bitume en enrobant les fines au sein du matériau malaxé (Serfass, 2007).

1.5.4 Caractéristiques de la mousse de bitume

Comme il a déjà été mentionné, la mousse de bitume est produite lors du contact d'une petite quantité d'eau froide, injectée par pression d'air dans le bitume chaud. La réaction engendrée n'est pas d'ordre chimique, il s'agit plutôt des changements temporaires des propriétés physiques du bitume, notamment la réduction de la viscosité (Romanoshi, 2004). Ces changements permettent au bitume de mousser.

Deux paramètres ont été développés pour caractériser les propriétés de la mousse de bitume :
1) le rapport d'expansion (Ex) et 2) le temps de demi-vie ($t_{1/2}$).

1.5.4.1 Rapport d'expansion (Ex)

Le rapport d'expansion exprime le rapport entre le volume de la mousse de bitume au temps (t_0) et le volume initial du bitume (Angel Cruz *et al.*, 2006). La mousse peut s'épandre jusqu'à 10 à 15 fois son volume initial (Akeroyd et Jicks, 1988), cependant on peut arriver à des valeurs de 20 fois (Romanoschi *et al.*, 2004). Il n'y a pas de limite supérieure pour l'expansion, néanmoins, une valeur minimale couramment acceptée est de 10 (Wirtgen, 2004).

Le rapport d'expansion est un critère pour la capacité de la mousse à se disperser dans l'enrobé (Jones *et al.*, 2008). L'expansion se produit sur une plage de temps déterminée. De ce fait, on a un temps où on atteint une expansion maximale (ER_m), et quelques secondes après, la mousse s'effondre. Quand la mousse perd la moitié du volume maximum qu'elle avait atteint ($ER_m/2$), on parle de demi-vie.

La Figure 1.17, montre la courbe d'expansion et les paramètres Ex , ER_m et $t_{1/2}$ en fonction du temps.

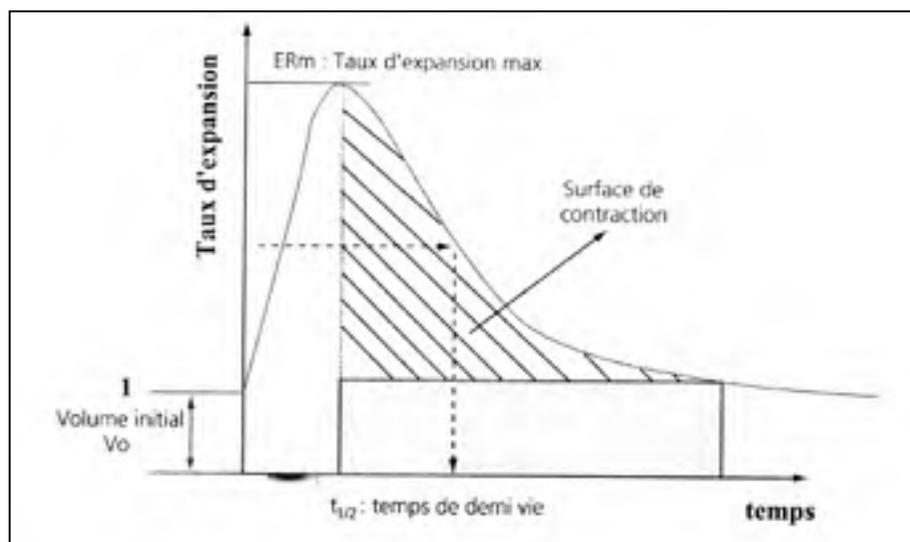


Figure 1.17 Courbe type d'expansion d'une mousse de bitume
Tirée de RGRA (2006)

À cet égard, on introduit une autre variable importante dans notre analyse : La surface de contraction (aire ombrée dans la Figure 1.17). La surface de contraction (S_c) correspond à l'aire sous la courbe calculée comme la surface entre le taux d'expansion maximum et le moment où le taux d'expansion n'est plus de 4 (Jenkins, 2000), On traitera plus en détails de cet aspect, à la section 1.5.4.3.

1.5.4.2 Demi-vie ($t_{1/2}$)

Quelques secondes après avoir été produite, l'expansion du bitume s'arrête. Quand la mousse perd la moitié du volume maximum qu'elle a atteint, on parle du temps de demi-vie. Le temps de demi-vie est un critère de stabilité de la mousse (Jenkins, 2000) et donne une indication du temps qu'on a pour enrober les granulats.

Le temps de demi-vie est mesuré en secondes et atteint généralement des valeurs comprises entre 10s et 15 s. Pour Wirtgen (2004), une valeur supérieure à 8s est considérée acceptable. Dans le Tableau 1.2, on peut voir différentes valeurs obtenues dans différentes recherches. La Figure 1.18 présente un schéma des étapes d'expansion du bitume. En noir est représenté le bitume à l'état initial, la ligne pointillée représente le volume maximum à l'état moussant, et en gris, le moment où la mousse atteint la moitié de l'expansion.

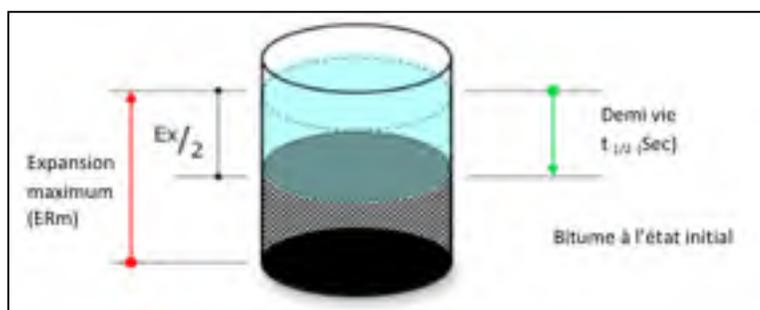


Figure 1.18 Schéma de l'expansion du bitume dans un seau
Tirée de Wirtgen (2004)

Les bitumes à basse viscosité peuvent produire des mousses avec de hauts rapports d'expansion et un temps de demi-vie plus long (Lee et Kim, 2006). Cela signifie qu'on peut

atteindre une meilleure dispersion du bitume dans le mélange et avoir plus de temps pour l'enrobage des granulats. De même, la teneur en eau joue un rôle essentiel, car si on l'augmente, le rapport d'expansion augmentera aussi. Par contre, le temps de demi-vie diminuera (Lee et Kim, 2003).

Trouver un équilibre entre l'expansion et le temps de demi-vie s'avère être la première relation à établir dans un projet dans lequel on doit utiliser la mousse de bitume. À la Figure 1.19, on peut voir l'évolution simultanée des deux paramètres représentés par deux courbes. Le pourcentage optimal d'ajout d'eau est choisi comme une moyenne des deux teneurs en eau nécessaires pour satisfaire les critères minimaux d'expansion et de demi-vie. Il est important de noter que les deux axes verticaux doivent avoir absolument à la même échelle.

Il est possible d'améliorer les propriétés de la mousse par l'utilisation d'adjuvants. Les mousses produites avec des additifs sont plus stables et peuvent donner des rapports d'expansion légèrement plus élevés (Cazacliu *et al.*, 2008) . Cependant, l'additif doit être suffisamment mélangé avec le bitume pour éviter des variations pendant le moussage, ce qui pourrait avoir une incidence sur les propriétés d'expansion.

Le bon choix de bitume est important, car certains ont des propriétés anti-moussantes. Cela pourrait avoir des répercussions négatives. Généralement, l'utilisation d'agents pour favoriser la production de mousse est nécessaire lorsque le bitume d'origine a été traité avec un agent anti-moussant lors du raffinage (Wirtgen, 2004).

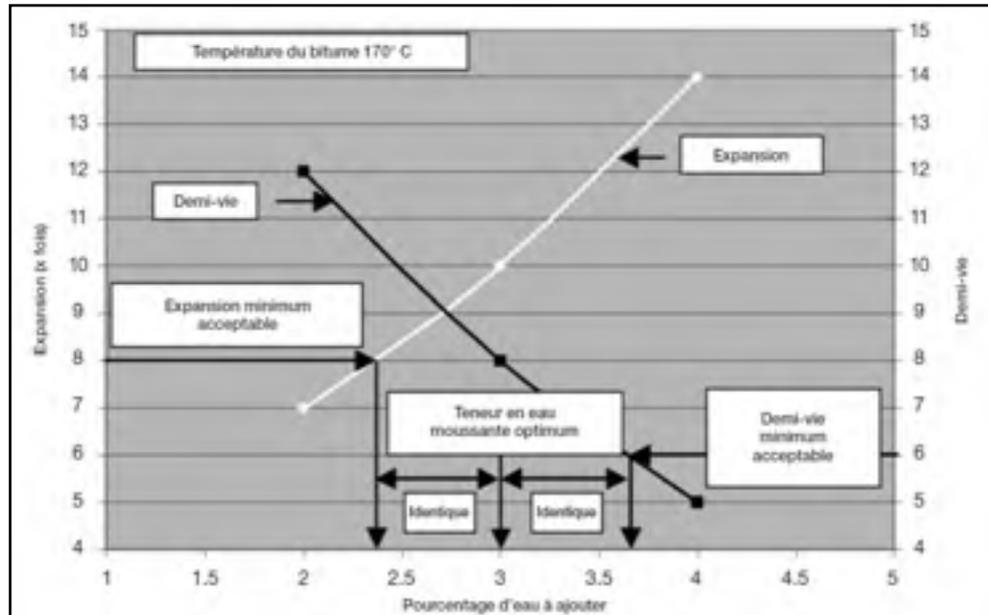


Figure 1.19 Détermination de la teneur en eau optimum pour moussage
Tirée de Wirtgen (2004)

La meilleure mousse est obtenue lorsqu'on optimise l'expansion et le temps de demi-vie (Nataatmadja, 2001). Cependant, le rapport d'expansion et le temps de demi-vie dépendent de plusieurs facteurs tels que l'adjonction d'eau, la qualité et l'origine du bitume, la température du bitume, la pression de bitume et d'eau et la présence d'adjuvants (Wirtgen, 2004).

1.5.4.3 Surface de contraction et indice de moussabilité

Les recherches de Jenkins (2000) soulignent que les paramètres d'expansion et de demi-vie, ne sont pas suffisants pour une caractérisation adéquate des propriétés de la mousse de bitume.

Jenkins (2000) a proposé un facteur, appelé *Foamed Index* (FI). Cet indice correspond à l'aire sous la courbe de décroissance, qui est le changement de rapport d'expansion en fonction du temps (voir surface de contraction dans la Figure 1.17). Pour cet auteur, il s'agit d' : « une mesure de l'énergie stockée dans la mousse pour un bitume moussé spécifique à une température connue et avec une quantité d'eau déterminée ».

Le projet SCORE (2006) a utilisé un paramètre appelé l'indice de moussabilité ($M_{(T)}$). Ce dernier est défini par le rapport entre l'Expansion maximale (ER_m , Fig 1.17 et 1.18) à une température (T°) donnée et la quantité d'eau optimale déterminée pour produire la mousse à cette même température (voir Équation 1).

$$M_{(T)} = \frac{ER_{m(T)}}{W_{opt(T)}}$$

Équation 1.1

Où :

$M_{(T)}$: Indice de moussabilité

$ER_m(T)$: Taux d'expansion maximale pour un temps T

$W_{opt}(T)$: Teneur en eau optimale pour la production de la mousse

Par conséquent, nous avons adopté deux paramètres additionnels de caractérisation : l'aire sous la courbe Taux d'expansion –Temps (Fig. 1,18) appelle *Foamed Index* par Jenkins (2000) et l'indice de moussabilité utilisé par SCORE (2006). Étant donné que les terminologies sont assez proches et, pour éviter la confusion, nous adopterons l'appellation du projet Score : Surface de contraction (Sc) pour l'aire sous la courbe et $M_{(T)}$ pour l'indice de moussabilité.

Il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer le comportement de la mousse et, subséquemment les caractéristiques des mélanges. Entre autres, les principaux mentionnés par Jenkins (2000) sont le type de bitume, l'eau et l'équipement utilisé. On comprend aussi que les conditions de température sont sous-entendues pour chaque variable analysée.

Dans le même sens, Wirtgen (2004) mentionne que : « Dans la chambre d'expansion, des variations de pression peuvent altérer la dispersion (effet d'atomisation) de la mousse à la sortie de la buse ». Donc, plus la taille des « gouttelettes » est petite, plus elles auront de

surface de contact disponible sur les granulats. Par contre, si les particules sortent de façon moins dispersée, le bitume n'atteindra pas tout le matériau granulaire.

Pendant la production de la mousse, il faut porter une attention particulière quant à l'orientation de la buse de sortie du bitume moussé, car l'effet éventail peut influencer l'enrobage des granulats dans le malaxeur.

En ce qui concerne les ERF-MB, Jenkins (2000) considère qu'il y a beaucoup plus de facteurs à observer. Il considère que la compréhension actuelle de la physique de la production de la mousse de bitume est mal comprise, et que par le fait même, les techniques de caractérisation sont approximatives notamment en ce qui concerne l'optimisation de la mousse par rapport à la composition totale de l'enrobé, et plus particulièrement l'interaction bitume moussé-filler.

1.5.5 La cure

Le processus de cure des matériaux à la mousse de bitume peut commencer immédiatement après le malaxage (Khweir, 2007). Les premières recherches de Bowering (1970) ont montré que la résistance des matériaux traités à la mousse de bitume se développe au fur et à mesure qu'un grand pourcentage d'eau est évacué. D'après lui, un scénario adéquat pour simuler les conditions de chantier consiste à accélérer le processus de cure en laboratoire en soumettant une éprouvette à une température de 60 °C pendant trois jours.

D'après Serfass (2006), les ERF sont des matériaux « *évolutifs* », spécifiquement à jeune âge, car leur cohésion augmente progressivement avec le temps. Des recherches spécifiques définissent la cure ou mûrissement comme un procédé par lequel un matériau bitumineux peut évacuer l'eau soit par la répulsion de charge entre particules, libération interstitielle, ou tout simplement, par évaporation (Jenkins, 2000). Cette réduction de la teneur en eau permet aussi d'améliorer certaines propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression ou à la traction.

Pour Jenkins et Moloto (2008b), la cure est le « *processus par lequel les matériaux bitumineux gagnent de la résistance au fil de temps tout en réduisant leur teneur en eau* ». De cela, on comprend que la résistance est dépendante, du moins partiellement, de la teneur en eau du matériau. Cependant, il y a d'autres variables qui interviennent pendant la cure, comme la température, l'humidité relative et la durée de processus (Serfass, 2004).

Au fil des années, plusieurs recherches ont été menées pour simuler les conditions de cure afin de relier les propriétés mesurées en laboratoire avec celles du chantier. Pour ce faire, des protocoles de cure ont été développés. Le Tableau 1.3 montre différentes approches d'essais proposés par des recherches distinctes.

Tableau 1.3 Conditions de cure utilisées pour des ERF — MB
Adapté de Jenkins (2000)

CONDITIONS DE CURE	AUTEUR
3 jours à 60 °C et 3 jours à 24 °C	Bowering (1970)
10 jours à l'air et 50 heures à 60 °C	Van Wijk and Wood (1983)
3 jours à l'air et 4 jours à vide à T ° ambiante	Little et al. (1983)
3 jours à 40 °C	Lewis, 1988
3 jours à 23 °C	Roberts et al. (1984)
3 jours à 60 °C	Lancaster et al. (1994)
1 jour à 40 °C et 3 jours 60 °C	Ruckel et coll, 1988
3 jours à 40 °C	Jones et Fu, 2009
3 jours à 40 °C (court terme) 20 heures à 30 °C non scellé (long terme) 48 heures à 40 °C scellé	Asphalt Academy, 2009
3 jours à 40 °C	Wirtgen, 2004
3 jours à 40 °C et 29 jours à T° ambiante	Lee et Kim, 2003

Néanmoins, d'autres auteurs considèrent que la cure à 60 °C peut provoquer des changements dans la dispersion des résultats ou un vieillissement prématuré du bitume, car cette température est proche du point de ramollissement (Jenkins et Moloto, 2008).

Parallèlement, il faut trouver en laboratoire, un temps équivalent à celui en chantier. Il est difficile de déterminer le type et le niveau de durcissement en laboratoire pour arriver à simuler les conditions de chantier, spécialement du côté de l'environnement. Plusieurs

chercheurs ont proposé différentes méthodes d'après leurs expériences. Les Tableaux 1.4 et 1.5 montrent la méthode et son équivalence en chantier.

Tableau 1.4 Méthodes de cure et leurs équivalences en chantier avant l'année 2000
Adapté de (Jenkins, 2000)

Méthode de cure proposée en laboratoire	Équivalence en chantier	Auteur
3 jours à 60 °C	Période de construction	Bowering and Martin (1976)
3 jours à 60 3 jours à 60 °C	Entre 23 et 200 jours *	Acott (1980)
1 journée dans le moule	Jeune âge (< 30 jours)	Ruckel et coll. (1982)
1 jour dans le moule et un jour à 40 °C	Entre 7 et 14 jours	Ruckel et coll. (1982)
1 jour dans le moule et 3 jours à 40 °C	30 jours (longue durée)	Ruckel et coll. (1982)
1 jour à 38 °C	7 jours	Asphalt Institute (1989)
3 jours à 60 °C	1 an	Maccarrone et al. (1994)

* D'après les essais de cisaillement en terrain.

Depuis 2000, d'avantage de travaux ont été effectués afin d'améliorer les protocoles de cure afin de viser, avec plus de précision, l'équivalence de la teneur en eau mesurée en laboratoire par rapport à l'humidité d'équilibre en chantier (Jenkins, 2000). Le Tableau 1.5 montre les protocoles de cure proposés et leur équivalence en chantier.

Tableau 1.5 Protocoles de cure et leur équivalence en chantier après les années 2000
Adapté de (Jenkins et Moloto, 2008a; Wirtgen, 2004a)*

Méthode de cure proposée	Équivalence en chantier	Auteur
24 heures dans le moule à T ° amb et 3 jours à 40 °C (scellé)	6 mois	Asphalt Academy, 2002
24 heures à 40 °C (scellés) et 48 heures à T ° amb (non scellé).	Moyen terme (6 mois à 1 an)	Robroch, 2002
24 heures à T ° amb (non scellé) et 48 heures à 40 °C (scellé)	Long terme (1 à 2 ans)	Houston et Long, 2004
20 heures à 30 °C (non scellé) et 48 heures à 40 °C scellé. (En changeant le sac aux 24 h)	moyen terme (6 mois à 1 an)	Stellenbosch University, 2004
24 heures à 20 °C (à l'air)	Premières semaines	Halles et Thenoux, 2009
72 h à 40 °C pour matériaux qui possèdent un mauvais pouvoir de prise : 24 heures à T ° amb et 48 heures à 40 °C)	Moyen terme (6 mois à 1 an) refroidir jusqu'à ce qu'elles aient atteint la température ambiante.	Wirtgen, 2004

*Données pour matériaux retraités à la mousse de bitume

Bref, pour la plupart des cas, la montée de la résistance se développe dans les trois premiers jours (Castedo-Franco *et al.*, 1984). La température à 40 °C semble avoir moins d'impact sur les propriétés du bitume (Jenkins, 2000). Il y a une incidence sur la teneur en eau, dès qu'on laisse les échantillons dans le moule pendant les premières heures de cure (Lee et Kim, 2006), et cela a aussi un impact significatif sur les valeurs de stabilité Marshall.

Le temps de cure est souvent déterminé en nombre de jours. Les valeurs qui reviennent le plus souvent dans la littérature sont 3, 7 et 14 jours. Des expériences en chantier ont montré qu'après deux semaines de cure, la teneur en eau devrait être moins (2,0%) et un minimum de 96% de la densité de laboratoire (Murphy et Emery, 1996).

1.5.6 Effet de la température dans les ERF-MB

La température est un des principaux facteurs à considérer. Il est important de différencier entre la température de production de la mousse, la température de production du mélange et la température de cure du mélange. Comme mentionné dans la section 1.5.4, les propriétés de moussabilité comme l'expansion (Ex) et le temps de demi-vie ($t_{1/2}$) sont fonction de la quantité d'eau qui réagit avec le bitume chaud dans la chambre de pression de la machine. Donc, la température du bitume qu'on utilise pour produire la mousse devient aussi un facteur important pour assurer la production d'une mousse optimale.

La température de mélange correspond à une autre variable à considérer dans les MR-5. Jenkins et coll. (1999), considèrent qu'il est possible de calculer la température de mélange final théorique avec la thermodynamique. Par exemple, pour un mélange de 1500 g de granulat à 10°C dans lequel on ajoute de la mousse de bitume (500 g de bitume) faite à partir de bitume à 170°C, la température finale sera de 87.2°C. Par contre, si la masse granulaire est à 100°C, la température finale passe à 122.9°C. (Jenkins et Moloto, 2008a) Une température finale plus élevée donne une viscosité plus faible et donc facilite l'enrobage.

Par rapport à la température production et de cure, Wirtgen (2004) déconseille les retraitements à la mousse lorsque les granulats sont en dessous de 10 °C. Cependant, il n'y a pas beaucoup d'études par rapport au comportement des MR-5 confectionnés à températures inférieures à 10 °C ou de sa performance dans le temps avec les changements de température une fois les ERF sont mises en service.

1.6 Méthodes d'essais de résistance mécanique pour les matériaux retraités

Traditionnellement, la méthode Marshall a été utilisée comme critère pour la conception des ERF-MB à la mousse de bitume (Kim, 2006). Cependant, Muthen (1999) recommande la détermination du *indirect tensile strength* (ITS) comme critère pour trouver le pourcentage de bitume optimal dans une ERF-MB.

D'autres chercheurs comme Mohammad et coll (2003), Jones et coll, Thenoux et coll; des organismes comme l'ARRA ou l'Asphalt Academy et les développeurs d'équipements comme Wirtgen, utilisent les deux méthodes pour la formulation des mélanges (Kim et coll, 2007).

1.6.1 Stabilité Marshall

Les concepts de base de la méthode Marshall ont été développés par Bruce Marshall du Département des Chaussées du Mississippi, vers 1939. Pendant la Seconde Guerre mondiale, la méthode a été perfectionnée par l'armée américaine (U.S. Army Corps). Au fil des années et encore aujourd'hui, la méthode Marshall est probablement la méthode de conception des chaussées la plus largement utilisée dans le monde. Elle est facile à réaliser, rapide et peu coûteuse (WsDOT, 2010).

Le but de la méthode est de déterminer la teneur optimale de bitume dans un mélange avec une composition spécifique de matériaux granulaires (Asphalt Institute, 1983). Le test donne une valeur empirique de la stabilité contre celle de la déformation, appelée fluage, et d'après ces valeurs, on peut déterminer la teneur optimale en bitume (White, 1985). La procédure est basée sur une approche volumétrique des propriétés du mélange. L'objectif de l'essai est de s'assurer que la chaussée ne développera pas des dégradations prématurément, tel que l'arrachement, la fissuration ou l'orniérage (Doré et Zubeck, 2009).

La confection des éprouvettes est faite d'après le protocole établi pour la norme LC 26-020 « Préparation d'éprouvettes pour la méthode Marshall ». Pour l'essai et l'analyse on suit la norme 26-060 « Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes » et la norme LC-26-002 pour les particularités des ERF. La procédure doit être réalisée dans les mêmes conditions de température, des caractéristiques et proportions des agrégats, de méthode de malaxage et de compaction (Asphalt Institute, 1983).

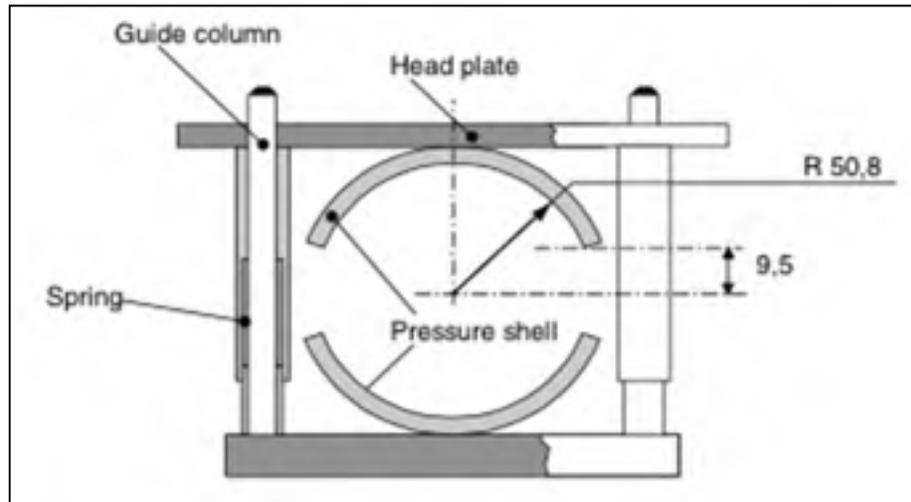


Figure 1.20 Schéma de l'appareillage Marshall pour la mesure de la stabilité
Tirée de (Wirtgen, 2004)

L'essai de stabilité détermine la résistance à la déformation du mélange. Après la cure, les éprouvettes sont placées sur la presse Marshall. La presse possède un dispositif pour assurer la stabilité de l'éprouvette (mâchoires) (Figure 1.20) et des capteurs pour mesurer la charge et la déformation lors de l'essai. La presse impose un taux de déplacement constant, 51 mm/minute, jusqu'à ce que l'échantillon s'écrase.

La charge maximale à laquelle l'échantillon peut résister est notée comme stabilité modifiée initiale et est donnée en Newtons (N). La déformation associée est enregistrée et désignée fluage et correspond à la diminution de diamètre de l'éprouvette lors de l'application de la charge (Asphalt Institute, 1983). Ensuite, on procède à la correction d'après le diamètre de chaque éprouvette, selon les équations 1.2 et 1.3:

$$\text{Stabilité corrigée (S)} = \text{Stabilité modifiée initiale} \times \text{facteur de correction.} \quad (1.2)$$

Où

$$\text{Facteur de correction} = 1261,2 \times (\text{hauteur moyenne de l'éprouvette})^{-1.72} \quad (1.3)$$

Pour évaluer la susceptibilité à l'humidité, on calcule la perte de stabilité à l'état sec par rapport à l'état humide ou saturé, d'après l'équation 1.4. Il est à noter qu'il est régulièrement question de stabilité retenue et non de perte de stabilité; il s'agit simplement de 100 % — perte de stabilité.

$$\text{Perte de stabilité (\%)} : \frac{(S_{\text{sec moyen}} - S_{\text{saturé moyen}})}{S_{\text{sec moyen}}} \quad (1.4)$$

Des mélanges avec des valeurs de fluage faibles et des stabilités élevées sont considérés comme très fragiles et rigides pour un enrobé. De même, les mélanges avec des valeurs de fluage élevées sont considérés plastiques et ont tendance davantage à se déformer sous la charge de trafic. La norme LC 26-002 considère comme acceptable une stabilité à sec de 8000 N.

Différentes recherches ont montré que le compactage avec le marteau Marshall est insuffisant pour évaluer efficacement les charges de trafic actuelles (Doré et Zubeck, 2008). Aujourd'hui, les concepts de conception empirique mécanique nous amènent vers des processus de compaction plus proches des conditions de chantier, soit la méthode de compactage avec la Presse de Cisaillement Giratoire (PCG), qui fait partie de la méthode de conception *Superpave*.

1.6.2 Résistance à la compression diamétrale (ITS)

La résistance à la traction indirecte (ITS : *Indirect Tensile Strenght*) est la méthode la plus communément utilisée pour évaluer les caractéristiques mécaniques des ERF — MB (Gonzalez et coll, 2011). La procédure de préparation des échantillons peut être la compaction avec le marteau Marshall ou suivant la méthode de la PCG. Le marteau vibratoire est dernièrement utilisé pour la recherche en Australie, en Afrique de Sud et en Nouvelle-Zélande (Asphalt Academy, 2011, Jenkins, 2000).

D'après la norme ASTM D6931-07, l'essai ITS consiste à soumettre un échantillon cylindrique à une force verticale sur le plan diamétral, à une charge constante et à une température déterminée. La valeur maximale avant la rupture de l'éprouvette est notée comme la valeur de résistance ITS correspondante (ASTM, 2007).

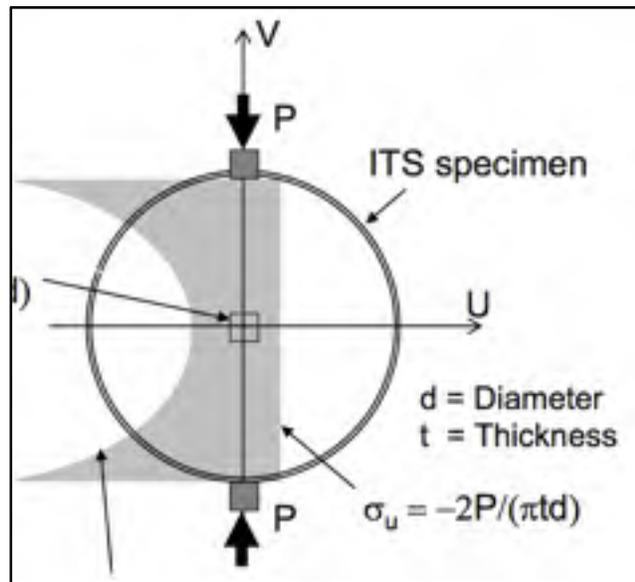


Figure 1.21 Schéma de la distribution des efforts dans un essai ITS
Tirée de (Gonzalez *et al.*, 2010)

Cette méthode est facile à réaliser et peu coûteuse du point de vue de l'appareillage, voir section 2.2.3. Une fois réalisé l'essai de résistance mécanique, on peut déterminer la valeur d'ITS et TSR, d'après les équations 1.5 et 1.6 :

$$ITS = \frac{2000 \times P}{\pi \times h \times D} \quad (1.5)$$

Où :

- ITS = Résistance à la compression diamétrale (kPa),
- P = Charge maximale (N),
- h = Hauteur moyenne de l'éprouvette (mm),
- D = Diamètre de l'éprouvette (mm).

Avec les valeurs obtenues, on peut évaluer la qualité relative d'un mélange et faire une estimation du potentiel d'un enrobé à développer de l'orniérage ou de la fissuration (ASTM, 2007). De même, on peut déterminer la vulnérabilité à l'humidité. Le rapport entre les valeurs ITS humides et sèches correspond à la valeur de la tenue à l'eau ou TSR pour son acronyme en anglais (*Tensile Strength Retained*). Tel qu'illustré dans l'équation 1.6.

$$\text{TSR} = \frac{\text{ITS}_{\text{humide}}}{\text{ITS}_{\text{Sec}}} \quad (1.6)$$

Pour Wirtgen (2004), les mélanges type MR-5 (50 % GBR +50 % MG), ont des valeurs typiques d'ITS qui oscillent entre 250 kPa et 600 kPa et le ratio TSR, entre 0,8 et 1,0. D'autres recherches mentionnent que le pourcentage TSR peut varier entre 50 % et 75 % (Fu *et al.*, 2009) ou 60 % à 70 % (Halles et Thenoux, 2009) en fonction des conditions météorologiques.

1.6.3 Paramètres associés

Lors d'une recherche sur les propriétés des mélanges à la mousse de bitume, Halles et Thenoux (2009) ont travaillé avec l'indice de Fracture (IF) et l'indice de Ductilité (ID) pour l'analyse des essais ITS. Les équations 1.7 et 1.8, montrent le calcul des indices utilisés.

$$\text{IF} = \text{Aire sous la courbe charge-déplacement ITS (J)} \quad (1.7)$$

$$\text{ID} = \frac{\text{IF (J)}}{\text{Charge max ITS (kN)}} \frac{\text{kN.mm}}{\text{kN}} \quad (1.8)$$

Étant donné que la charge ITS est en unités de kN et la déformation en mm, l'aire sous la courbe est en Joules ($J = N \cdot m = \text{kN} \cdot \text{mm}$), alors celles d'ID sont en mm.

La Figure 1.22 montre deux courbes typiques obtenues lors de l'essai ITS pour deux éprouvettes correspondant au même température et temps de cure. L'aire ombrée correspond à l'aire sous la courbe qu'on prend pour la détermination du pseudomodule.

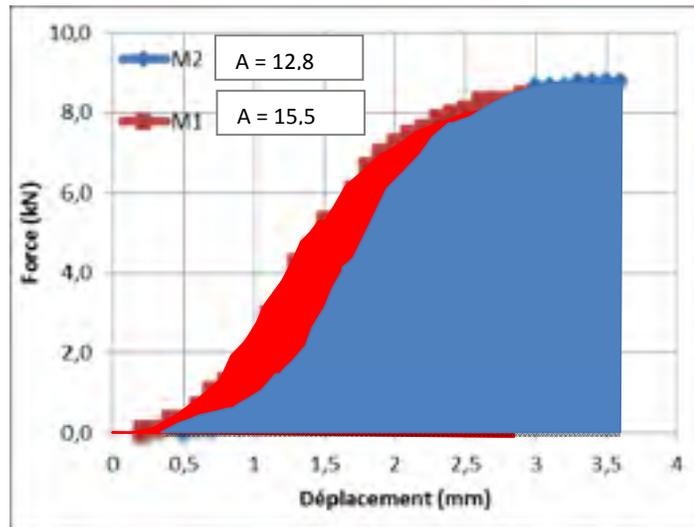


Figure 1.22 Courbe Force-Déplacement typique dans essais de résistance mécanique

Or, d'une part, l'IF correspond à l'aire (A) sous la courbe de la relation force-déplacement de l'essai de résistance ITS et peut être considérée comme un indice pour quantifier la capacité des matériaux, comme les mélanges à la mousse de bitume, de libérer l'énergie. D'autre part, le rapport entre l'aire (IF) et la force maximale est l>ID, et il fournit un indicateur quantitatif de la ductilité ou de la résistance à la déformation à la traction d'un matériau (Halles et Thenoux, 2009).

Quoique la stabilité Marshall soit en unités de force (kN), nous appliquerons le même principe pour le calcul des indices IF et ID que celui appliqué sur résultats de stabilité Marshall. Cela nous permettra de comparer avec plus de détail le comportement des ERF.

On a introduit l'analyse de la pente de la courbe Force-Déplacement des essais réalisés, soit Marshall ou ITS, comme un indicateur de déplacement avant l'écrasement de chaque brique. Cela veut dire que la déformation est directement proportionnelle à la valeur du module. On a pris la pente comme un équivalent de module, bien qu'il ne soit pas strictement un module Contrainte-Déformation.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Objectif de l'expérimentation

Le projet consiste, principalement, à évaluer les effets de la variation de la température pendant le temps de cure sur le comportement mécanique d'un matériau de type MR-5 MB. Plus spécifiquement, les buts sont :

- évaluer l'évolution dans le temps de la stabilité Marshall et de la résistance ITS à différentes températures de cure : 0 °C, 5 °C, 10 °C et à température ambiante (23 °C);
- inclure dans l'analyse des résultats des mesures de la résistance et le calcul des indices de comportement;
- comparer les résultats obtenus à la stabilité Marshall de ceux obtenus à la résistance ITS.

2.2 Méthodologie

La méthodologie du programme expérimentale se présente en trois volets, soit : 1) la formulation; 2) la confection et la cure des éprouvettes et, 3) les essais de résistance mécanique. Globalement, le programme expérimental vise à comparer l'effet du mode de cure (T° et temps) en vue de trouver des corrélations entre les deux différentes méthodes de mesure de la résistance mécanique retenue (Marshall et ITS). La Figure 2.1 montre les étapes concernées.

Sur la base de la formulation des enrobés suivant la norme Québécoise LC 26-002, des procédures de fabrication et d'essai de la norme ontarienne LS-297, des paramètres proposés

par le manuel Wirtgen (2004) et du Guide TG-2 (Asphalt Academy, 2000), les facteurs et les principales variables à considérer lors de chaque étape ont été définis. Les sections suivantes présentent en détail ces différentes étapes. Les principales activités sont présentées dans le Tableau 2.2.

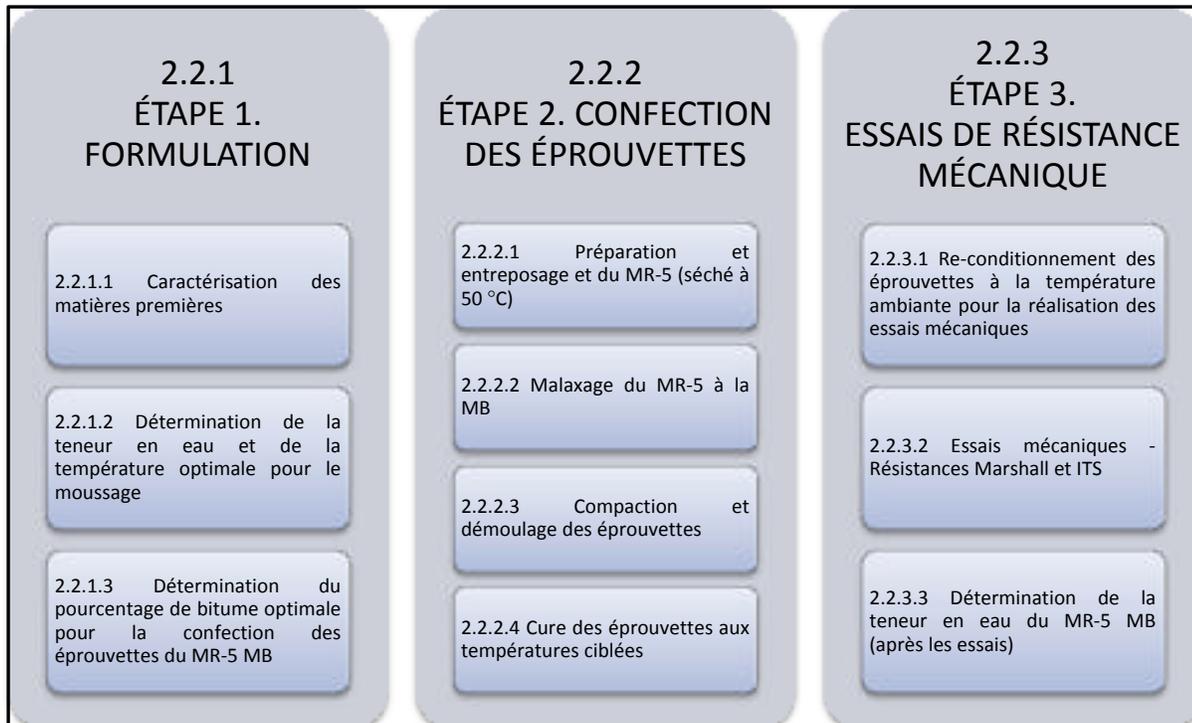


Figure 2.1 Étapes du programme expérimental

2.2.1 Étape 1 : Formulation

L'étape 1 comporte deux phases de formulation différentes. La première vise à établir la température et le pourcentage d'eau, du complexe bitume-eau, que l'on doit ajouter au bitume pour obtenir les meilleures propriétés moussantes. La deuxième phase de formulation a été menée en vue de déterminer le pourcentage de bitume optimal du MR-5 MB (%bit_{opt} MR-5 MB). Pour ce faire, dans un premier temps, une caractérisation des matières premières a été réalisée.

2.2.1.1 Caractérisation des matières premières

Le matériau utilisé dans cette étude correspond à un GBR, récupéré d'une centrale d'enrobage à Saint-Isidore (QC). Nous n'avons pas d'information spécifique quant à la provenance de ce GBR, ni sur son usage antérieur. Il s'agit d'un mélange de matériau de fraisât extrait de différents chantiers et de matériau d'usinage refusé. Au départ, une analyse granulométrique du GBR, la détermination de la teneur en bitume et la caractérisation du bitume résiduel ont été effectuées.

La caractérisation des matériaux comprend la réalisation des essais de laboratoire sur le GBR, le MG-20, le MR-5 (une fois mélangé) et sur le bitume extrait du GBR. Dans le Tableau 2.2 ont présent les essais réalisés sur chaque matériau et le Tableau 2.1 résume les normes suivies.

Tableau 2.1 Essais de caractérisation des matériaux

ESSAI	NORME
Analyse granulométrique	LC 21-040
Récupération du bitume en solution par évaporation rotative	LC 25-001
Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion.	LC 26-002
Échantillonnage	LC 26-005
Réduction en laboratoire d'échantillons en vue d'essais	LC 26-010
Préparation d'éprouvettes pour la méthode Marshall	LC 26-020
Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compacts	LC 26-040
Détermination de la densité maximale	LC 26-045
Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes	LC 26-060
Détermination de la teneur en bitume par ignition	LC 26-006
Détermination de la teneur en bitume	LC 26-100
Détermination de la masse du filler dans le produit de l'extraction	LC 26-110
Détermination du facteur de correction à utiliser pour le calcul de la teneur en bitume	LC 26-150
Détermination de la teneur en eau	LC 26-250
Analyse granulométrique des granulats	LC 26-350
Method of test for the determination of Indirect Tensile Strength of expanded asphalt mixes	LS 297

2.2.1.2 Détermination de la teneur en eau et de la température optimale pour le moussage

Pour la détermination de la teneur en eau et de la température optimale pour le moussage, deux paramètres caractéristiques ont été retenus : le coefficient d'expansion maximum (Ex) et le temps de demi-vie maximale ($t_{1/2}$).

On a calculé les valeurs de ces paramètres pour trois températures de bitume différentes, tout en variant la teneur en eau du complexe bitume-eau, de sorte à arriver à un pourcentage d'eau optimale à ajouter (% W_{opt} Mousse) à une température optimale du bitume ($T^{\circ}_{opt-bit}$) et ce, pour produire une mousse performante. À cet égard, les paramètres proposés par l'Asphalt Academy (2009) ont été retenus ($Ex \geq 8$ et $t_{1/2} \geq 6$). L'ensemble de ces résultats est présenté à la section 3.4.2.

2.2.1.3 Détermination du pourcentage de bitume optimal pour la confection des éprouvettes du MR-5 MB

Afin de déterminer le pourcentage de bitume optimal pour la confection des éprouvettes du MR-5 MB, la résistance à la compression diamétrale (ITS) et la stabilité Marshall ont servi de critères.

Les éprouvettes testées selon la méthode Marshall et en traction indirecte ont toutes été fabriquées suivant la norme 26-020 : « Préparation d'éprouvettes pour la méthode Marshall » en augmentant cependant le nombre de coups par face au compactage suivant les directives de la norme LS 297 *Indirect Strength of Expanded Asphalt Mixes (Ministry of Transportation Ontario, 2001)*. En conséquence, la fabrication des éprouvettes Marshall du MR-5 MB a été réalisée en appliquant une énergie de compaction de 75 coups pour chaque face de l'éprouvette, plutôt que 50.

Ensuite, les spécimens compactés sont alors soumis à un processus de cure de 72 heures à 40 °C, tel que mentionné dans le Manuel de recyclage à froid de Wirtgen (2004). Par la suite,

les éprouvettes sont laissées à température ambiante pour une période de 6 heures avant d'être finalement testées pour déterminer leur résistance mécanique (Marshall et ITS). Par ailleurs, d'autres éprouvettes ont été fabriquées afin de mesurer la densité maximale et la teneur en vides.

Notons que pour la détermination du $\%bit_{opt}$ du MR-5 MB, la teneur en eau et la température optimale du complexe bitume-eau établies au cours de la première phase de formulation, ont été appliquées (voir 2.3.1.2). La détermination de la teneur optimale en bitume pour le MR5 MB a été réalisée suivant quatre teneurs en bitume à la température ambiante.

À noter que les valeurs obtenues de stabilité Marshall et ITS dans cette phase de formulation correspondent à la moyenne de deux éprouvettes, afin d'avoir une meilleure idée d'ensemble pour l'analyse.

2.2.2 Étape 2 : Confection et cure des éprouvettes pour les essais mécaniques

Pour la confection des éprouvettes, les principales étapes liées à la confection et à la cure des éprouvettes sont données à la Figure 2.1 et le Tableau 2.2 montrent en détail les matériaux, les essais et les valeurs retenues pour chaque variable analysée au cours de cette étude.

2.2.2.1 Préparation et entreposage du MR-5

Pour cette recherche, un MR-5 a été constitué. La composition du MR-5 est de 50 % de GBR avec 50 % de granulats vierges. La Figure 2.2 présente une photo des matières premières utilisées. La détermination de la densité maximale et la teneur en eau sur de MR-5 ont été réalisées. Le granulats vierges est un MG-20 provenant de Bomix. La granulométrie et la densité brute ont été mesurées en laboratoire et les résultats seront traités au chapitre 3.

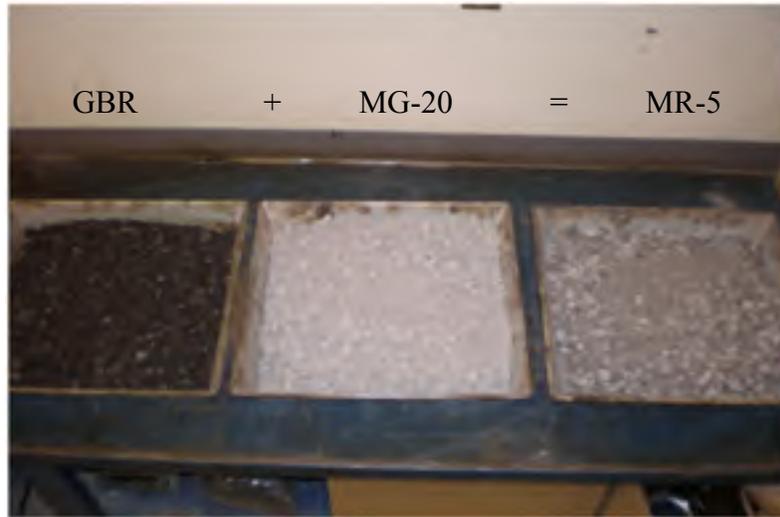


Figure 2.2 Photos des composantes sèches utilisées pour constituer le MR-5

Le MG-20 a été séché à l'étuve à 105 °C alors que le GBR a été séché à l'étuve à 50 °C. Ensuite, on procède à leur mélange en quantités égales en utilisant un mélangeur de granulats pour former le MR-5. (Figure 2.3). Deux séries de 250 kg de MG-20 et de GBR ont été utilisées pour constituer un total de 500 kg de MR-5. Par la suite, on a fait un quartage et une réduction des échantillons et, finalement, on a procédé au remplissage de chaudières de 25 à 30 kg pour utilisation ultérieure.

Les chaudières ont été entreposées à la température ambiante au LCMB. Au moins un jour avant la fabrication du MR-5 MB, deux chaudières de 30 kg de MR-5 sont mélangées et homogénéisées au laboratoire. Ensuite, à l'aide d'un séparateur mécanique, un échantillon de 25 kg à 30 kg a été constitué et l'échantillon est alors entreposé à la température de cure ciblée pendant au moins 24 heures.



Figure 2.3 Malaxage et séparation du MR-5

2.2.2.2 Malaxage du MR-5 MB

Pour produire un matériau bitumineux, le MR-5 est traité à la mousse de bitume avec un bitume PG 58-28 apte au moussage, fourni par McAsphalt Inc. La mousse de bitume est incorporée au matériau granulaire pendant que sa viscosité est minimale, c'est-à-dire, pendant le temps de demi-vie. Bien qu'on a travaillé à déterminer la température du bitume et l'eau d'ajout optimale pour le moussage, on n'a pas été en mesure d'évaluer la température de la mousse au moment de sa production.

Finalement, une fois la mousse incorporée, le bitume reprend ses propriétés initiales et agit comme liant entre les particules granulaires, produisant ainsi un enrobé à froid (Serfass, 2009), soit le MR-5 MB. La Figure 2.4 montre l'aspect final d'un mélange à la mousse de bitume.

Tableau 2.2 Étapes de la méthodologie

ÉTAPE 1 FORMULATION										
1.1 Caractérisation des matières premières	REQUIS	GBR	MG 20	MR 5 (Séc)	Bitume (extrait du GBR)				REMARQUES	
	ESSAI	<ul style="list-style-type: none"> Teneur en eau Granulométrie Densité Teneur en bitume Granulométrie 	<ul style="list-style-type: none"> Essai d'absorption 	<ul style="list-style-type: none"> Teneur en bitume Granulométrie 	<ul style="list-style-type: none"> Viscosité Pénétration Détermination PG 					
1.2 Teneur en eau et T° optimales pour moutage	TEMPÉRATURE variable (°C)	TENEUR EN EAU variable (%)		PROPRIÉTÉS MOUSSE	INDICES OPTIMISATION MOUSSE					
	<ul style="list-style-type: none"> 160 °C 170 °C 180 °C 	2,0;	2,5;	3,0;	3,5;	4,0	<ul style="list-style-type: none"> Épaisseur (EN) Demi-vie (t₅₀) 	<ul style="list-style-type: none"> Surface de compression (cm²) Indice de mouabilité (Im) 		
1.3 Détermination du pourcentage de bitume optimale pour la fabrication du MR-5 MB	ESSAI	% BITUME (TOTAL)		Cure		Compactage	Vitesse vérin pour Marshall et ITS		essai d'après la norme JC - 25 050 «Préparation d'éprouvettes pour la méthode Marshall»	
	MARSHALL	4,0; 4,2; 4,4; 4,6		Temps (h)	Température	75 coups de chaque côté	50,8 mm/min			
	ITS	3,6; 4,1; 4,5; 5,1		22	10 °C					
ÉTAPE 2 CONFECTION ET CURE DES ÉPROUVETTES										
2.1	Entreposage	TEMPS (h)	TEMPÉRATURE (°C) correspondante à celle de la cure cible.						Jour avant du malaxage	
		24	0°C; 5 °C; 10 °C et 23 °C							
2.2 à la MB	Malaxage	TEMPS (min)	TEMPÉRATURE (°C)	%bit ajouté	% eau pour malaxage	% eau pour MR-5	% ciment ajouté			
		1,5 à 4,5	Variable	4,2	3,25	3,4	1,0			
2.3 Compaction des éprouvettes pour les essais de résistance		TEMPS (min)	TEMPÉRATURE (°C)	Coups Marteau Marshall						
		15 à 30	Ambiante (23 °C)	75 coups de chaque côté						
2.4 Démoulage		TEMPS	TEMPÉRATURE (°C)							
		suite du compactage	Ambiante							
2.5 Cure		TEMPS	TEMPÉRATURE (°C)							
		variable	variable							
		0 - 15 min; 1h; 3h; 24h; 72h; 3j et 14j	0°C; 5 °C; 10 °C; 23 °C							
ÉTAPE 3 ESSAIS DE RÉSISTANCE MÉCANIQUE										
3.1 conditionnement des éprouvettes à la température ambiante	Re-	Temps de re-conditionnement à T°C amb	Temps de cure							
			0-15 min	1h	3h	24h	72 h	3j	7j	
		n/a	1 à 3 h	3	5h					
3.2 des éprouvettes - Résistances Marshall et ITS.	Essai	Vitesse vérin pour Marshall et ITS	TEMPÉRATURE (°C)	À noter que les éprouvettes essayées dans les premiers 0-30 min et 1 heure, n'arrivent pas à atteindre la température de cure cible. Donc, la température d'essai pour toutes les éprouvettes correspond à la température ambiante.						Avant les essais on a pris le poids de l'éprouvette
		50,8 mm/min	Ambiante (23 °C)							
3.3 Teneur en eau des éprouvettes après l'essai									Échantillon de 400 g. de chaque éprouvette testée d'après la norme JC 21-200	



Figure 2.4 Aspect du MR-5 à la mousse de bitume

2.2.2.3 Compaction et démoulage des éprouvettes

Selon le protocole établi dans la section 2.2.2, on a procédé à la fabrication de 28 éprouvettes pour chacune des quatre températures de cure ciblées dans le cadre de ce projet de recherche. Un total de 112 éprouvettes a donc, été confectionnées et testées.



Figure 2.5 Marteau Marshall pour le compactage des échantillons. LCMB, 2012

Les éprouvettes ont été démoulées immédiatement après le compactage, pour être rapidement placées dans une chambre à température contrôlée.

2.2.2.4 Conditions de cure des éprouvettes

Pour l'étape des essais de résistance, on a comparé les paramètres de résistance mécanique en fonction du temps de cure (jeune âge), suivant quatre scénarios de températures différentes. On a travaillé à des températures de cure de 0 °C, 5°C et 10 °C comme températures d'observation, en gardant une température ambiante de référence qui oscillait entre 23,5 °C et 24,3 °C, au LCMB.

Par ailleurs, sept temps de cure ont été considérés dans cette étude pour mesurer l'évolution de la résistance mécanique d'un MR-5 MB. Un premier temps de cure de 15 minutes à 30 minutes a été fixé, soit tout juste après la fabrication des éprouvettes. Ensuite, des temps de cure de une, trois et 24 heures et de trois, sept et 14 jours ont été sélectionnés. Cela nous a permis d'évaluer son comportement à court terme. Également, d'autres éprouvettes ont été fabriquées afin de mesurer la densité maximale et la teneur en vides.

Pour contrôler les conditions de température et de cure, on a utilisé trois chambres conditionnées : une chambre de refroidissement contrôlé du le LCMB (MTS) pour 0 °C, un frigo conditionné à la STEPPE pour la cure à 5 °C et un frigo du le LCMB pour des températures de 10 °C. Les éprouvettes curées à température ambiante ont été laissées à l'air au LCMB.

En outre, il est important de faire remarquer que le processus de cure des éprouvettes retenu pendant la formulation est différent de celui qu'on a suivi pour l'ensemble de cette étude visant à étudier l'influence de la température et du temps de cure sur les MR-5 MB. De ce fait, cette étude a été réalisée dans conditions de cure à froid.

2.2.1 Étape 3 : Essais de résistance mécanique. Stabilité Marshall et résistance à la traction indirecte (ITS)

Une fois que la cure des éprouvettes est achevée, les éprouvettes sont reconditionnées à la température ambiante. Ensuite, on a procédé aux essais de résistance mécanique de stabilité Marshall et compression diamétrale ITS. Le paramètre de comparaison entre les deux méthodes d'essai, est la résistance mécanique des éprouvettes à chaque temps de cure et à chaque température désirée.

La Figure 2.4 montre que la presse Marshall a été légèrement modifiée pour l'essai de mesure de traction indirecte (ITS). Essentiellement, c'est le mode de chargement qui est différent. À la Figure 2.6 a) et b), on montre le mode de chargement spécifique à l'essai ITS. La Figure 2.6 c), montre une photo du système de mâchoire utilisé pour la mesure de la stabilité Marshall.

À la Figure 2.6, la photo b) montre clairement que l'éprouvette est littéralement écrasée à cause du confinement exercé par les mâchoires lors du chargement : le mode de rupture est donc très différent de celui généré pour la mesure de la résistance en traction indirecte (ITS) (Figure 2.6b).

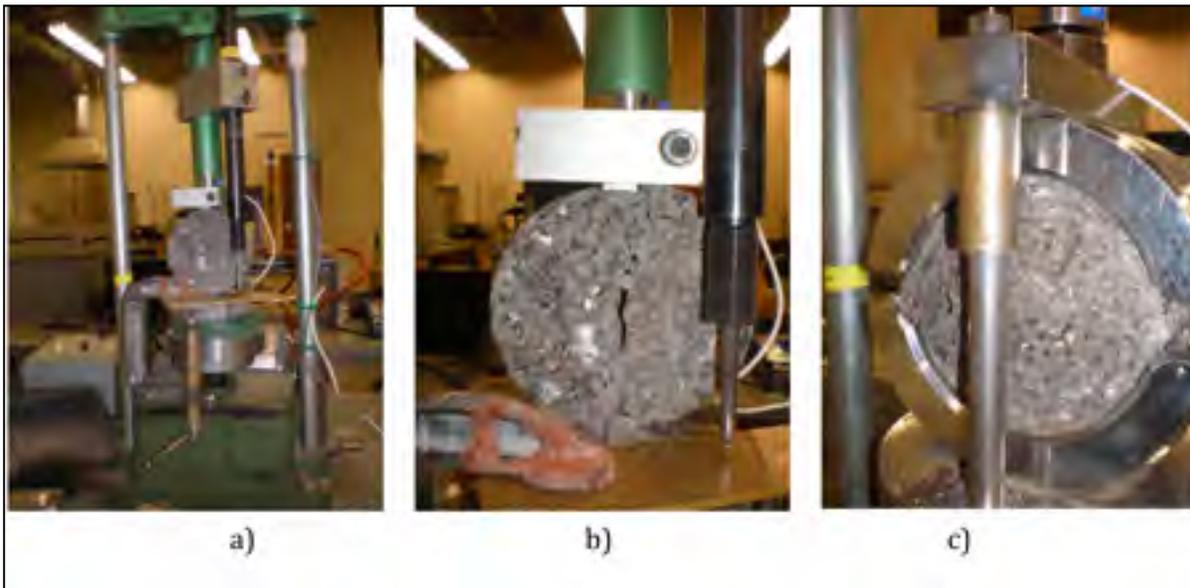
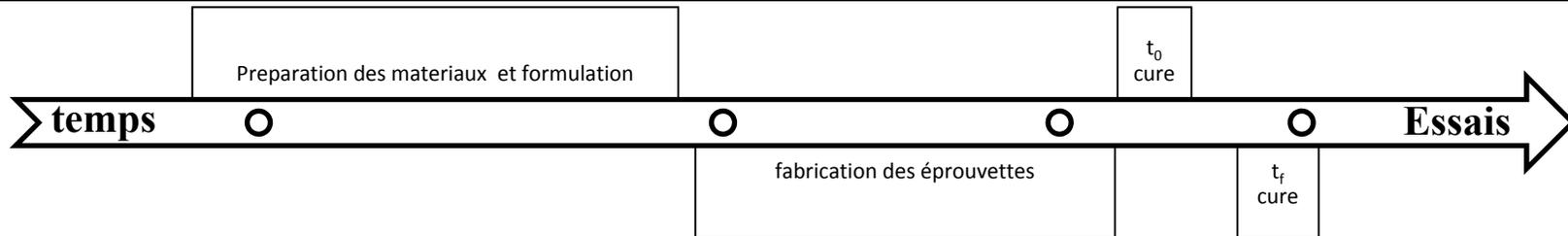


Figure 2.6 Installation pour l'essai ITS de la Presse Marshall

a) Vue générale de la presse et modification de l'appareillage pour l'essai ITS. b) Mode de chargement utilisé pour l'essai ITS et c) mode de chargement pour la détermination de la stabilité Marshall.

Figure 2.7 Schéma chronologique des éprouvettes

PRÉPARATION DES MATIÈRES PREMIÈRES	PROCEDURE	ENTREPOSAGE		MALAXAGE	COMPACTION	DÉMOULAGE	t _{cure} (heures)	RE-CONDITIONNEMENT POUR ESSAI MÉCANIQUE			ESSAI DE RÉSISTANCE
		INDETERMINÉ	24 AVANT MALAXAGE					1h	3h	6h	
SECHAGE GBR À 40 °C MALAXAGE AVEC MG-20 (SÉCHE) 50% GBR+50%MG-20	TEMPS	INDETERMINÉ	24 AVANT MALAXAGE	1 à 3 MIN	15 MIN	3 MIN	VARIABLE	1h	3h	6h	5 MIN
							0 – 15 1h 3h 24h 72h 7j 14j	- <input checked="" type="checkbox"/> - - - - -	- - <input checked="" type="checkbox"/> - - - -	- - - <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	
	TEMPERATURE	T ° AMB	T ° VARIABLE	T ° VARIABLE	T ° AMB	T ° AMB	VARIABLE	T ° AMB			T ° AMB
	REMARQUES	chaudières	Chambres conditionnées à la température ciblée	À la MB	MARTEAU MARSHALL	Suite à la compaction					MARSHALL ITS



CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

3.1 Caractérisation des matières premières

Le MR-5 confectionné en laboratoire est constitué d'un GBR et d'un MG-20 en proportion massique de 50:50 et traité avec un bitume PG58-28 sous forme de mousse de bitume : le MR-5 MB. Le MR-5 MB a été utilisé pour la confection des éprouvettes pour les essais de résistance.

Le GBR a été échantillonné dans des barils en centrale d'enrobage et entreposé au LCMB de l'ÉTS. La Figure 3.1 montre une vue d'ensemble de l'emplacement d'entreposage du GBR à la centrale et le processus de remplissage des barils après avoir choisi le GBR de différentes parties du tas, pour garantir un échantillonnage adéquat.

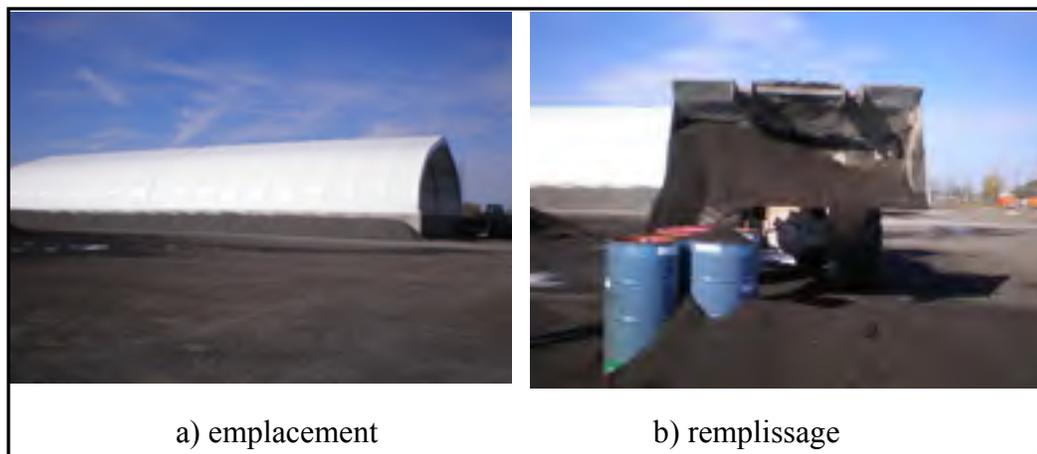


Figure 3.1 Pile de matériau à l'usine où le GBR a été échantillonné

Suite à l'échantillonnage, deux éléments méritent d'être soulignés quant à la manipulation du GBR à l'échantillonnage. D'une part, le GBR échantillonné a été pris d'une pile de stockage soumise aux intempéries, ce qui n'est pas essentiellement représentatif des conditions de chantier. D'autre part, un examen visuel réalisé après échantillonnage a montré un certain degré d'hétérogénéité quant à l'origine du matériau. En effet, l'examen visuel (Fig. 3.2) a

montré la présence de différents matériaux granulaires, de matériaux calcaires, de débris de matériaux de construction, de traces de fibres et même de la peinture de marquage. Le tout témoigne que le GBR échantillonné est constitué de divers matériaux de recyclage. Notons que l'effet de cette hétérogénéité ne sera pas étudié dans ce mémoire. De ce fait, on a décidé de travailler avec des matériaux secs avant le début de la formulation pour faciliter l'atteinte de la teneur en eau optimale.

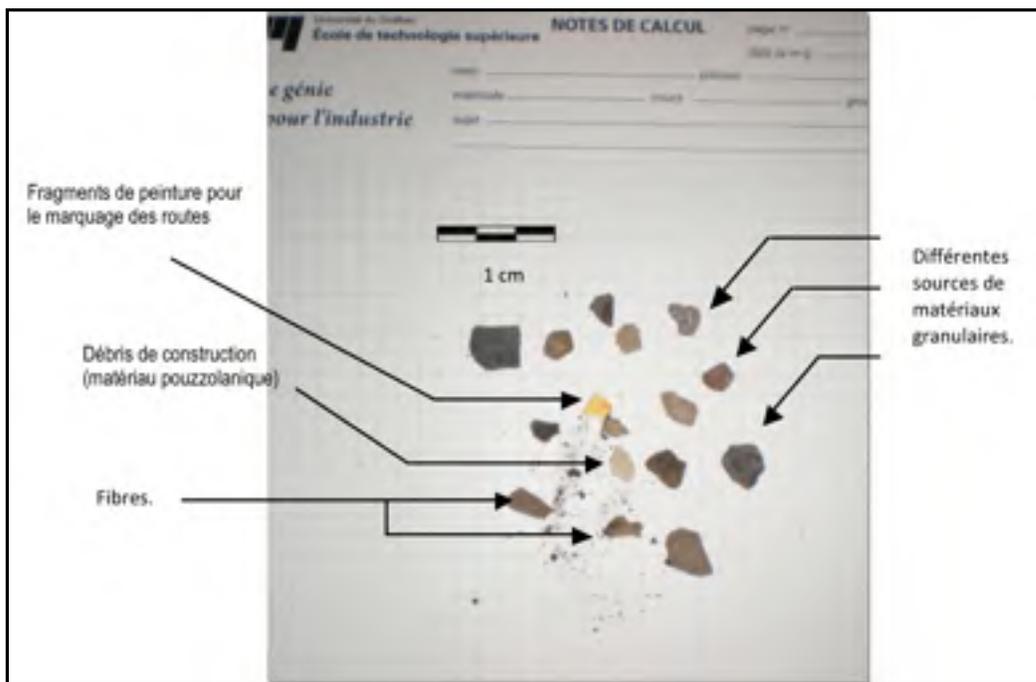


Figure 3.2 Matériaux types présents dans le GBR utilisé

La teneur en eau, la densité brute et la granulométrie du GBR avant et après extraction, la granulométrie du MG-20, et celle du mélange MR-5 à sec ont été déterminées. Également, la teneur en bitume résiduel du GBR a été déterminée et le bitume extrait a été caractérisé en vue de déterminer le grade du bitume (PG). Ces caractéristiques sont présentées dans les sections suivantes.

3.1.1 Caractérisation du GBR

On a travaillé avec des granulats secs, autant pour le GBR que pour le MG-20. Donc, la variable d'humidité n'a pas été prise en compte dans le processus de mélange. Toutefois, on a déterminé les valeurs d'humidité après moussage, après compactage et avant les essais de résistance, afin de faire un suivi de la teneur en eau pendant le processus de fabrication et de cure.

Le processus de cure a été réalisé dans des conditions de température contrôlée. La portée de notre étude consiste à conditionner les granulats à la même température que celle de la température de cure visée, à savoir, à 0 °C, 5 °C et 10 °C, et à la température ambiante (23 °C) comme référence.

3.1.1.1 Teneur en eau du GBR

La teneur en eau du GBR a été déterminée d'après la norme LC 21-201 : *Détermination de la teneur en eau par séchage*. Des essais suivant la méthode LC-21-200 : *Détermination de la teneur en eau au four à micro-ondes*, ont également été faits pour vérifier la teneur en eau tout juste avant malaxage.

Pour les deux méthodes, on a obtenu des résultats semblables. Le Tableau 3.1 montre les résultats obtenus et l'écart entre les teneurs en eau mesurées. Cela nous a permis de valider les résultats et d'utiliser la méthode par séchage au four micro-ondes dans les étapes ultérieures.

Tableau 3.1 Comparaison de la détermination de la teneur en eau

Teneur en eau par séchage (à l'étuve). LC 21-201								
Échantillon	1		2		3		4	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
Mh	1336,0	2214,0	3710,0	4034,0	1582,0	1275,0	1986,9	1913,4
Ms	1274,0	2110,0	3542,0	3852,0	1508,0	1220,0	1899,1	1827,1
w%	4,9%	4,9%	4,7%	4,7%	4,9%	4,5%	4,6%	4,7%
w% moyen $w\% = \frac{Mh - Ms}{Mh} \times 100$	4,9%		4,7%		4,7%		4,7%	
w%	4,8%							
Teneur en eau au four micro-ondes LC 21-200								
Échantillon	1		2		3		4	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
Mh	404,2	503,0	501,0	500,0	502,0	500,0	404,1	401,2
Ms	385,5	480,2	478,1	477,5	478,3	478,4	386,9	383,9
w%	4,9%	4,7%	4,8%	4,7%	5,0%	4,5%	4,4%	4,5%
w% moyen	4,8%		4,8%		4,7%		4,5%	
w%	4,7%							

Les résultats du Tableau 3.1 montrent une différence de 0,06 % entre les deux méthodes utilisées pour mesurer la teneur en eau du GBR. Cette différence n'est pas significative quant à la valeur finale de la teneur en eau. Pour faciliter le processus au laboratoire, on a donc retenu pour la suite des travaux, la norme LC 21-200 plutôt que la norme LC 21-201, nettement plus rapide d'exécution.

En conséquence, la valeur retenue comme teneur en eau du GBR est 4,7 %. Toutefois, ces données n'ont pas été prises comme données de formulation, car on a utilisé le GBR en condition sèche.

3.1.1.2 Granulométrie du GBR

Comme dans les mélanges traditionnels, la taille et la distribution des particules du GBR et du MG-20 utilisés sont des caractéristiques à évaluer. Les résultats ont été comparés par rapport aux limites établies pour la TG-2 (Asphalt Academy, 2009).

3.1.1.3 Granulométrie avant extraction du bitume

Six granulométries représentatives du matériau d'origine (GBR) ont été réalisées suivant la norme LC 21-040. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Résumé des granulométries du GBR avant extraction

Tamis (mm)	Tamisat (%)						Moyenne avant	Écart type
	ECH 1	ECH 2	ECH 3	ECH 4	ECH 5	ECH 6		
20	100	100	100	100	100	100	100	0,0
14	100	100	100	99	100	99	100	0,5
10	89	88	88	83	90	85	88	2,7
5	47	55	55	44	62	51	53	6,7
2,50	32	39	38	26	44	35	36	6,4
1,250	17	24	24	15	29	23	22	5,4
0,630	5,0	9,9	11	6,1	16	12	9,6	4,2
0,315	1,1	2,8	3,2	1,5	5,4	4,5	2,8	1,7
0,160	0,3	0,5	0,7	0,3	1,3	1,6	0,6	0,5
0,080	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,8	0,1	0,3

La Figure 3.3 montre que la dispersion des données est plus importante dans le cas des particules de 10 mm à 0,630 mm. La courbe en pointillés à la Figure 3.3 représente la granulométrie moyenne des six granulométries.

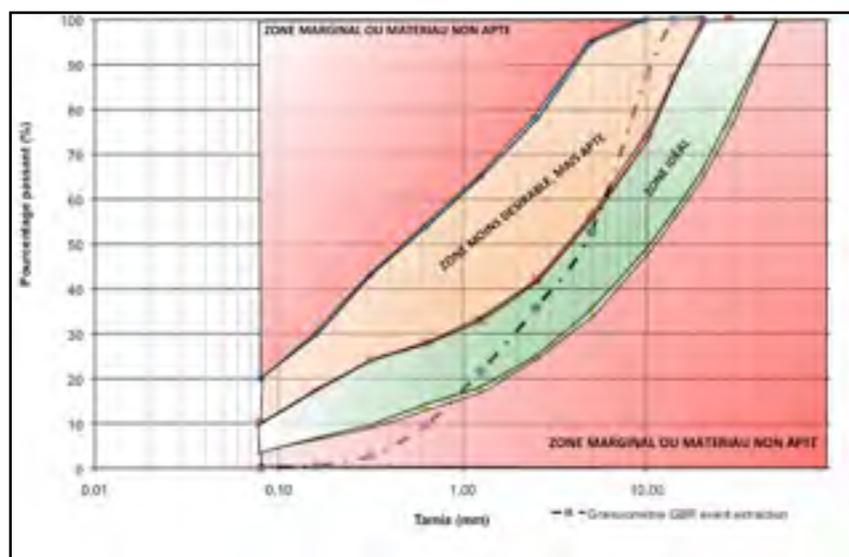


Figure 3.3 Courbe granulométrique du GBR avant extraction

La granularité du GBR de la fraction grossière du GBR (20-60 mm) se situe dans la zone considérée comme moins apte d'après les paramètres proposés pour le guide TG-2 (Asphalt Academy, 2009). La partie centrale de la courbe (1,5 – 5 mm) se situe dans la zone idéale. Quant à la dernière section de la courbe, hors des limites, là où les particules sont fines, 0,63 mm et 0,075 mm, elle est considérée comme non apte.

3.1.1.4 Granulométrie après extraction du bitume

Après extraction du bitume du GBR, sept granulométries ont été réalisées sur la fraction minérale, dont cinq au LCMB et deux dans un laboratoire extérieur. Le Tableau 3.3 présente les pourcentages passants obtenus pour chaque essai, la courbe granulométrique moyenne et les écarts types. Ces derniers sont inférieurs à ceux calculés pour tamisât obtenus des granulométries avant l'extraction (voir Tableau 3.2).

Tableau 3.3 Résumé des granulométries GBR après extraction

Tamis (mm)	Tamisat (%)								Courbe moyenne	Écart type
	LCMB					Lab. Extérieur				
	M1	M2	M3	M4	M5	M1-TOMY	M2-TOMY			
50	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0	
28	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0	
20	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0	
14	100	100	100	99	100	100	100	100	0,3	
10	97	100	95	91	93	95	94	95	2,8	
5	78	73	76	67	72	73	71	73	3,4	
2,50	63	57	61	53	57	58	55	58	3,5	
1,250	52	45	50	43	46	46	45	47	3,3	
0,630	42	36	40	34	37	37	36	37	2,7	
0,315	26	25	27	24	26	26	25	26	1,0	
0,160	14	15	17	16	17	15	14	15	1,2	
0,080	11	10	12	11	12	7,8	7,8	10	1,8	

À la Figure 3.3, la ligne pointillée représente la courbe moyenne de la granulométrie après extraction de bitume. Notons que la majorité de la courbe est dans la zone « moins apte »;

seules les particules de 0,160 mm dépassent de presque 2 % les limites de la zone « moins apte » pour se placer dans la zone « idéal ». Cela ne semble pas être assez représentatif étant donné que l'écart type est de 1,2 à ce point.

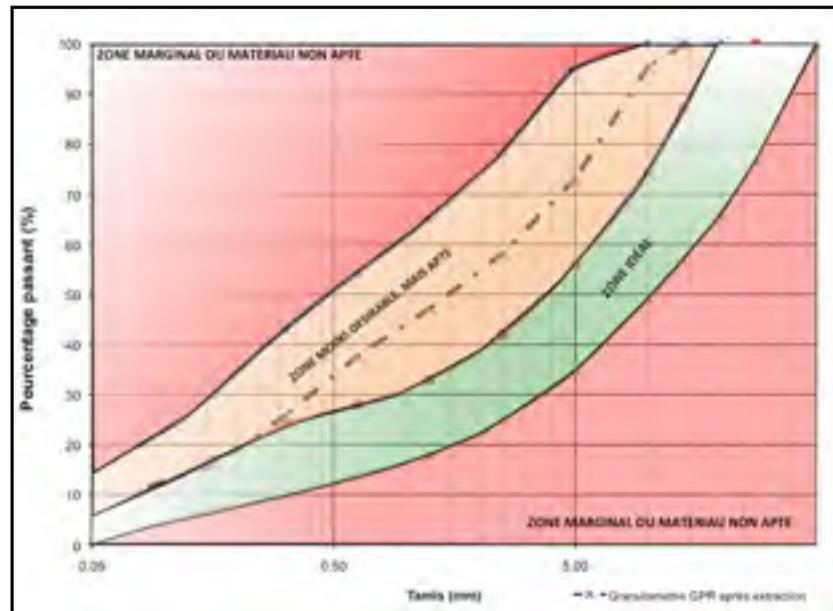


Figure 3.4 Courbe granulométrique du GBR après extraction

Il est bon de souligner que la zone qualifiée de « moins apte », n'est pas nécessairement un critère de refus. Il s'agit essentiellement des limites fixées par le guide TG-2 d'après des expériences en chantier. Il a été montré que les matériaux dont la granularité est comprise dans la zone qualifiée de non-apte présentent des performances plus basses que ceux dont la granularité est considérée comme idéale (Akeroyd et Hicks, 1988; Asphalt Academy, 2009).

Le fait que le GBR semble avoir de particules plus grosses peut être dû à la présence d'agglomérations et de mottes de mastic qui persistent après plusieurs étapes de manipulation, y compris le séchage à l'étuve. Le paramètre considéré pour la formulation et pour la classification du matériau est la granulométrie **après** extraction.

3.1.1.5 Densité maximale (d_{mm}) du GBR

L'essai a été fait sur deux échantillons séparés et selon la procédure de la norme LC 26-045. Pour déterminer la densité maximale, on a utilisé l'équation 3.1 :

$$d_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \quad (3.1)$$

Où : A = Masse de l'échantillon sec dans l'air (g).

D = Masse du récipient rempli d'eau à 25 °C (g.)

E = Masse de l'échantillon + récipient rempli d'eau à 25 °C (g.)

On a trouvé que la densité maximale du GBR est de 2,545. Ce résultat est en accord avec les valeurs de d_{mm} de 2,549 et 2,535 réalisés sur les échantillons par un laboratoire extérieur. Si l'on fait une moyenne de ces résultats, on obtient un d_{mm} pour le GBR de 2,544 (voir Annexe 1, Résultats).

3.1.2 MG-20

Le granulat d'apport utilisé pour constituer le MR-5 à traiter est un matériau granulaire de type MG-20. La granulométrie déterminée sera présentée à la section suivante.

3.1.2.1 Granulométrie du MG-20

Comme il a déjà été mentionné, le MG-20 représente 50 % du MR-5. À la Figure 3.4, on peut observer comment le matériau granulaire vierge correspond à un matériau idéal, étant donné que sa position est optimale suivant les limites du guide TG-2. Cela est très important pour aider le GBR à améliorer sa granulométrie et rendre le matériau plus « apte » pour la fabrication des mélanges à la mousse de bitume.

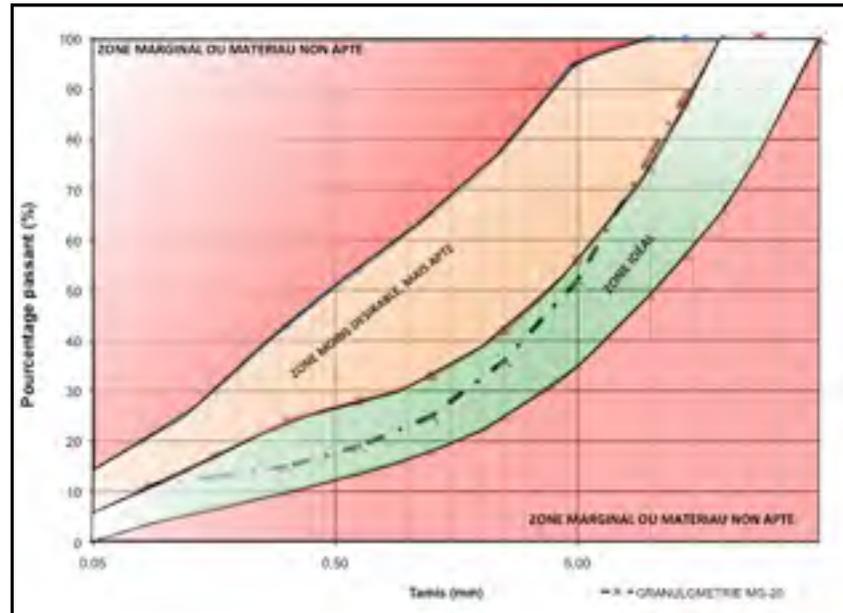


Figure 3.5 Courbe granulométrie du MG-20

3.1.3 Matériau recyclé de type 5, MR-5

On a mesuré la granulométrie pour le matériau MR-5. La Figure 3.6 présente la courbe moyenne de cinq granulométries réalisées sur le MR-5 préparée en laboratoire à partir du GBR et du MG-20. L'ensemble des résultats de chaque granulométrie est donné à l'Annexe 1 : Résultats de Laboratoire.

Les résultats de la Figure 3.6 montrent que le MR-5 est dans les limites du guide TG-2. Cela est considéré comme la classification réelle du matériau de type MR-5 utilisé dans cette étude.

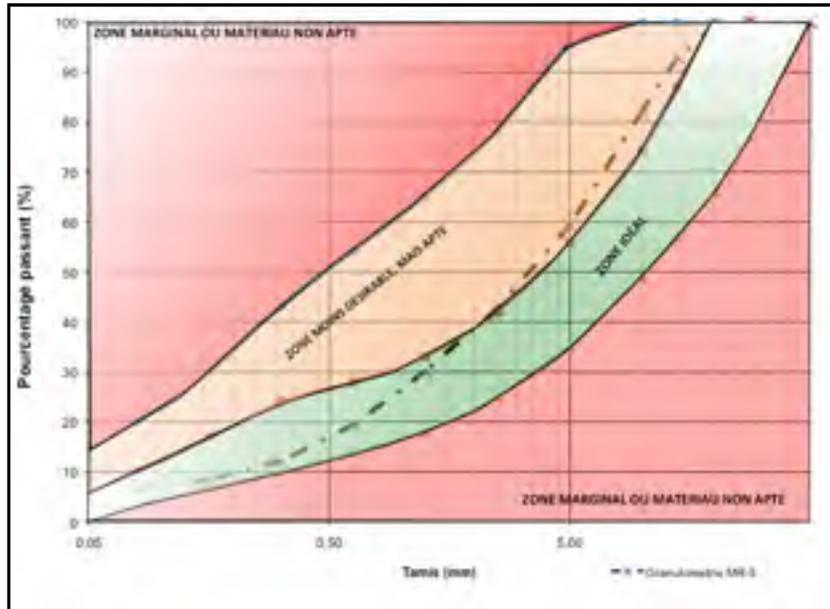


Figure 3.6 Granulométrie MR-5

On peut observer que les grosses particules sont dans la zone « moins apte ». Il y a une inflexion dans la limite de 5 mm et, ensuite, les particules fines sont dans la zone « idéale ». Cela est un constat important, étant donné qu'il est possible d'améliorer le GBR choisi, en additionnant, dans une proportion établie, un granulat vierge standard.

3.1.4 Bitume

Premièrement, la teneur en bitume du GBR a été déterminée. Ensuite, sur le bitume extrait, des essais de viscosité Brookfield à 135 °C et à 165 °C et l'essai de pénétration à 25 ° ont été réalisés. Finalement, des essais de cisaillement dynamique (DSR) et de flexion de poutre (BBR) ont complété la caractérisation du bitume du GBR. (Voir annexe I Résultats bitume pour vérifier le PG).

3.1.4.1 Teneur en bitume du GBR

La teneur en bitume du GBR a été déterminée par extraction suivant la norme LC 26-100. Cinq répétitions ont été réalisées. Deux essais additionnels faits dans un laboratoire d'Amos

ont été considérés. L'ensemble des résultats est présenté dans le Tableau 3.4. Les critères d'acceptabilité de la norme ont été pris en compte.

Tableau 3.4 Résultats de la teneur en bitume par extraction du GBR

Essai	(%)								
	1	2	3	4	5	moyenne	écart type	acceptabilité	répétabilité
LCMB	4,04	4,07	4,04	4,15	4,08	4,08	0,05	< 0,09 OK	0,1
AMOS	4,20	4,24	-	-	-	4,22	0,03	< 0,09 OK	< 0,19 OK

Étant donné que les résultats respectent les critères d'acceptabilité de la norme LC-26-100, la valeur de la teneur en bitume retenue correspond à 4,1 % pour le GBR utilisé.

3.1.4.2 Détermination du PG du bitume extrait du GBR

La variabilité des sources de matériaux qui constituent le GBR ne permet pas de déterminer avec précision le PG du bitume. Il s'agit d'un matériau où peuvent être présents différents PG de bitume. En même temps, ceux-ci peuvent être additionnés de différents composants comme des fibres ou polymères.

Cependant, on a procédé à des essais de caractérisation de bitume, appliqués habituellement au bitume vieilli. Le Tableau 3.5 montre les résultats des essais de cisaillement dynamique (DSR), de flexion de poutre (BBR), de viscosité Brookfield et de pénétration.

Tableau 3.5 Résultats essais de caractérisation bitume extrait

CARACTÉRISATION DE BITUME EXTRAIT DU GBR					
Cisaillement dynamique - DSR					
T (°C)	Ø (mm)	% def	G* (kPa)	δ (°C)	G*/sin δ (kPa)
76	25		2,360	81,17	2,388
82	25		1,137	83,22	1,145
Température pour G*/sin δ (kPa) = 2,2 kPa				Te =	76,7
Flexion de poutre - BBR					
T (°C)	s(60) (mPa)	m(60)	T (°C)	s(60) (mPa)	m(60)
-18	232	0,329	-24	459	0,263
-18	221	0,322	-24	472	0,272
moyenne	227	0,326	moyenne	466	0,268
Température par le module de rigidité :			-20,3	Tb =	-30,3
Température par la pente :			-20,7		
Essais complémentaires					
Viscosité Brookfield (Pa*s) à 135 °C					1,727
Viscosité Brookfield (Pa*s) à 165 °C					0,391
Pénétration (dmm)					11

D'après la norme 4101 Enrobés (MTQ, 2004), la classification PG d'un bitume est fonction de la valeur de **Tb**, laquelle correspond à la température la plus basse à laquelle pourrait résister le bitume, et de la valeur de **Te**, laquelle correspond à la température la plus élevée à laquelle le bitume peut conserver ses caractéristiques. Étant donné que la désignation du PG d'un bitume se fait suivant des incréments de 6 °C et considérant les valeurs du Tableau 3.7, le bitume du GBR est donc une PG 70-28.

Par ailleurs, la Figure 3.7 montre la relation entre la viscosité et la température pour les essais réalisés à 135 °C et 165 °C sur le bitume extrait du GBR et pour le bitume d'ajout (PG 58-28) que l'on a utilisé au moussage du MR-5 traité. À noter que les caractéristiques du bitume d'ajout sont données à l'annexe 1. À partir de ces données, il est possible d'obtenir des températures recommandées pour le compactage et le malaxage.

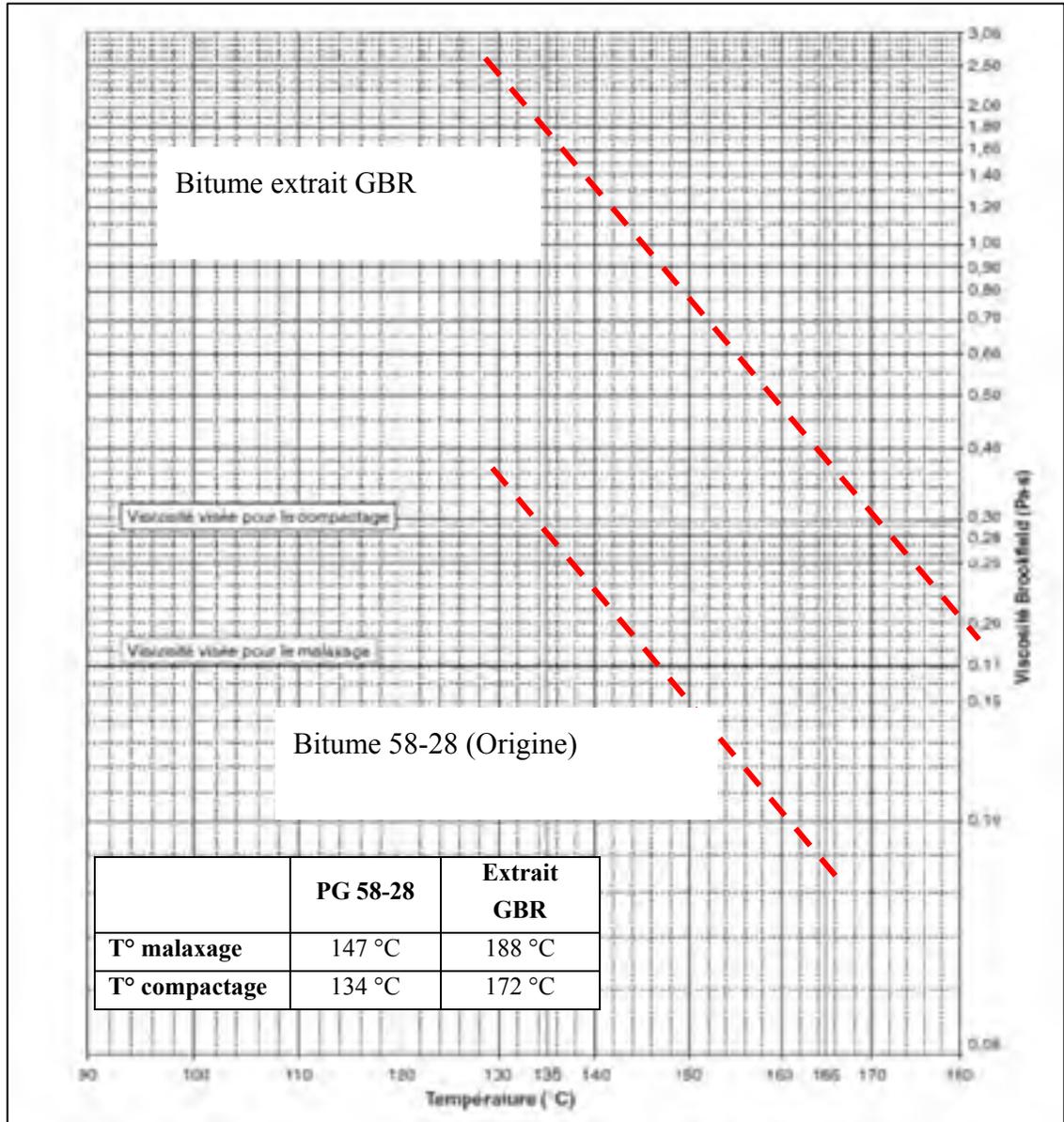


Figure 3.7 Représentation de la relation entre la viscosité et la température pour les bitumes utilisés

3.2 Optimisation des paramètres pour produire une mousse de bitume optimale

À la section 1.5.4, on a évoqué que dans le processus de fabrication d'une mousse de bitume, la température (T°) et la teneur en eau (% w) ont une incidence sur la moussabilité du bitume.

La détermination d'une température optimale (T°_{opt}) et d'une teneur en eau optimale ($\%w_{opt}$), se fait en considérant l'effet moussant pour trois températures données, et ce, en variant la teneur en eau pour chaque MR-5 MB confectionnée.

La détermination de la température et de la teneur en eau optimales est fondée sur l'optimisation des valeurs de rapport d'expansion (Ex) et du temps de demi-vie ($t_{1/2}$) lors de la fabrication de l'enrobé MR-5 MB et ce, pour chaque scénario de température et de teneur en eau donné. À partir de l'évolution des valeurs de Ex et de $t_{1/2}$, il est possible de déterminer la valeur de T°_{opt} et celle de $\%w_{opt}$. Les principaux résultats à cet effet seront présentés à la section suivante.

3.2.1 Optimisation du moussage par rapport aux critères d'Expansion (Ex) et du temps de Demi-vie ($t_{1/2}$)

Le rapport d'expansion est un critère associé à la viscosité de la mousse et détermine la capacité de la mousse à se répartir dans l'enrobé. Par ailleurs, le temps de demi-vie est un critère pour la stabilité de la mousse et donne une idée de la vitesse à laquelle la mousse se contracte (voir section 1.5.4.1).

Dans le processus d'obtention de la mousse optimale, les valeurs $Ex = 8$ et $t_{1/2} = 6$ sont considérées comme étant des valeurs minimales acceptables (Asphalt Academy, 2009, Wirtgen, 2004). À la Figure 3.8, on peut voir comment, à partir des axes verticaux, on localise les valeurs de $Ex = 8$ et $t_{1/2} = 6$ ciblés. Ensuite, on intercepte les courbes de Ex et $t_{1/2}$ obtenues et on trouve la teneur en eau correspondante dans l'axe horizontal. L'exercice permet de cerner deux valeurs de teneur en eau et la teneur en eau optimale ($\%w_{opt}$) correspond à la moyenne de ces valeurs. Finalement, en considérant la valeur w_{opt} , on intercepte les courbes Ex et $t_{1/2}$ et on obtient les valeurs d'Ex et $t_{1/2}$ pour une température (T) donnée. De cette façon, on s'assure qu'on respecte les critères minimaux.

Par exemple, à la Figure 3.8 on voit que, à partir d'un (Ex) minimum acceptable de 8, l'intersection avec la courbe (Ex) correspond à une teneur en eau de 2,4 %. En même temps, avec un minimum acceptable de 6 pour le temps de demi-vie, l'intersection avec la courbe $t_{1/2}$, correspond à une teneur en eau de 3,9 % : la teneur en eau optimale correspond à la moyenne de ces valeurs, c'est-à-dire à 3,15 % pour le cas présent. À partir de cette valeur, on trace une ligne verticale jusqu'à intercepter les lignes de (Ex) et de $t_{1/2}$. Les points d'intersection obtenus ($Ex=15$ et $t_{1/2} = 12$) correspondent aux valeurs d'expansion et de temps de demi-vie de la mousse de bitume pour une température de malaxage donnée, ici, en l'occurrence, 170 °C.

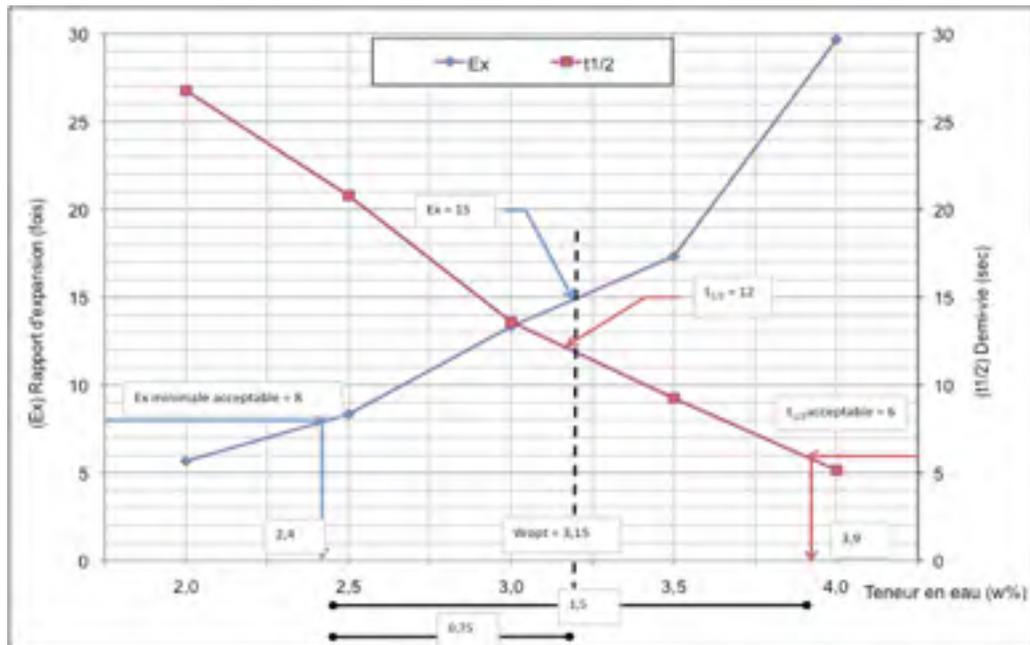


Figure 3.8 Détermination de la teneur en eau optimum pour moussage à 170 °C

Dans le cadre de ce projet de recherche, les valeurs de w_{opt} et de T_{opt} du bitume ont été retenues pour produire une mousse performante. Trois températures de malaxage ont été étudiées, soit : 160 °C, 170 °C et 180 °C. Le Tableau 3.6 présente les résultats obtenus pour ces trois températures de malaxage au moussage du bitume. Les résultats montrent que les trois températures satisfont les valeurs minimales ciblées ($Ex = 8$ et $t_{1/2} = 6$). Cependant, à une température de 170 °C, on obtient les valeurs plus hautes d'Ex et de $t_{1/2}$, ce qui fait optimiser les paramètres étudiés.

Tableau 3.6 Paramètres idéaux pour une mousse de bitume à une T° donnée

Propriété	TEMPERATURE (°C)		
	160	170	180
Ex (fois)	10,7	15,0	12,5
t _{1/2} (s)	9	12	7

3.2.2 Surface de Contraction (Sc) et indice de moussabilité (M_(T))

Tel que mentionné dans le Chapitre 1, section 1.5.4.3., Jenkins (2000) propose la détermination du *Foamed Index* (FI), comme indicateur de l'énergie de la mousse. Par ailleurs, le projet SCORE (2006) mentionne la détermination de l'indice de moussabilité (M_(T)) et signale la Surface de Contraction (Sc) comme l'aire sous la courbe Temps – Taux d'expansion (M. Cruz, 2006). Cela correspond en fait au FI proposé pour Jenkins (2000). Dans la présente étude, on a retenu l'appellation Sc.

On a calculé les valeurs de Sc et de M_(T) pour chaque température du bitume visée. La détermination du (Sc) a été faite par la méthode d'interpolation de trapèzes. À la Figure 3.9, on présente la courbe d'expansion d'une mousse obtenue à 170 °C. À cette Figure, la valeur de Sc correspond à 283,9, ce qui est en accord avec les valeurs minimales de Jenkins (2000), où une valeur désirable pour les ERF doit être au-dessus de 164.

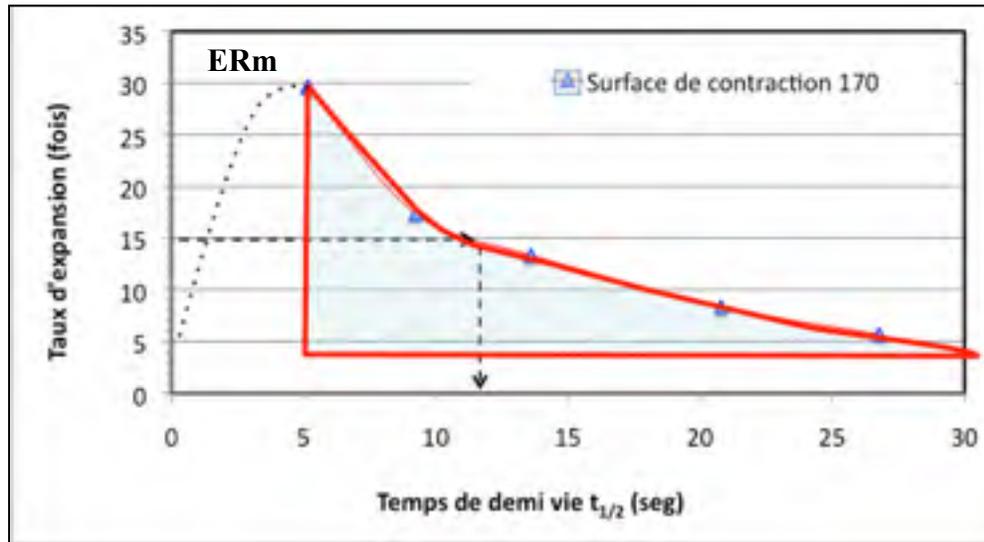


Figure 3.9 Courbe d'expansion de la MB à 170 °C

Par ailleurs, l'indice de moussabilité $M_{(T)}$ est le rapport entre le taux d'expansion maximale (Er_m) et la teneur en eau optimale (w_{opt}), donné par l'équation 3.2 :

$$M_{(T)} = \frac{Er_m}{w_{opt}} \quad (3.2)$$

Les résultats de l'ensemble des échantillons de mousse essayée à différentes températures dans le cadre de cette recherche sont présentés dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 Paramètres de la mousse bitume (MB) calculés pour différentes températures de bitume

Propriété	TEMPERATURE (°C)		
	160	170	180
Ex	10,7	15,0	12,5
$t_{1/2}$	9,0	12,0	7,0
Sc	72,2	283,9	81,4
$M_{(T)}$	4,1	9,4	5,5

Rappelons que les résultats présentés à la Figure 3.8 ont montré que les valeurs de E_{r_m} et w_{opt} étaient respectivement 29,7 et 3,15 pour une température de malaxage de 170 °C. Selon l'équation 3.2, la valeur de $M_{(T)}$ correspondante est donc de 9,4.

À la Figure 3.10, on présente les courbes de Sc et $M_{(T)}$ pour les températures retenues pour la détermination des valeurs optimales. On peut observer que pour les températures de 160 °C et 170 °C, les valeurs de Sc sont inférieures à la valeur de 164 tel que recommandée par Jenkins (2000), tandis qu'à 170 °C, la valeur de Sc est satisfaisante (284).

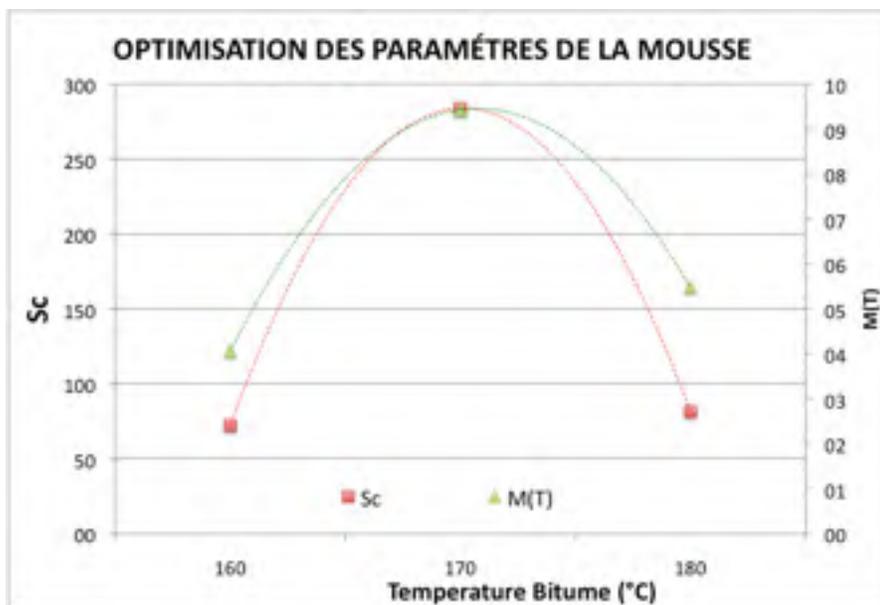


Figure 3.10 Évolution de paramètres Sc et $M(T)$ de la mousse bitume (MB) à différentes températures d'essai

Pour les deux courbes présentées à la Figure 3.10, on peut voir un sommet à 170 °C. Ceci confirme le choix de la teneur en eau optimale à 3,1 % et celui de la température optimale de malaxage à 170 °C.

3.3 Détermination du pourcentage de bitume optimal pour MR-5 MB

En prenant en considération essentiellement la température optimale déterminée précédemment, l'étape suivante de formulation consiste à déterminer le pourcentage de bitume optimal ($\%b_{opt}$) qu'on doit avoir pour la confection du MR-5 MB. Pour ce faire, la

teneur en eau de prémix pour l'enrobage n'a pas été prise en compte, car il s'agit d'un paramètre propre des ERF à l'émulsion.

Afin d'avoir un certain contrôle quant à l'humidité du GBR dès le début du processus, on a convenu de travailler avec des granulats secs, c'est-à-dire avec un % w = 0. Au sujet de l'identification de la dispersion du bitume dans le mélange (MR-5 MB), la méthode demeure empirique, car l'appréciation demeure essentiellement visuelle.

D'après la revue de littérature (voir Tableau 1.2), une teneur en eau optimale typique d'un GBR (*Optimum mixture Content* : OMC) est 4 % pour les GBR en chantier. Cela nous donne une valeur de référence à partir de laquelle nous pouvons calculer l'eau à ajouter dans le mélange. Or, une réduction de l'eau considérée comme optimale est nécessaire en raison des possibles variations d'humidité (Wirtgen, 2001). Les équations 3.3 et 3.4 montrent des relations empiriques pour déterminer l'eau d'ajout dans la confection d'un MR-5 MB.

$$\%W_{aj} = W_{OMC} - W_{GBR} - W_{reducc} \quad (3.3)$$

Où :

W_{aj} : pourcentage d'eau d'ajout

W_{OMC} : teneur en eau optimale du GBR (*Optimum mixture Content*)

W_{GBR} : teneur en eau du GBR mesurée

W_{reducc} : réduction de la teneur en eau associée à la variation d'OMC

En considérant la charte proposée pour Wirtgen (2001) (voir Annexe 1), la relation de l'équation 3.4 permet de calculer W_{reducc} .

$$W_{reducc} = (0,3 \times OMC) - 0,6 \quad (3.4)$$

Étant donné que pour notre recherche le GBR a été séché ($W_{GBR} = 0$), On a :

$$W_{aj} = 4 - 0 - [(0.3 \cdot 4) - 0.6]$$

$$W_{aj} = 3,4 \%$$

Cette valeur correspond à 85 % de W_{OMC} . Pour certains auteurs (voir Tableau 1.2), une teneur en eau d'ajout comprise entre 75 % et 85 % de W_{OMC} est une valeur acceptable.

3.3.1 Formulation d'après les résultats de stabilité Marshall

Comme décrit dans la section 2.2.1, on a préparé quatre éprouvettes pour chaque pourcentage de bitume d'ajout ciblé (2,4 %; 2,6 %; 2,8 % et 3,0 %) afin de déterminer le pourcentage de bitume optimal. Puisque le MR-5 contient 1,56 % de bitume et qu'on le considère totalement mobilisable, le bitume total est donc la somme du bitume du MR-5 plus le bitume d'ajout. Donc, le bitume total des briquettes Marshall pour les teneurs en bitume d'ajout ciblées est de 3,96 %, 4,16 %, 3,96 et 4,56 % respectivement. Le Tableau 3.8 montre l'ensemble des résultats de l'essai Marshall. Le détail des résultats est présenté à l'annexe I.

Tableau 3.8 Résultats Stabilité Marshall pour détermination du bitume optimale

		Stabilité Marshall							
État Sec	Éprouvette	2	4	3	5	2	4	1	3
	% bitume total	4,0		4,2		4,4		4,6	
	% bitume d'ajout	2,4		2,6		2,8		3,0	
	Hauteur de l'éprouvette (mm)	65,8	63,8	74,2	65,5	68,0	65,9	71,6	66,1
	Stabilité lue (kN)	44,2	39,7	34,7	41,2	45,6	44,4	46,9	43,2
	Stabilité corrigée (kN)	41,6	39,3	26,5	39,1	40,6	41,7	38,2	40,3
	Stabilité corrigée moyenne : S_{sec} (kN)	40,5		32,8		41,1		39,3	
	Fluage (mm)	2,0	1,6	2,7	2,8	2,0	2,7	2,7	2,0
	Fluage moyenne (mm)	1,8		2,8		2,4		2,4	
	Après trempage(4hres à 60C)	Éprouvette	3	5	2	4	3	5	2
Hauteur de l'éprouvette (mm)		63,07	74,04	62,61	62,78	67,88	68,55	62,58	65,52
Stabilité lue (N)		N/A	24,4	19,3	27,0	29,3	28,0	28,6	29,8
Stabilité corrigée (N) ⁽¹⁾		N/A	18,8	19,8	27,6	26,1	24,5	29,3	28,2
Stabilité corrigée moyenne : S_{sat} (kN)		18,8		23,7		25,3		28,8	
Écrasement (mm)		N/A	2	1,9	2,3	1,9	2,4	2,1	1,9
Fluage moyenne (mm)		2,0		2,1		2,2		2,0	
Perte de Stabilité (%) ⁽²⁾		54		28		38		27	
⁽¹⁾ Facteur de correction	1261,2 x hauteur moyenne éprouvette)-1,72								
⁽²⁾ Perte de S	= Perte de stabilité (%) = (Ssec moyen - Ssaturé moyen) / Ssec moyen								

La Figure 3.11 présente les caractéristiques physiques obtenues en fonction de la teneur en bitume du MR-5 MB. La courbe Figure 3.11a) montre la relation entre la stabilité Marshall et la teneur en bitume, et ce, pour les essais réalisés à l'état sec et ceux après trempage. La courbe de stabilité sèche présente un comportement plutôt stable sans beaucoup de variation malgré l'augmentation du pourcentage de bitume, tandis que la stabilité après trempage augmente légèrement.

Les courbes de la Figure 3.11b) associées à la d_{mb} et celles de la Figure 3.11 c) associées à la perte de stabilité, montrent des diminutions avec l'augmentation du pourcentage de bitume. À la courbe de la Figure 3.11d) associée au % de vides, on observe initialement, une augmentation et par la suite, le pourcentage se stabilise entre 12 % et 14 %. La courbe de la Figure 3.11e) montre les valeurs de fluage associées à la stabilité sèche et après trempage. On peut voir que le fluage à stabilité sèche est plus haut que les valeurs de fluage après

trempage. Finalement, les valeurs de la courbe f) présentent une augmentation avec le pourcentage de bitume total.

En définitive, les résultats montrent, d'une part, une différence de comportement entre la courbe à stabilité sèche et la courbe à stabilité après trempage. D'autre part, on peut voir une diminution de la valeur de S_{sec} avec un pourcentage de bitume total de 4,2 %, tandis que la valeur de S_{sat} est directement proportionnelle à la teneur en bitume. Par ailleurs, les valeurs de S_{sec} dépassent la valeur minimale de 8000 N demandée par la Norme LC 26-002. Exemption faite du mélange contenant 2,4% de bitume, les résultats montrent que les valeurs de perte de stabilité sont conformes.

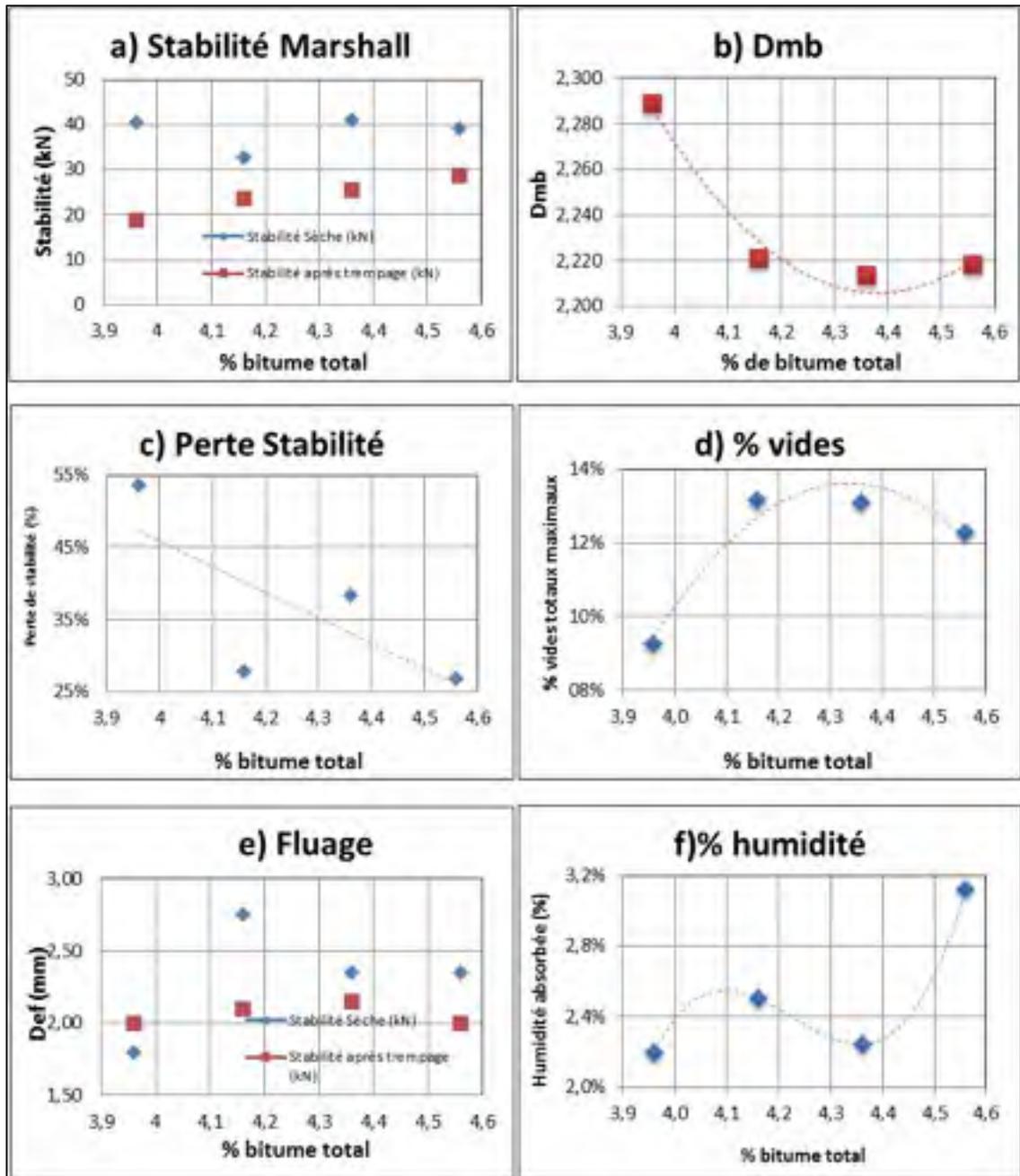


Figure 3.11 Diagrammes de caractéristiques physiques essai Marshall

Quoi qu'il en soit, les résultats obtenus ne montrent pas une tendance claire en raison du fait que les stabilités Marshall sont toutes sensiblement les mêmes et, d'autre part, les valeurs du fluage sont relativement proches. Également, la densité brute sèche (d_{mb}), le pourcentage de vides totaux maximaux et le pourcentage d'humidité absorbée présentent un comportement

atypique. Cependant, on peut dire que le sommet de la courbe de la Figure 3.11d) % vides est acceptable, car il s'agit d'une valeur correspondant aux ERF.

Compte tenu de la variation, le pourcentage de bitume optimal pourrait être entre 4,26 % et 4,56 %, ce qui correspond à la teneur en vides minimale et la stabilité sèche plus haute. Néanmoins, puisque la perte de stabilité augmente avec la teneur en bitume, il serait préférable de sélectionner la valeur plus bas, comme valeur optimale, soit : 4,26 %.

3.3.2 Formulation d'après résultats de résistance ITS

La formulation du MR-5 MB d'après Wirtgen (2004) et la norme LS-297 (MTO, 2004), suit le même principe que la formulation Marshall. Vu la variation dans les essais de stabilité Marshall précédents, on a décidé de changer la variation du pourcentage de bitume total pour obtenir des valeurs théoriques de 3,56 %, 4,06 %, 4,56 % et 5,06 %. Le tableau 3.9 et la Figure 3.12 montrent les résultats obtenus. Les tableaux généraux de résultats et les courbes correspondantes sont présentés dans l'Annexe I.

Tableau 3.9 Résultats ITS pour détermination de pourcentage de bitume optimal

		% bitume total	3,6	4,1	4,5	5,1
ITS (kPa)	sec	briquelette 1	647,0	591,3	687,0	578,3
		briquelette 2	560,5	604,2	708,1	502,1
		ITS_{sec}	603,7	597,7	697,6	540,2
	hum	briquelette 1	366,3	452,0	462,2	344,2
		briquelette 2	420,2	393,7	473,1	416,4
		ITS_{hum}	393,3	422,8	467,7	380,3
	$TSR = ITS_{sec}/ITS_{hum}$		0,7	0,7	0,7	0,8

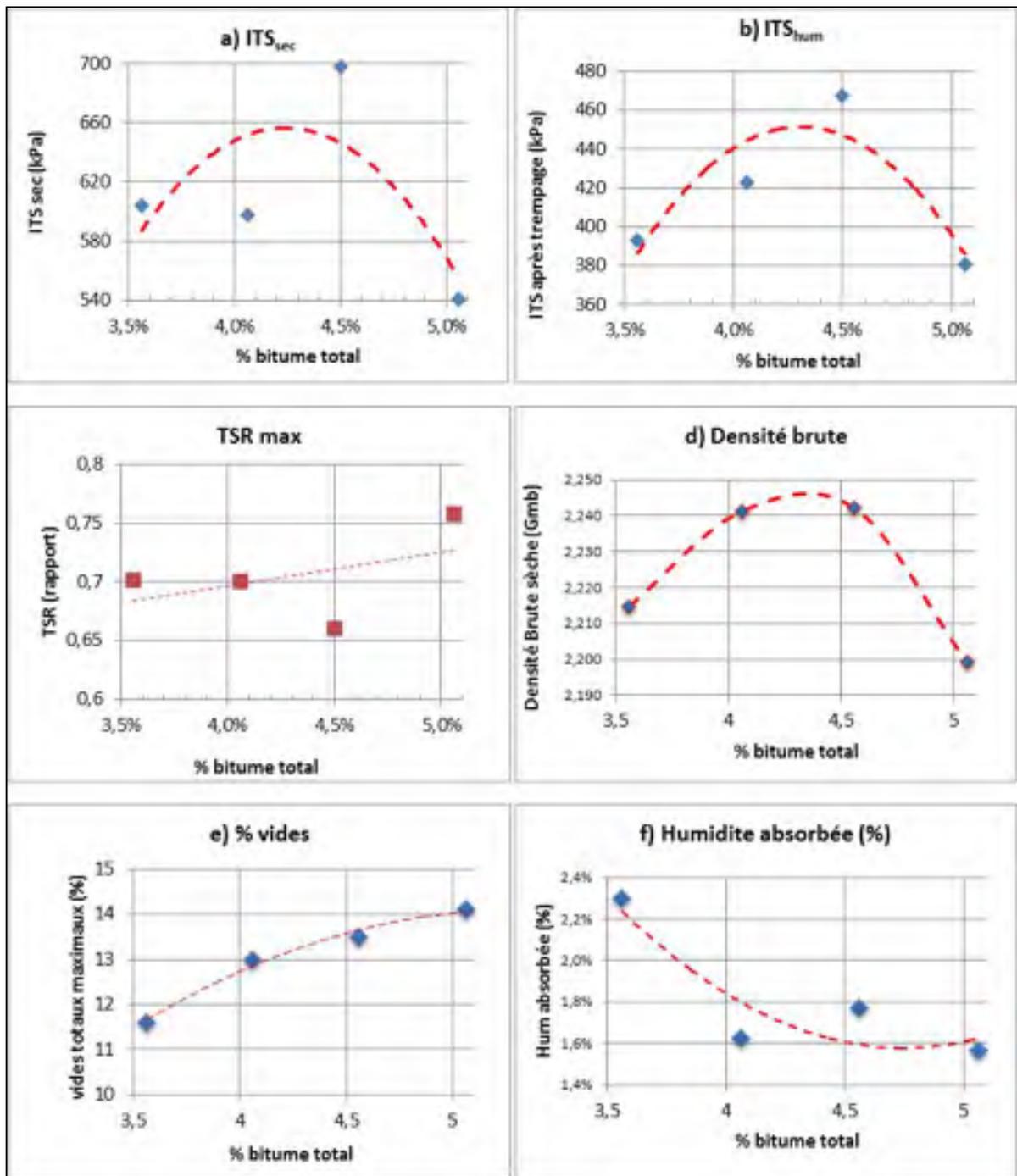


Figure 3.12 Diagrammes des caractéristiques physiques essais ITS

La Figure 3.12 montre le comportement général des courbes de certaines caractéristiques physiques à l'essai ITS. Celles-ci donnent une idée du pourcentage de bitume total à utiliser pour la confection du MR-5 MB.

Premièrement, la courbe de la Figure 3.12a) (ITS_{sec}) semble un peu irrégulière dû aux résultats du mélange contenant 3,6 % de bitume total. Après, il y a un sommet de la résistance ITS à 4,5 % de bitume total et finalement on tombe à nouveau avec un pourcentage de bitume total de 5,1 %. En traçant une courbe de tendance, le sommet se situe autour de 4,2 % de bitume total.

La courbe de la Figure 3.12b) (ITS_{hum}) la tendance est plus marquée et on atteint le sommet à 4,5 %. La courbe de la Figure 3.12c) (TSR) montre un rapport TSR compris entre 0,7 et 0,8. La courbe de la Figure 3.12d) associée à l'évolution de la densité brute (G_{br}), montre que la valeur maximale (2,246) est obtenue pour une teneur en bitume de 4,35 %.

Le pourcentage des vides totaux maximaux, présentés dans à la Figure 3.12e), se trouve entre 11 % et 14 %. Cela indique que la teneur en vides est directement proportionnelle à la teneur en bitume, contrairement aux enrobés à chaud.

Par ailleurs, les vides ne dépassent pas 15 % comme demandé pour la norme LC 26 - 002, de ce fait le MR-5 MB fabriqué pour les essais, ne devrait pas présenter de déformations permanentes (orniérage) excessives (MTQ, 2001).

Finalement, le pourcentage d'absorption diminue avec l'augmentation de la teneur en bitume. Des valeurs entre 1,4 % et 2,4 % ne sont pas excessives et on pourrait le considérer comme un essai conforme à la norme LC 26-002, paragraphe 9.2.1.4 note : 4.

D'après les figures, le pourcentage de bitume optimal serait de 4,3 %. Cependant, le manuel Wirtgen (2004) souligne que la valeur de pourcentage de bitume auquel on atteint une valeur d' ITS_{hum} maximale est souvent choisie comme la valeur optimale de bitume. Cela veut dire

que la valeur de 4,5 % de bitume optimale serait plus appropriée. Étant donné que le bitume résiduel présent dans le GBR est de 1,5 %, le bitume à ajouter dans le processus de production de la mousse correspond à un 3,0 %.

À la lumière des courbes des propriétés physiques obtenues de l'essai ITS, on constate un comportement plus cohérent que celui des courbes MARSHALL. C'est le cas de la perte de stabilité Marshall. On observe que la perte de stabilité est inversement proportionnelle à la teneur en bitume.

Simultanément, les valeurs de rapport TSR dans les essais ITS ont tendance à l'augmenter. De même, la courbe d_{mb} des essais ITS est plus cohérente que celle issue des essais Marshall où la valeur de d_{mb} diminuait avec l'augmentation de pourcentage de bitume.

Dorénavant, pour les essais de résistance, la formulation du MR-5 MB les valeurs et pourcentages correspondent, comme suit : 3,25 % d'eau à ajouter lors de la production de la mousse; 1,0 % de ciment à ajouter pour le MR-5; 1,5 % de teneur en bitume résiduel du GBR et 3 % de bitume à ajouter pour une teneur en bitume totale de 4,5 %.

Le Tableau 3.10 montre tous les paramètres considérés pour l'étude de variation de température.

Tableau 3.10 Paramètres de formulation pour ERF-MB dans la présente étude

POUR PRODUCTION DE MOUSSE	
BITUME	PG 58-28
PRESSION D'AIR	6 bar
PRESSION D'EAU	5 bar
PRESSION BITUME	8 bar
TEMPERATURE BITUME POUR MOUSSAGE (OPTIMALE)	170 °C
TENEUR EN EAU OPTIMALE POUR PRODUCTION DE MOUSSE	3,25 %
POUR PRODUCTION MR5-MB	
MATERIAU MR-5	50% GBR ST-ISIDORE 50 % MG-20, Biomix
TENEUR EN BITUME RÉSIDUEL du GBR	1,57 %
TENEUR EN EAU du GBR	4,00 % (échantillonné en centrale)
TENEUR EN BITUME AJOUTÉ	3,00 %
TENEUR EN BITUME TOTAL (OPTIMAL)	4,57 %
TENEUR EN FILLER AJOUTÉ (TYPE)	ciment Portland (1 %)
TENEUR EN EAU AJOUTÉE (MR-5)	3,25 %
POUR CONFECTION DES ÉPROUVETTES EN VUE DES ESSAIS DE RÉSISTANCE	
METHODE DE COMPACTION	MARTEAU MARSHALL (75 COUPS/FACE)
CONDITIONS DE CURE	0-15 min; 1 h; 3-6h; 24 h; 72 h; 7 jours et 14 jours pour chaque T ° d'essai, soit 0 °C; 5 °C; 10 °C et une température de référence de ±23,5 °C (ambiante)
CONDITION D'ESSAIS MARSHALL ET ITS (T°)	Température ambiante (±23,5 °C)
Humidité relative	57 % - 63%. (Dispositif de jauge électronique externe).
ÉCHANTILLONS	Deux éprouvettes pour chaque détermination

3.4 Résultats sur les éprouvettes soumises à des essais de résistance

Les éprouvettes soumises aux essais de résistance Marshall et ITS ont aussi été testées afin de mesurer leur humidité (teneur en eau). Parallèlement, on a déterminé la pente de la courbe force-déplacement de chaque éprouvette testée.

3.4.1 Teneur en eau des éprouvettes lors des essais de résistance mécanique

La teneur en eau est une variable très importante pour le comportement mécanique des ERF. D'une part, les conditions d'humidité favorisent la cohésion initiale du matériau. D'autre

part, le processus de cure est associé à un gain en résistance, spécialement dans les premières heures (jeune âge) de production des ERF. (Bowering, 1970; Jenkins et Moloto, 2008).

En conséquence, atteindre une humidité optimale permet de développer une cohésion initiale suffisante pour avoir un matériau à la fois résistant et maniable pendant le processus de mise en place. En conditions de laboratoire, nous avons vérifié les conditions d'humidité après compactage et après chaque essai réalisé.

Bien qu'on a réussi à déterminer la perte d'humidité dans la plupart des éprouvettes, il est probable que la procédure de compaction ait causé une certaine perte d'eau, parce que les papiers placés aux extrémités des moules absorbent de l'eau.

C'est pourquoi, dans cette étude, nous avons mesuré seulement la variation de la teneur en eau pendant le processus de cure et l'humidité à l'essai. La première correspond à la différence entre le poids de l'éprouvette une fois démoulé et le poids après le processus de cure ($\Delta W_{\text{cure}} \%$). La deuxième est prise, une fois que l'essai est achevé (Wes %).

Au démoulage, force est de constater que les bords de certains échantillons deviennent très fragiles et s'effritent facilement. Par conséquent, il n'a pas été possible de déterminer la perte d'humidité pour la totalité des éprouvettes, spécialement pour la première heure de cure. Les résultats de l'évolution de la teneur en eau des éprouvettes en fonction du temps de cure sont présentés à la Figure 3.13. Chaque point correspond à la moyenne de deux briquettes testées.

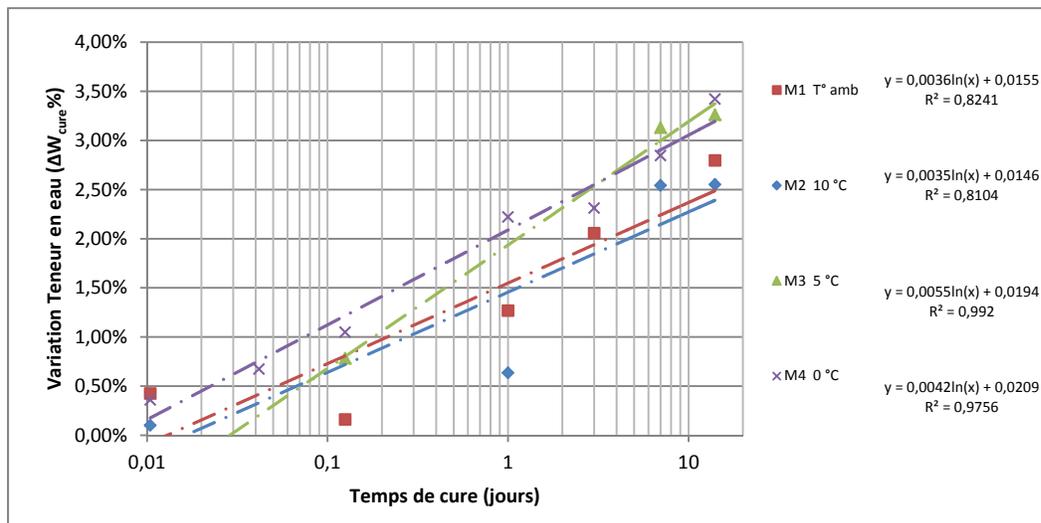


Figure 3.13 Variation des teneurs en eau (% Wc) en cours de cure à différentes températures

Les résultats montrent que pour les éprouvettes M1 (cure à T° ambiante) et M2 (cure à 10 °C), les teneurs en eau de compactage sont plus basses que celles des éprouvettes M3 (5 °C) et M4 (0 °C). Cela peut s'expliquer en partie au fait que pour les deux premiers mélanges, les éprouvettes ont été plus faciles à démouler, sans effritement, et ainsi la détermination des teneurs en eau pouvait être plus précise.

Pour les éprouvettes M3 et M4, les pertes de matériau ont été plus évidentes et les pertes de masse ont considérablement modifié les résultats de teneurs en eau. Cependant, le fait d'avoir toujours deux valeurs pour chaque température et chaque temps de cure a permis de développer les courbes de comportement cohérentes et avec tendances faciles à interpréter.

Par rapport à la variation de la teneur en eau pendant la cure, la Figure 3.14 montre comment les quatre courbes de tendance ont un comportement inversement proportionnel. Il faut remarquer la différence entre la pente de la courbe à 10 °C et à 0 °C.

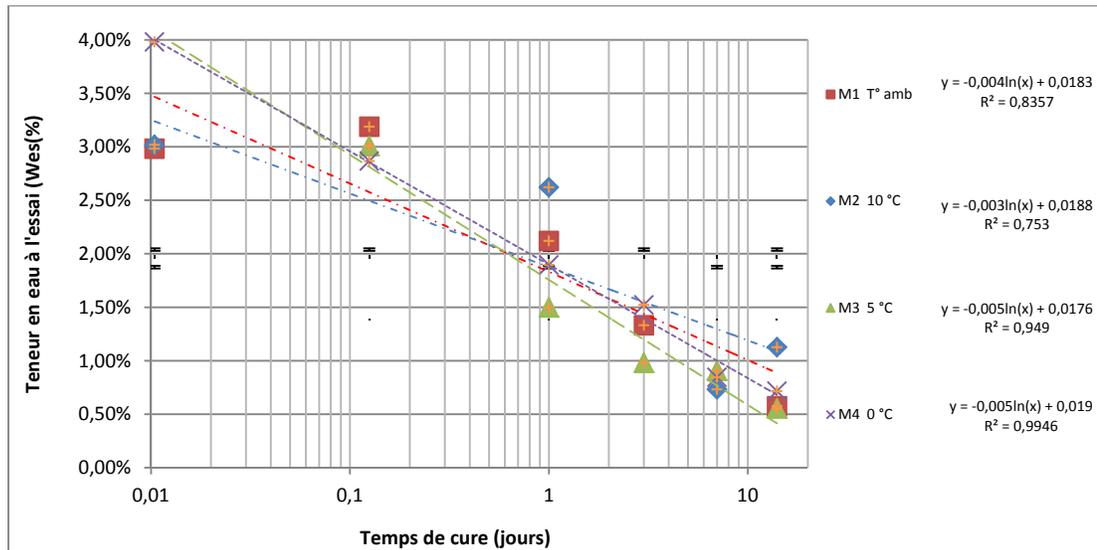


Figure 3.14 Teneur en eau des échantillons après les essais Marshall et ITS

Bien que les droites aient des pentes différentes, les courbes ont la même tendance de diminution de teneur en eau par rapport au temps exprimé en échelle logarithmique. On peut voir aussi qu'à 24 heures les courbes de tendance montrent une diminution de 50% d'humidité par rapport à la teneur en eau initiale de compaction qui oscillait entre 3,5 % et 4,0 %.

La variation de la teneur en eau dans le temps est à la hausse, cela veut dire qu'elle représente une perte d'humidité en cours de cure. Le comportement individuel de chaque courbe à chaque température est montré dans l'annexe II.

3.4.2 Courbes Force-Déplacement dans les essais de résistance mécanique

Comme décrits dans le chapitre 1, les deux essais de caractérisation mécanique effectués sont la stabilité Marshall et la traction indirecte (ITS). La stabilité Marshall est une mesure de résistance à la déformation d'un enrobé. Nous avons obtenu des valeurs de résistance à la température ambiante pour chaque mélange à la température de cure établie et à chaque intervalle de temps prédéterminé.

Pour assurer la validité des résultats, on a testé deux éprouvettes pour chaque température de cure ciblée. Dans la plupart des cas, les valeurs mesurées des deux éprouvettes sont relativement similaires. Pour l'analyse des résultats, la valeur moyenne est retenue. Dans certains cas, on référera cependant au résultat d'une seule éprouvette.

Pendant cette étude, les variables analysées sont la stabilité Marshall et la résistance ITS, obtenues lors des essais de résistance Marshall et de traction indirecte, respectivement. Pour ce faire, on a analysé le comportement individuel de chaque courbe force-déplacement, avant l'écrasement de chaque éprouvette. Cela permettra de trouver des patrons de comportement ou des valeurs comparables entre les résultats des essais Marshall et ITS.

L'interprétation des résultats est basée sur le calcul des indices de Fracture (IF) et de Ductilité (ID), décrits dans la section 1.6.3. De même, la pente de chaque courbe Force-Déplacement a été déterminée et désignée « pseudo-module ».

3.4.3 Pente de la courbe force-déplacement (pseudo-module)

Bien que la pente de la courbe force-déplacement ne corresponde pas, du point de vue de la résistance des matériaux, à un module, il s'agit d'une valeur qui sert à quantifier la raideur du matériau.

On a déterminé la pente de chaque courbe en utilisant l'outil Excel en considérant une régression linéaire. La Figure 3.15, montre des courbes typiques de la relation force-déplacement pour le cas de deux éprouvettes curées à température ambiante. Elle montre que les deux courbes peuvent être considérées équivalentes et valident les valeurs de résistance utilisées. La pente des courbes est de 3,78 pour l'éprouvette 1 et de 3,68 pour l'éprouvette 2 et les coefficients de corrélation sont 93 % et 96 % respectivement.

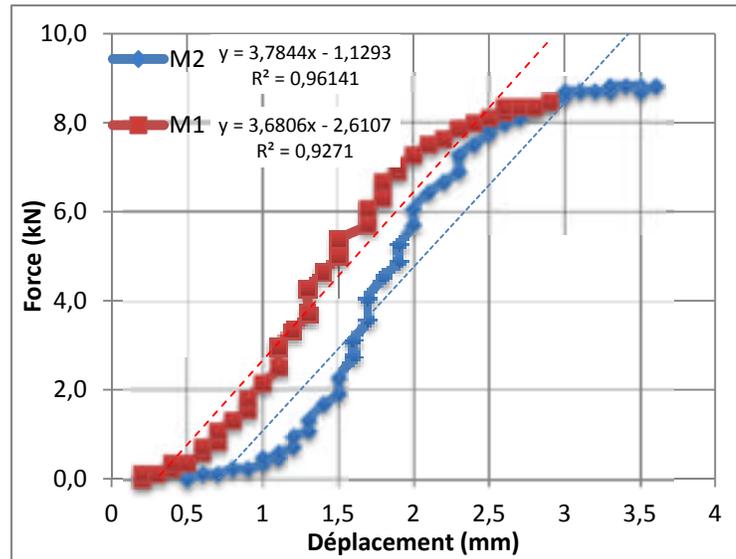


Figure 3.15 Exemple, calcul de pente (module) pour une courbe type Stabilité Vs Déplacement dans un échantillon Marshall

3.4.4 Aire sous la courbe force-déplacement

À la section 2.6.3, on avait mentionné que l'aire sous la courbe force-déplacement correspond à l'indice de Fracture (IF). L'indice de fracture des mélanges M1 et M2 montrés à la Figure 3.16 a été calculé pour la méthode des trapézoïdes. Les valeurs respectives sont de 12,8 pour l'éprouvette 1 et 15,5 pour l'éprouvette 2.

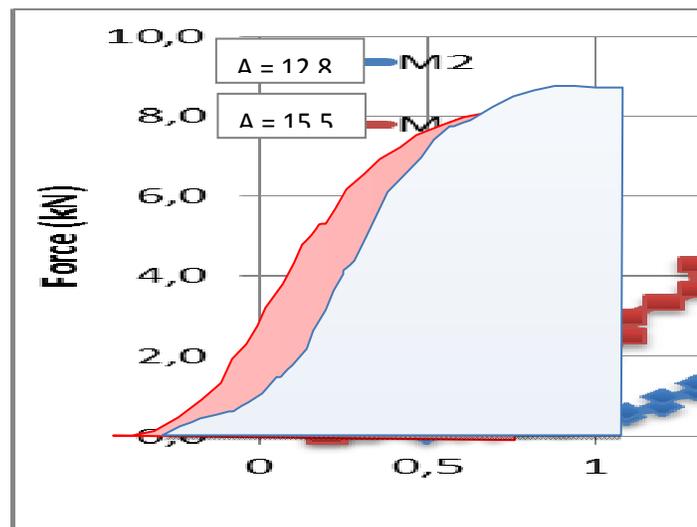


Figure 3.16 Aire sous la courbe force déplacement déterminé pour les mélanges M1 et M2

3.4.5 Résultats stabilité Marshall vs ITS

Dans cette section, on présente l'évolution de la résistance mesurée pour chacune des essais mécaniques (Marshall et ITS) réalisés. Les résultats sont présentés en échelle semi-logarithmique. Pour faciliter l'analyse, une relation linéaire entre les relations des différents facteurs présentés a été considérée pour les deux méthodes d'essai réalisées (Marshall et ITS).

Les résultats des deux méthodes d'essai retenues pour cette recherche (Marshall et ITS) seront présentés parallèlement dans les sections suivantes, ce qui permettra de comparer plus efficacement les deux types d'essais effectués.

3.4.5.1 Résultats stabilité Marshall et ITS à la température ambiante 23 °C

La Figure 3.17 présente les résistances mesurées suivant une cure à température ambiante pour les deux méthodes d'essais réalisées (Marshall et ITS). On constate que la résistance augmente avec le temps de cure autant pour l'essai Marshall que pour l'essai ITS. Cela nous permet de confirmer qu'effectivement, il y a un gain de résistance dans les premiers jours de cure. Par ailleurs, on observe que pour les 72 premières heures, une grande part de la résistance se développe, soit 88 % pour l'ITS et 87 % pour Marshall. Ce pourcentage est calculé par rapport à la résistance maximale atteinte à 14 jours.

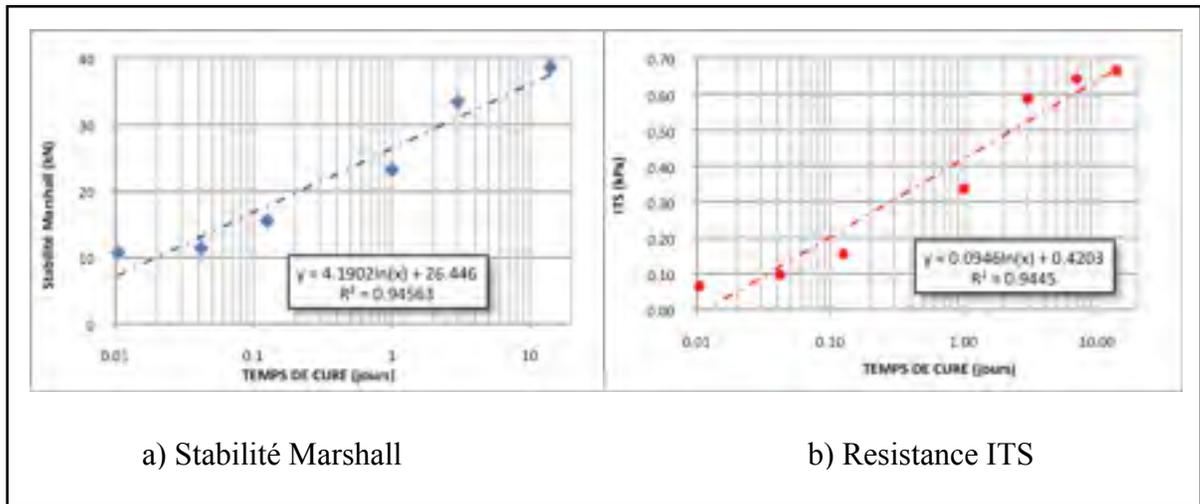


Figure 3.17 Graphiques de l'évolution de la résistance Marshall et ITS à température ambiante

3.4.5.2 Résultats stabilité Marshall et ITS à 10 °C

La Figure 3.18 présente les résistances mesurées sur les éprouvettes fabriquées et curées à 10 °C pour l'essai Marshall et l'essai ITS. Ces éprouvettes étaient très fragiles et s'effritaient facilement à la mise en œuvre. C'est la raison pour laquelle il y a des courbes qui ont été tracées à partir de moins de points de mesures. La Figure 3.18, montre que pour ces conditions, la résistance augmente aussi avec le temps de cure.

Par les deux méthodes d'essai, la résistance maximale est atteinte à sept jours. Cependant, au bout de 72 heures, la courbe de tendance montre qu'on a atteint 87 % de la résistance à 14 jours pour l'essai Marshall et 81 % pour l'essai ITS.

Pour les essais à 10 °C, on observe une chute de la résistance à 14 jours pour les deux méthodes d'essai. Ceci pourrait être dû au fait que le temps de reconditionnement des éprouvettes à la température de la pièce, avant de procéder aux essais, ait été probablement moins long que requis (moins de trois heures). Cependant, la courbe de tendance est ascendante jusqu'aux 7 jours.

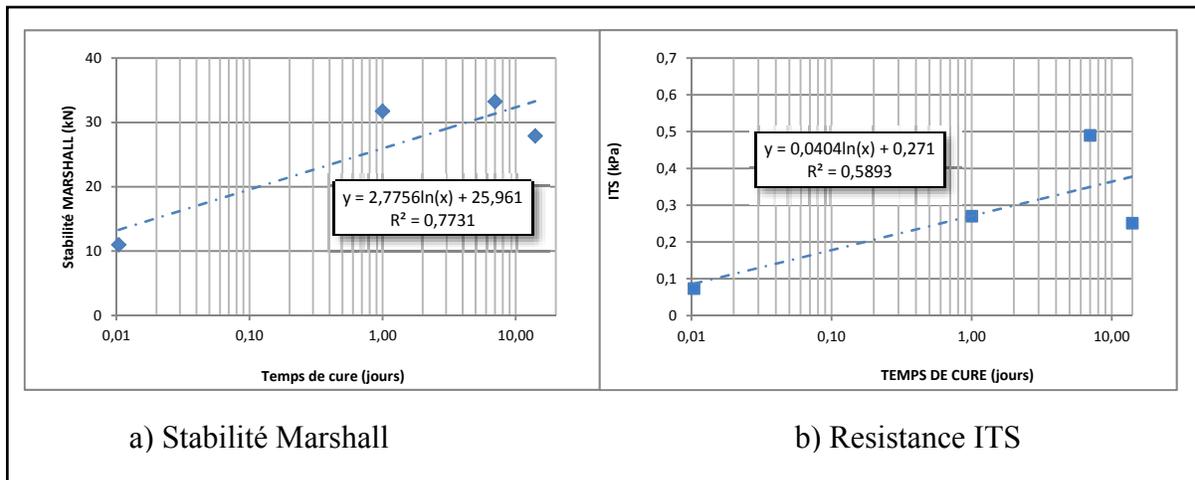


Figure 3.18 Graphiques de l'évolution de la résistance Marshall et ITS à 10 °C

3.4.5.3 Résultats stabilité Marshall et ITS à 5 °C

La Figure 3.19 présente les résistances mesurées sur les éprouvettes fabriquées et curées à 5 °C pour l'essai Marshall et l'essai ITS. Les résultats montrent un comportement similaire quant à la tendance à l'augmentation de la résistance avec le temps de cure. Cependant, à sept jours, les résultats pour les deux essais sont différents.

En effet, pour l'essai ITS, la résistance continue à monter jusqu'à 14 jours, tandis que pour l'essai Marshall la résistance descend. En considérant une évolution linéaire, à 72 heures, on atteint une résistance correspondante à 85 % de la résistance maximale Marshall à 14 jours et 69 % de la résistance maximale ITS à 14 jours.

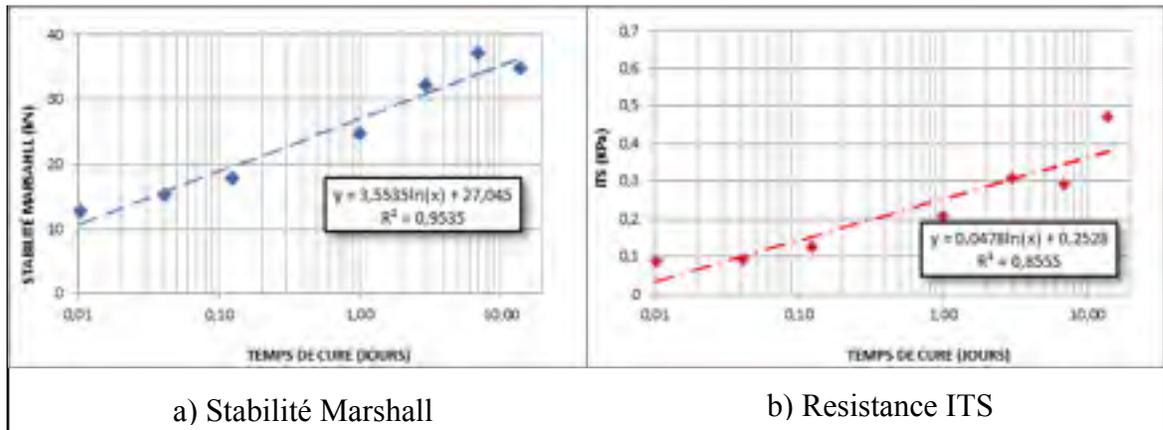


Figure 3.19 Graphiques de l'évolution de la résistance Marshall et ITS à 5 °C

3.4.5.4 Résultats stabilité Marshall et ITS à 0 °C

La Figure 3.20 présente les résistances mesurées sur les éprouvettes fabriquées et curées à 0 °C pour l'essai Marshall et l'essai ITS. La courbe Marshall atteint son maximum à 72 heures (voir Figure 3.20a)) alors que l'essai ITS a pris son maximum à sept jours (voir Figure 3.20 b)). Cependant, les valeurs de résistance à 7 et 14 jours pour Marshall et à 14 jours pour ITS sont voisines.

Dans les deux cas, les droites de régression montrent que les valeurs de la résistance vont en augmentation avec le temps de cure. Suivant les droites de régression établies, au cours des premières 72 h, on atteint une résistance correspondante à 85 % de la résistance à 14 jours pour l'essai Marshall et de 82 % pour l'essai ITS.

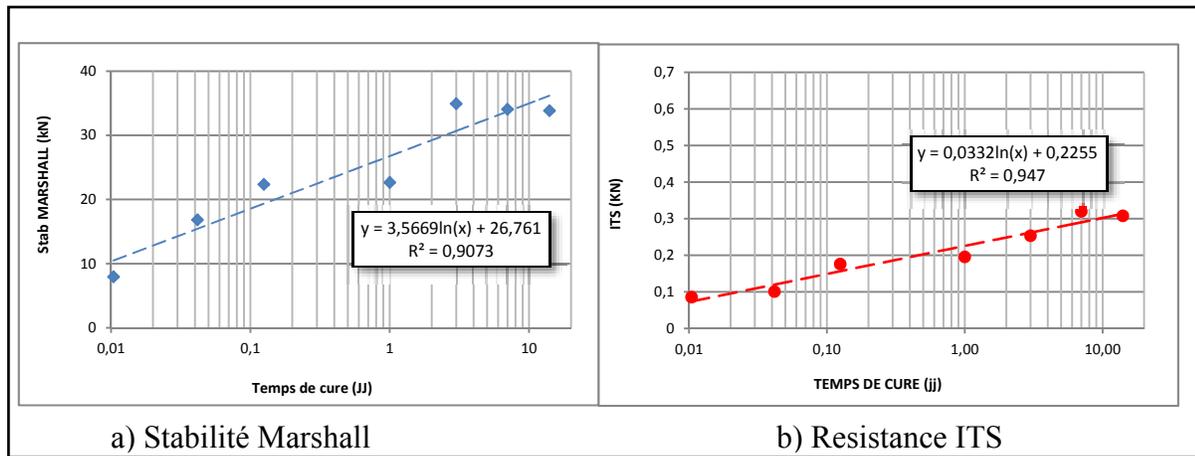


Figure 3.20 Graphiques de l'évolution de la résistance Marshall et ITS à 0 °C

3.5 Sommaire des résultats

En définitive, pour les quatre températures de cure et les sept temps de cure considérés, on a remarqué une tendance à la hausse de la résistance avec le temps de cure et ce, pour les deux méthodes d'essai réalisées (Marshall et ITS). Cela permet d'affirmer que les deux méthodes sont relativement équivalentes du point de vue de l'évaluation de la résistance. Dans l'analyse de données, on approfondira sur le comportement des courbes et sur les valeurs de chacune des variables associées.

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans le présent chapitre, on analysera les résultats obtenus des essais de résistances mécaniques réalisées sur les éprouvettes soumises à quatre différentes températures de cure (0 °C, 5 °C, 10 °C et 23 °C) et mûries suivant sept périodes prédéterminés (0-15 min, 1h, 3h, 24h, 72h, 7 jours et 14 jours).

Dans un premier temps, les résultats seront analysés de façon globale afin de décrire le comportement général. Dans un deuxième temps, les résultats sont comparés entre eux afin d'identifier les différentes tendances.

Pour l'analyse des résultats, les indices de fracture, de ductilité et la valeur de pseudomodule seront exploités. Finalement, on sera en mesure de formuler des conclusions et recommandations par rapport aux enrobés recyclés à froid ERF, particulièrement aux matériaux recyclés de type 5 traités à la mousse de bitume MR-5 MB.

4.1 Évolution des courbes de résistance en fonction du temps de cure

Initialement, les résultats de la résistance maximale obtenue pour chaque essai réalisé sont présentés. Ensuite l'évolution des courbes des paramètres associées sera discutée.

4.1.1 Évolution des résistances d'après la méthode Marshall

Les valeurs de résistance mécanique obtenues par la méthode Marshall sont montrées dans la Figure 4.1. Chaque point représente la moyenne de deux briquettes. Les quatre courbes présentent une tendance à la hausse. On peut observer qu'après 72 heures de cure, le

comportement semble se stabiliser. Cependant, à 14 jours les résistances pour les essais réalisés à 0°C, 5 °C et 10 °C présentent une baisse.

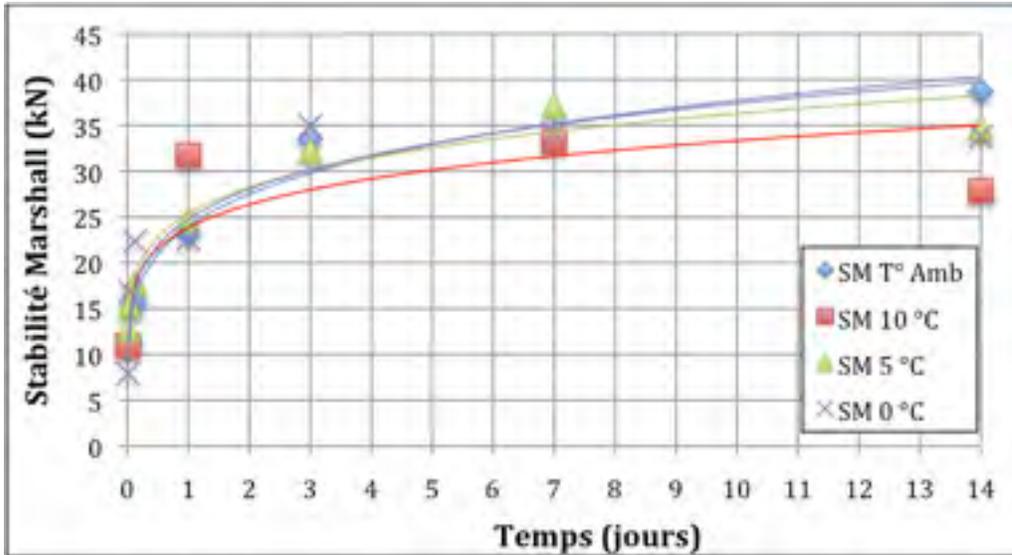


Figure 4.1 Ensemble des courbes de résistance Marshall. Échelle arithmétique

La Figure 4.1 montre l'évolution des courbes suivant une échelle arithmétique avec courbe de tendance de type puissance. Les valeurs de l'indice de corrélation (R^2) sont acceptables et on remarque, de façon générale, que les points se retrouvent relativement dans une seule plage de données.

Les résultats de la Figure 4.2 ont été tracés suivant une échelle semi-logarithmique. Cette façon de faire permet une comparaison plus simple entre les résultats en assumant en première approximation une relation linéaire entre les résultats.

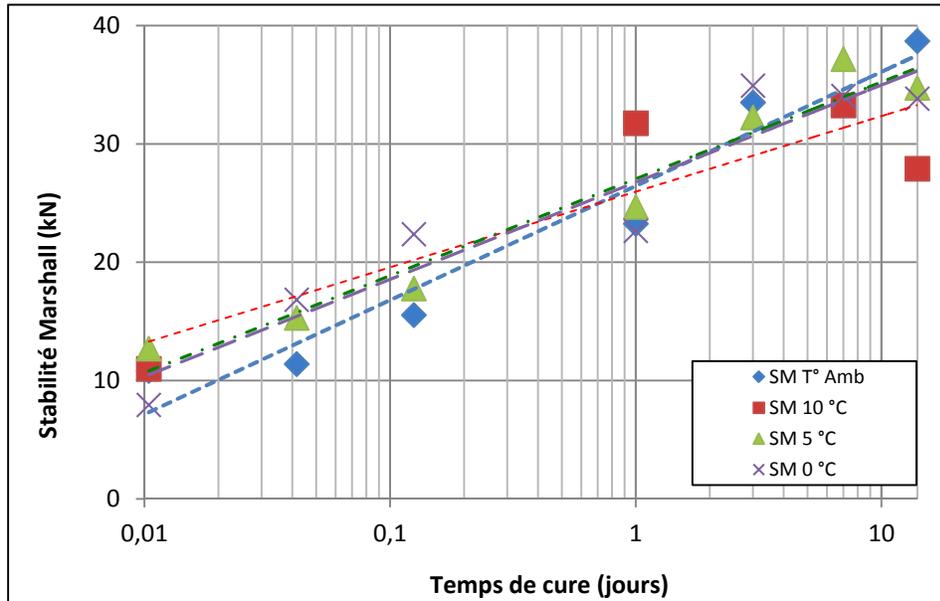


Figure 4.2 Ensemble des courbes de résistance obtenues avec la méthode d'essai Marshall

Le Tableau 4.1 montre les valeurs représentatives des droites de régression obtenues pour les différentes températures de cure étudiées.

Tableau 4.1 Valeurs représentatives des droites de régression de a Figure 4.2 pour les différentes températures de cure étudiées

T (°C)	Équation courbe de tendance de l'ensemble de données (Fig. 4.2)	pente	R ²	Stabilité Marshall (kN)	
				0- 15 min	maximale
0	$y=3,5669\ln(x)+26,761$	3,6	0,91	7,9	34,0
5	$y=3,5535\ln(x)+27,045$	3,6	0,95	12,7	37,2
10	$y=2,7756\ln(x)+25,961$	2,8	0,77	11,0	33,3
23	$y=4,1902\ln(x)+26,446$	4,2	0,95	10,8	38,7

À noter que pour les deux échelles de représentation retenues (arithmétique – Fig. 4.1 et semi-logarithmique - Fig 4.2), les résultats présentent une certaine homogénéité dans

l'ensemble. La variation des valeurs n'est pas très marquée et on pourrait tracer une courbe pour l'ensemble de données afin de déterminer une corrélation représentative entre la résistance Marshall et le temps de cure, indépendamment de la température de cure des éprouvettes. La Figure 4.3 montre la droite de régression obtenue en considérant l'ensemble des résultats, toutes températures de cure confondues.

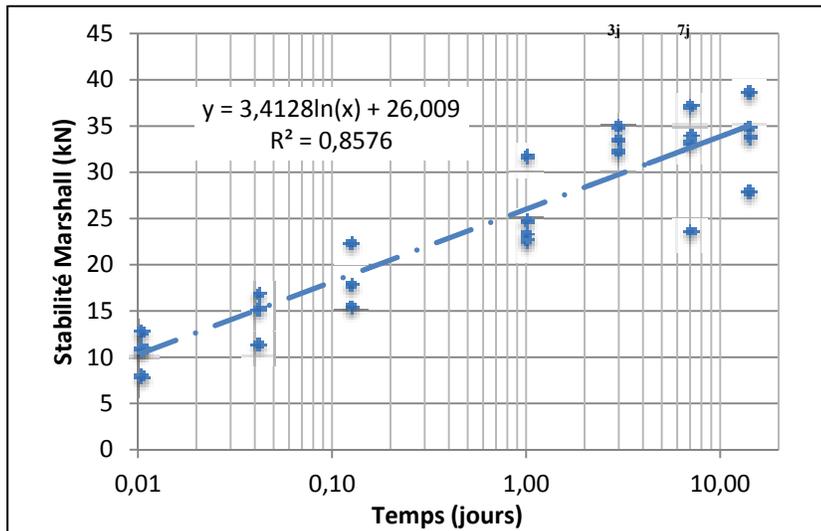


Figure 4.3 Corrélation de l'ensemble des valeurs de résistance Marshall

La droite de régression tracée à la Figure 4.3 montre un coefficient de corrélation de 0,86. Ce résultat porte à croire que les valeurs de résistance Marshall, pour chaque température de cure évaluée, évoluent de manière semblable au cours des trois premiers jours de cure.

Après ce temps, le comportement se différencie nettement suivant la température de cure étudiée. Quoi qu'il en soit, indépendamment de la température de cure, il y a une évolution de la résistance en fonction de la cure des éprouvettes.

4.1.2 Évolution des résistances d'après la méthode ITS

Les courbes de comportement de la résistance ITS sont montrées en échelle arithmétique à la Figure 4.4 et en échelle semi-logarithmique à la Figure 4.5.

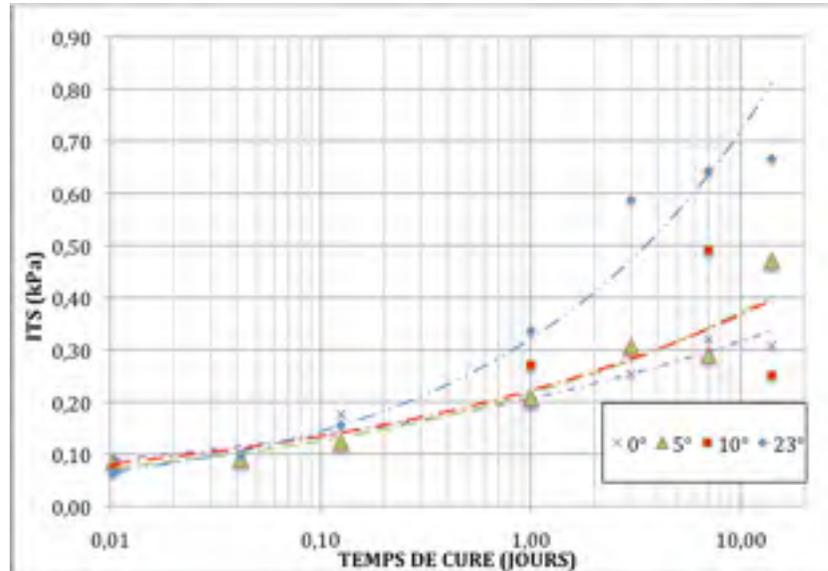


Figure 4.4 Courbes de résistance ITS à différentes températures de cure

Pour les résistances mesurées à partir de l'essai ITS, on remarque aussi une tendance à la hausse, et ce, dans les deux types d'échelle. Il est intéressant de constater que la courbe de l'évolution de la résistance des éprouvettes curées à température ambiante est au-dessus de celles associées aux autres températures de cure étudiées.

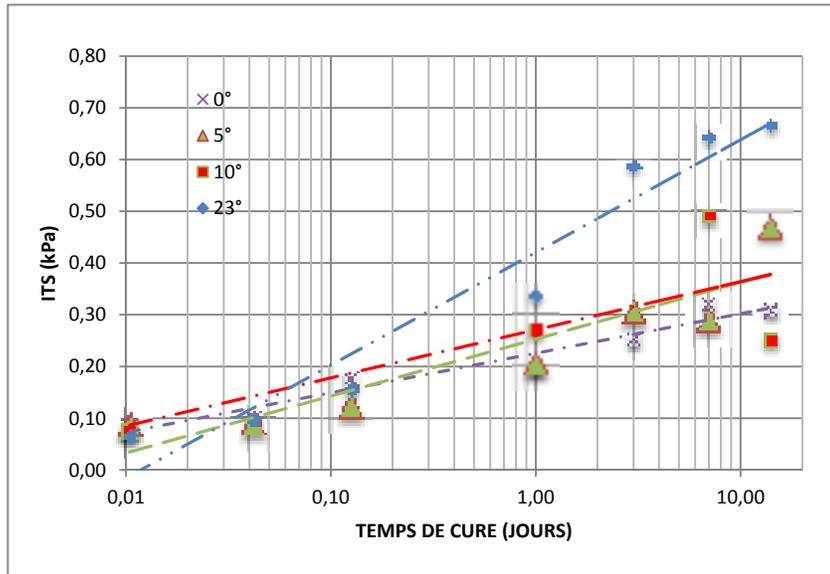


Figure 4.5 Ensemble des courbes pour la méthode d'essai ITS

Pour les deux Figures 4.4 et 4.5, on peut constater une évolution de la résistance en deux phases, soit : 1) entre le temps de cure $t=0$ et les premières 72 heures de cure et 2) entre 72 heures et 14 jours de cure.

Pour mettre en perspective les différences entre les différents résultats, une relation linéaire est associée aux résultats présentés à la Figure 4.5. Le Tableau 4.2 présente les valeurs représentatives des droites de régression de la Figure 4.5. Les pentes des droites de régression pour les températures de cure de 0 °C, 5 °C et 10 °C sont nettement plus douces que celle de la droite de régression obtenue pour les résistances ITS testées à température ambiante. Cela montre que les éprouvettes curées à température ambiante ont un développement de résistance plus efficace par rapport à celles curées à plus basse température. Bien que les valeurs de pente ne semblent pas assez significatives, on peut noter qu'à température ambiante la pente est trois fois celle de la pente à 0 °C. Par ailleurs, le coefficient R^2 est acceptable autour de 90 %.

Tableau 4.2 Valeurs représentatives des courbes de tendance (Fig. 4.5)

T (°C)	Équation courbe de tendance de l'ensemble de données (Fig. 4.5)	Pente	R ²	Résistance ITS (kPa)	
				0- 15 min	maximale
0	$y = 0,0332\ln(x) + 0,2255$	0,03	0,95	0,09	0,32
5	$y = 0,0478\ln(x) + 0,2528$	0,05	0,86	0,09	0,47
10	$y = 0,0404\ln(x) + 0,271$	0,04	0,59	0,07	0,49
23	$y = 0,0946\ln(x) + 0,4203$	0,09	0,95	0,06	0,67

Finalement, en traçant une ligne de corrélation en considérant l'ensemble de données obtenues à l'essai ITS et ce, indépendamment de la température, on note que la dispersion des résultats par rapport à la droite de régression obtenue est nettement plus évidente, spécialement après un jour de cure (Figure 4.6). On peut voir que la valeur de R² est juste 0,63, ce qui ne semble pas être très représentatif. On remarque aussi qu'après les premiers 24 h de cure, les valeurs de résistance se présentent de façon plus asymétrique.

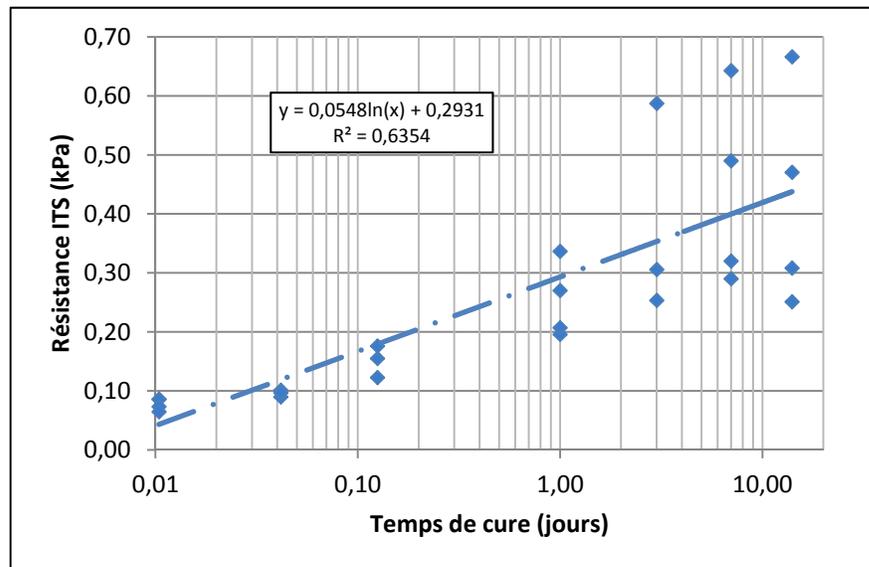


Figure 4.6 Corrélation des données de résistance ITS

4.2 Comparaison de l'évolution des courbes de résistance

Dans la section précédente, les courbes de résistance obtenues lors des essais de résistance mécanique ont été présentées en considérant le temps et la température de cure. Il a été montré que la résistance augmente progressivement avec le temps de cure. Le Tableau 4.3 montre l'ensemble des résultats obtenus pour chaque type d'essai de résistance réalisée.

Tableau 4.3 Valeurs de résistance mécanique pour méthode d'essai et température de cure

ESSAI	T °C	TEMPS DE CURE (jours)							résistance maximale
		0- 15 min	1h	3h	1 j	3 j	7 j	14 j	
Stabilité MARSHALL (kN)	0	7,9	16,8	22,4	22,6	34,9	34,0	33,8	34,0
	5	12,7	15,3	17,8	24,7	32,2	37,2	34,7	37,2
	10	11,0	n.d.	n.d.	31,8		33,3	27,9	33,3
	23	10,8	11,4	15,5	23,3	33,5	23,7	38,7	38,7
ITS (kPa)	0	0,09	0,10	0,18	0,20	0,25	0,32	0,31	0,32
	5	0,09	0,09	0,12	0,21	0,31	0,29	0,47	0,47
	10	0,07	n.d.	n.d.	0,27		0,49	0,25	0,49
	23	0,06	0,10	0,15	0,34	0,59	0,64	0,67	0,67

Pour faciliter l'interprétation et la comparaison des résultats suivant le temps de cure, mais également entre les deux méthodes de mesure retenues dans le cadre de ce programme expérimental (Marshall et ITS), des valeurs représentatives pour chacune des températures de cure étudiées ont été déduites suivant des résistances cibles (25% et 75% de la résistance maximale) en considérant une relation linéaire entre la résistance et le logarithme du temps de cure.

Le Tableau 4.4 présente les valeurs du temps de cure pour atteindre les 25% et le 75% de la résistance maximale obtenue lors des essais de résistance. Ces valeurs ont été calculées avec les modèles des équations des courbes de tendance obtenues et présentées au Tableau 4.1 pour l'essai Marshall et au Tableau 4.3 pour l'essai ITS.

Tableau 4.4 Valeurs de résistances représentatives

ESSAI	T °C	R _{max}	tR _{max} (j)	25% R _{max}	t25% R _{max}	75% R _{max}	t75% R _{max}	ΔR (R _{max} - R _{15min})	% ΔR f (T°amb)
Stabilité MARSHA LL	0	34,0	7	8,5 kN	9 min	25,5	17 h	25,9	93%
	5	37,2	7	8,7 kN	10 min	27,9	30 h	22,0	79%
	10	33,3	7	8,3 kN	3 min	24,9	17 h	22,3	80%
	23	38,7	14	9,7 kN	26 min	29,0	44 h	27,9	100%
ITS	0	0,32	7	0,1 kPa	18 min	0,2	37 h	0,2	37%
	5	0,47	14	0,1 kPa	85 min	0,4	8 jours	0,4	64%
	10	0,49	7	0,1 kPa	46 min	0,4	44 h	0,4	69%
	23	0,67	14	0,2 kPa	100 min	0,5	57	0,6	100%
R_{15 min}		= Résistance mesurée sur les éprouvettes après 15 min de fabrication							
R_{max}		= Résistance maximale à 14 jours de cure							
tR_{max}		= temps pour atteindre la résistance maximale							
25%R_{max}		= 25 % de la résistance maximale							
t25%R_{max}		= temps pour atteindre le 25 % de la résistance maximale							
75%R_{max}		= 75% de la résistance maximale							
t75% R_{max}		= temps pour atteindre le 75 % de la résistance maximale							
ΔR		= Augmentation de la résistance pendant la période de cure mesurée à 15 min de fabrication et à 14 jours de cure							
%ΔR		= Le rapport de l'augmentation de la résistance pour une température de cure donnée à celle associée à la température ambiante exprimée en pourcentage							

Dans le Tableau 4.4, on peut voir comment pour les essais ITS, l'augmentation de la résistance des éprouvettes curées à 0 °C, n'est que de 37 % de celle qu'on obtient à la température ambiante. Pour l'essai Marshall, ce pourcentage correspond à 93 %. Ce constat met en relief la précarité quant à l'interprétation des valeurs Marshall.

À l'aide d'histogrammes, il est possible de faire un suivi de l'évolution de la résistance entre un temps de cure $t=0$ et le temps auquel on a atteint la résistance maximale pour les deux méthodes d'essai Marshall et ITS. La Figure 4.7 présente les valeurs de % ΔR pour chaque essai.

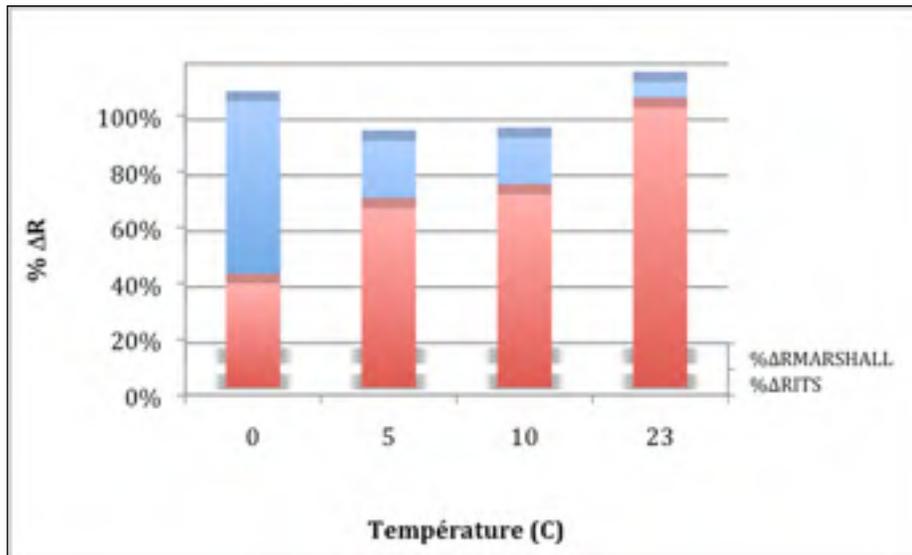


Figure 4.7 Évolution de la résistance pour les deux méthodes d'essai réalisées

La Figure 4.7 montre clairement que le taux d'augmentation de la résistance est progressif pour les essais ITS alors qu'il demeure relativement constant pour les essais Marshall.

En prenant les équations du modèle de courbe de tendance des Tableaux 4.1 et 4.2, on peut calculer par interpolation, le temps auquel on atteint le 25% et le 75% de la résistance maximale pour la période de cure étudiée. La Figure 4.8 montre le temps auquel on atteint le 25% de la résistance pour chaque essai. De même, la Figure 4.9 montre le temps calcul pour atteindre 75% de la résistance.

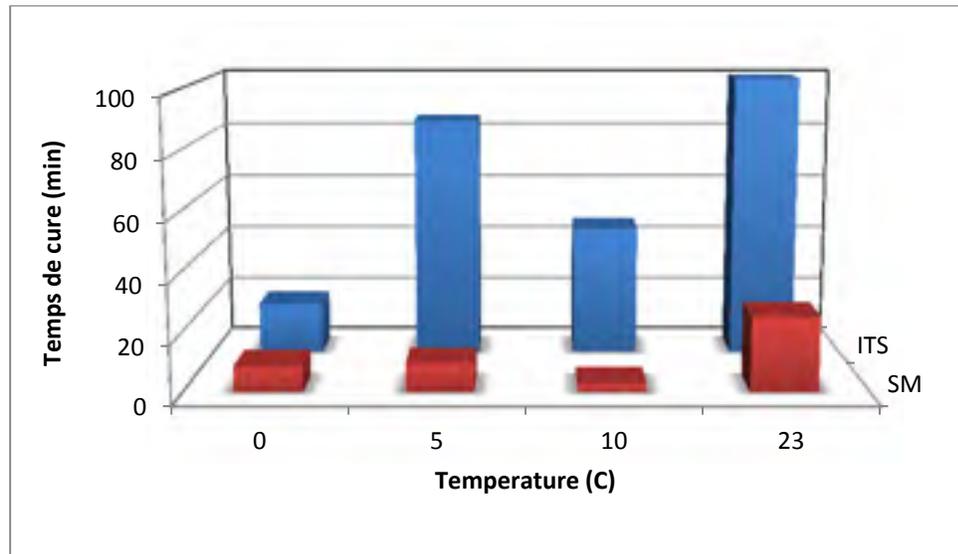


Figure 4.8 Temps pour atteindre le 25% de la résistance maximale pour méthode d'essai

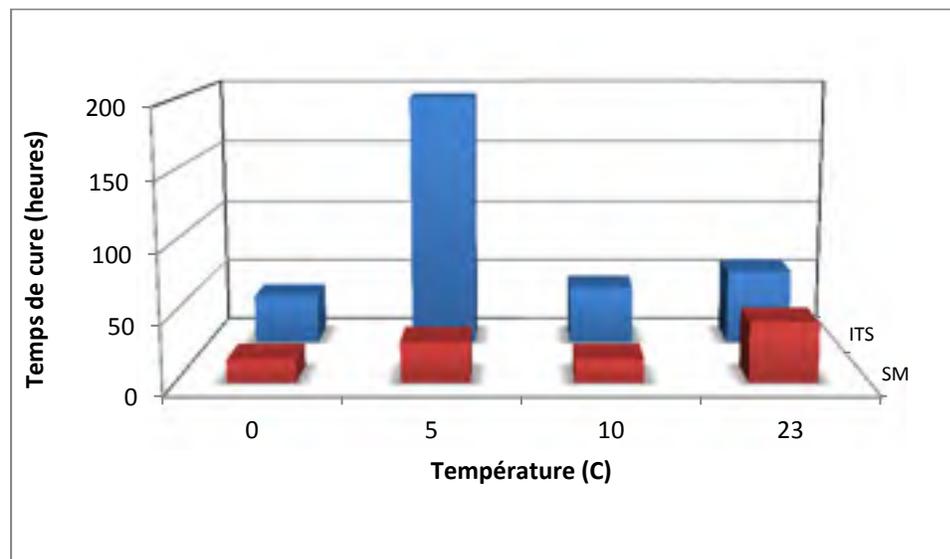


Figure 4.9 Temps pour atteindre le 75% de la résistance pour les deux méthodes d'essai

Les Figures 4.8 et 4.9 montrent à nouveau une différence évidente entre les résultats de chaque essai. Cependant, les résistances obtenues d'après le modèle obtenu pour les essais ITS à 5 °C, semblent trop éloignées des autres valeurs. L'analyse d'après le modèle de l'équation de la courbe de tendance montre que pour l'ensemble de données il y a une cohérence par rapport à l'évolution de la résistance en fonction de la température de cure, et

on constate une fois plus que les valeurs plus hautes de résistances s'obtiennent à température ambiante.

Finalement, pour analyser l'écart entre les deux méthodes d'essais étudiées, la Figure 4.10 montre l'évolution des pentes de la relation entre la résistance et le temps de cure tel qu'établi aux Figures 4.2 et 4.5. Les résultats de la Figure 4.8 montrent un taux d'accroissement marqué pour les résistances établies suivant l'essai Marshall (autour de 3-4) et nettement plus atténué pour les résistances établies suivant l'essai ITS. Par ailleurs, la ligne rouge qui représente les pentes des essais ITS, montre une progression où on peut noter que la pente à la température ambiante est presque trois fois celle établie à 0 °C.

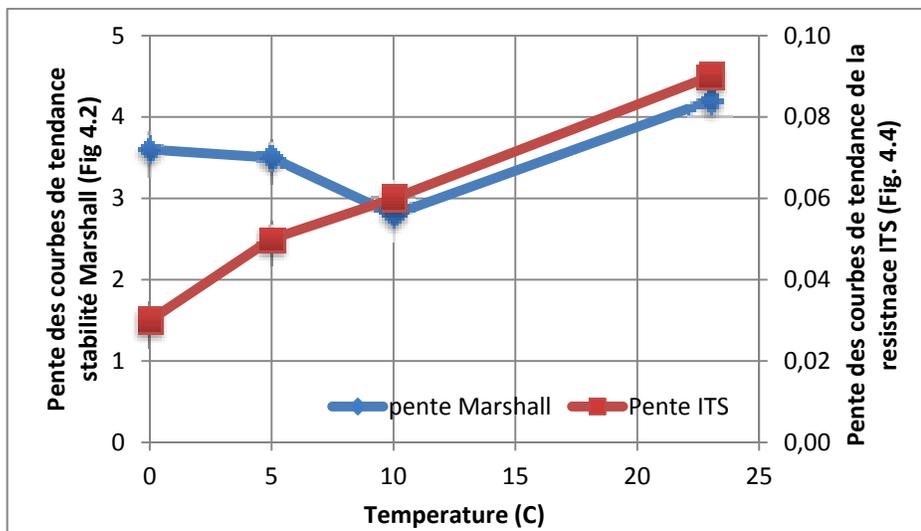


Figure 4.10 Pentes des courbes de tendance pour les deux méthodes d'essai

Une analyse du comportement des résistances en fonction du temps de cure permettra de mieux comprendre les différences trouvées entre chaque méthode d'essai.

4.2.1 Résistance mécanique en fonction du temps de cure

La Figure 4.11 montre l'évolution de la résistance en fonction de la température pour les différents temps de cure étudiés et ce, pour les deux méthodes d'essais étudiées. Dans les deux cas, il est évident que les courbes plus basses correspondent au temps de cure le plus court. Cependant, pour les courbes de l'essai Marshall les données sont erratiques et désordonnées, il n'y a pas une tendance facilement identifiable. Par contre, en ce qui a trait à l'évolution de la résistance suivant l'essai ITS, les résultats sont beaucoup plus homogènes et la façon dont les courbes se succèdent est plus cohérente. De cette manière, on peut voir qu'avec un plus long temps de cure, on développe plus de résistance, ce qui confirme les résultats initiaux.

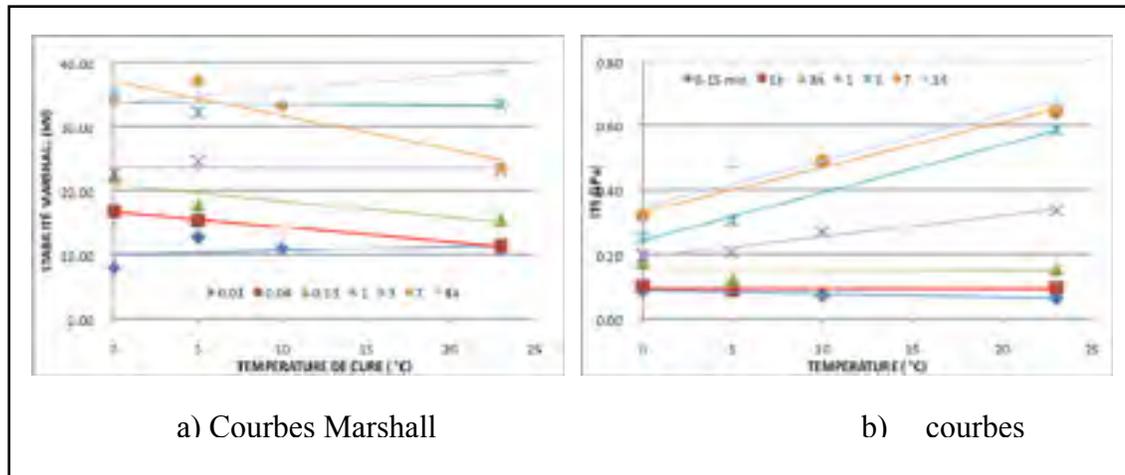


Figure 4.11 Comparaison courbes de temps de cure pour chaque essai de résistance

4.3 Paramètres et indices associés à la résistance mécanique

Comme nous l'avons mentionnée à la section 3.4.3, l'aire sous la courbe (ASC) et la pente de la courbe Force - Déplacement ont été calculées à partir des résultats obtenus. À partir de ces deux paramètres, l'indice de Fracture et l'indice de Ductilité (ID) ont été calculés suivant les équations 1.7 et 1.8 (voir section 1.6.3). La valeur de la pente des courbes Force — déplacement, est ici désignée « pseudo-module » (voir section 1.6.3).

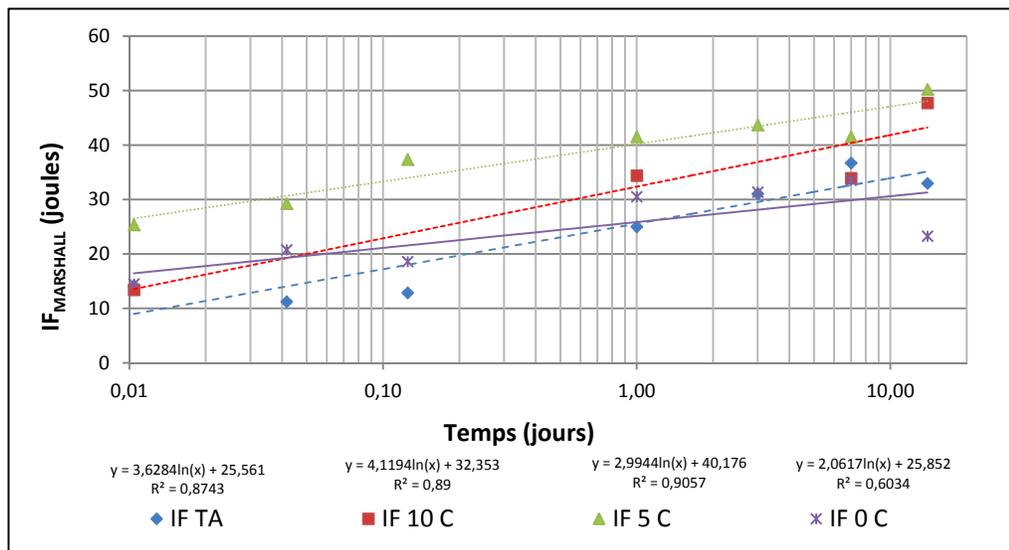
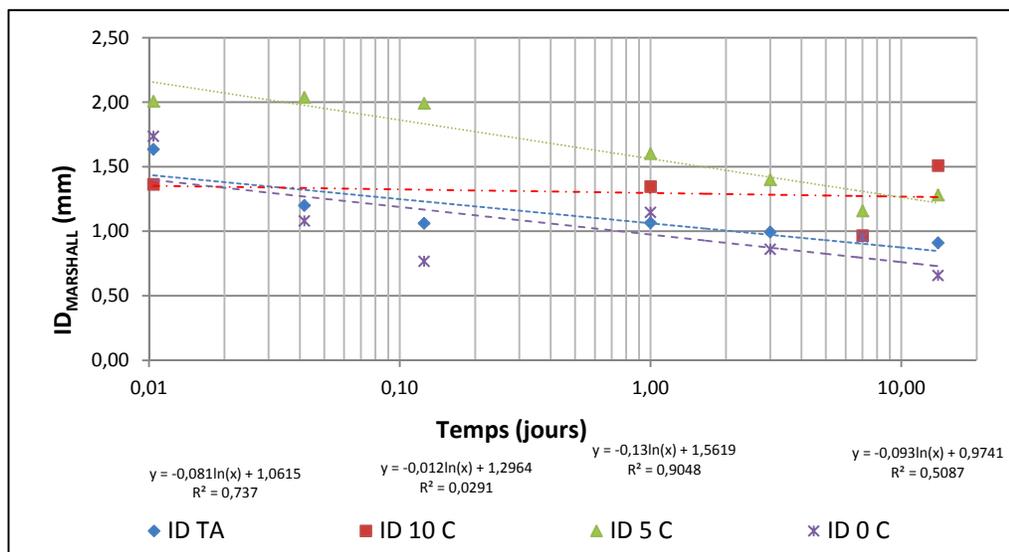
Rappelons que l'indice de fracture (IF) correspond à l'aire sous la courbe Force-Deplacement de l'essai de résistance et que par conséquent les unités correspondantes sont des kN.mm, soit Joules. L'indice de ductilité est l'IF divisé pour la force maximale de l'essai, soit en mm. (Halles et Thenoux, 2009).

L'IF a été calculé à partir des résultats de chaque briquette testée. De même que pour les données de résistance, les valeurs rapportées pour chaque température, à chaque temps de cure prédéterminé, correspondent à la moyenne de deux briquettes.

Les valeurs du pseudo-module sont associées au déplacement avant l'écrasement de chaque briquette. Cela veut dire que plus la valeur du pseudo-module est petite, plus sa déformation est grande pour un niveau de charge donné. Dans un premier temps, les résultats liés aux essais Marshall seront présentés. Dans un deuxième temps, les résultats liés aux essais ITS seront introduits.

4.3.1 Évolution de IF, ID et du pseudo-module pour les essais Marshall

L'évolution des valeurs de l'IF, de l>ID et du pseudo-module pour l'essai Marshall, est présentée sous forme semi-logarithmique dans les Figures 4.12 et 4.13 et 4.14 respectivement.

Figure 4.12 IF_{MARSHALL} à différentes températuresFigure 4.13 ID_{MARSHALL} à différentes températures

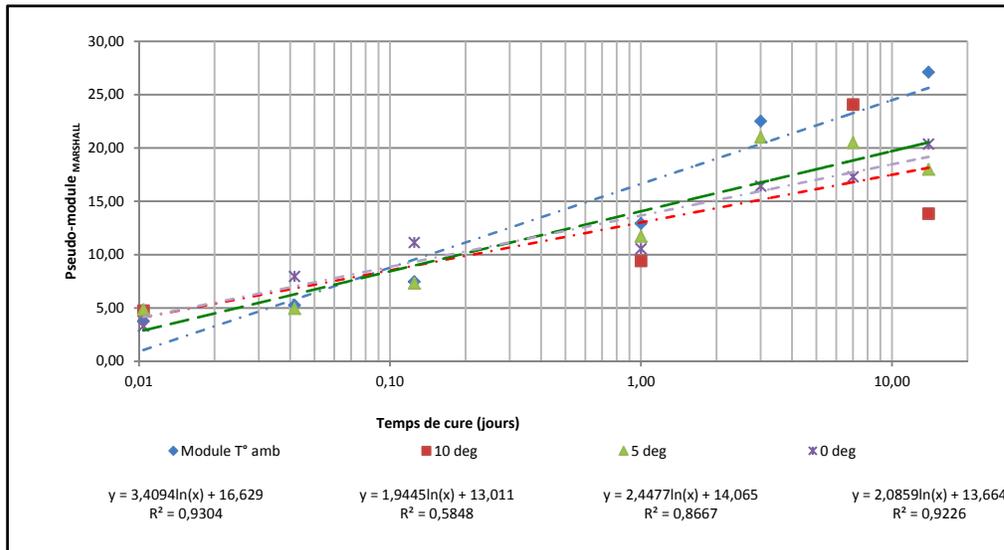


Figure 4.14 « Pseudo-modules » essai MARSHALL à différentes températures

Les résultats présentés à la Figure 4.12 montrent que l'indice de fracture (IF) augmente au cours des trois premiers jours avant de se stabiliser. Par la suite, les courbes des essais réalisés à 5 °C et 10 °C augmentent, et les courbes des essais réalisés à 0 °C et 23° descendent. On doit noter que la courbe de température ambiante présente des valeurs IF plus élevées que ceux-ci des températures à 0°C, 5 °C et 10 °C.

À l'égard du calcul des indices IF sur les résultats de la stabilité Marshall, on constate que la capacité de libération d'énergie pour ERF-MB est quantifiable à partir de l'essai Marshall.

Les courbes de la Figure 4.13 montrent que l'indice de ductilité (ID) diminue avec le temps de cure. Ce comportement descendant est tout à fait cohérent parce que la méthode Marshall n'est pas configurée pour mesures de traction.

Les courbes de pseudo-module de la Figure 4.14 présentent aussi un comportement croissant au cours de trois premiers jours. Après, les courbes des essais réalisés à 5°C et 10°C tombent, tandis que celles des essais réalisés à 0 °C et à 23 °C augmentent.

Suivant l'ensemble des résultats présentés aux Figures 4.12 à 4.14, le seul patron de comportement coïncidant avec les résultats de résistance Marshall est que les courbes IF (Fig 4.12) et « pseudo-module » (Figure 4.14) présentent une tendance à la hausse avec le temps de cure. Néanmoins, la disposition des courbes par rapport à la température, n'a pas un ordre ascendant ou descendant comme on s'y attendait.

4.3.2 Évolution de IF, ID et du pseudo-module pour les essais ITS

L'évolution des valeurs de l'IF, de l>ID et du pseudo-module pour l'essai ITS, est présentée sous forme semi-logarithmique dans les Figures 4.15 et 4.16 et 4.17 respectivement.

Les résultats de la Figure 4.15 montrent que les plus hautes valeurs correspondent à la température ambiante. De même que pour les essais Marshall, les pentes de la relation entre l'indice de fracture et le temps de cure deviennent plus douces au fur et à mesure que la température de cure est réduite. À noter que la réduction des valeurs IF est plus marquée pour les températures de cure de 5 °C et 0 °C.

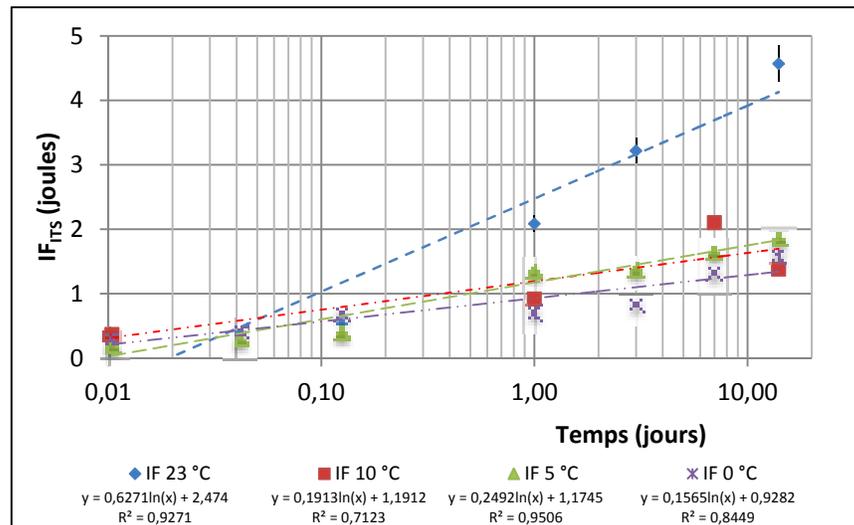


Figure 4.15 IF_{ITS} à différentes températures de cure

De même que pour les courbes de résistance, les valeurs de l'indice de fracture (IF), représentées à la Figure 4.15, augmentent avec le temps de cure. À 14 jours, les valeurs calculées pour les essais réalisés à 0 °C, 5 °C et 10 °C sont environ 35 % de celles calculées pour l'essai réalisé à 23 °C. Ce constat porte à croire qu'à une température inférieure de 10 °C la capacité de libération d'énergie des ERF-MB est réduite considérablement.

D'après Halles et Thenoux (2009), l'indice de ductilité correspond à un indicateur de la résistance à la déformation à traction d'un matériau (section 1.6.3). À la Figure 4.16, on peut voir que les valeurs d'ID diminuent avec la température de cure.

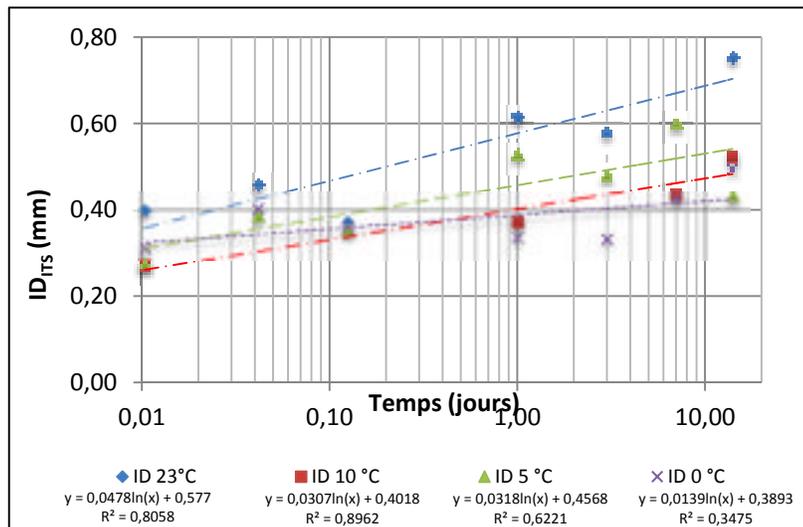


Figure 4.16 ID des essais ITS à différentes températures de cure

Les résultats de la Figure 4.16 montrent que la tendance des courbes ID sont à la hausse, tel que dans les cas de la résistance et l'indice de fracture IF. De même, on peut voir que les courbes des essais réalisés à 0 °C, 5 °C et 10 °C, ont des valeurs d'ID inférieures à celles-ci à 23 °C.

Finalement, les courbes de pseudo-module présentées à la Figure 4.17 montrent une tendance à la hausse avec le temps de cure. Exception faite de la courbe à 10 °C, les courbes

de pseudo-module montrent que les valeurs sont plus élevées à des températures de 0 °C et 5 °C, que celles obtenues à 23 °C.

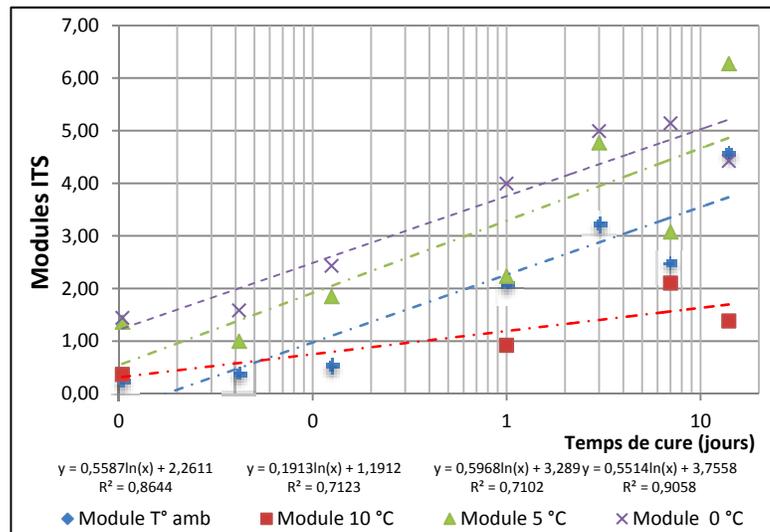


Figure 4.17 « pseudo-modules » ITS à différentes températures

D'après la Figure 4.17, on observe que pour des températures de cure inférieures à 23 °C on obtient des modules plus hauts. Rappelons que l'évolution des courbes de résistance ITS telles que présentées à la Figure 4.4 montre toutefois que la résistance diminue avec la température. On pourrait parler d'un probable comportement fragile des mélanges curés à basse température, car la rupture des éprouvettes se présente sans beaucoup de déplacement.

4.4 Bilan de l'analyse des résultats de résistance et des paramètres associés

Les sections précédentes ont mis en valeur les résultats obtenus des essais de résistance mécanique pour les deux méthodes d'essai retenues pour cette recherche. Cette analyse s'est essentiellement limitée à la période de cure maximum de 14 jours que nous avons imposée et sur des éprouvettes curées à 23 °C, 10 °C, 5 °C et 0 °C.

Dans l'ensemble, les résultats ont montré que le taux d'augmentation de la résistance est plus marqué dans le cas des essais ITS. Bien que pour les deux méthodes d'essai, les résultats présentent la même tendance à la hausse quant aux résistances mesurées, la dispersion des

données après 72 heures de cure pour l'essai Marshall est plus importante. Cela montre que l'essai ITS est plus adapté à mettre en relief l'effet des conditions de cure dans le temps.

Par ailleurs, les résultats des essais ont clairement montré que la résistance maximale évolue avec la température de cure. Cependant, une augmentation progressive de la résistance avec le temps de cure est visible seulement pour les essais ITS. De surcroît, l'effet de la température est plus marqué pour les résultats issus de l'essai ITS que pour ceux issus de l'essai Marshall.

L'analyse des pentes de relation entre la résistance et le temps de cure a permis de montrer que les résultats obtenus de l'essai ITS sont relativement proportionnels alors que ceux issus de l'essai Marshall ne présentent pas de relation marquée.

Finalement, l'analyse de l'évolution des résultats des paramètres associés en fonction du temps de cure a montré un meilleur potentiel de corrélation avec l'essai ITS que pour l'essai Marshall. Les courbes des essais ITS montrent que les valeurs de la résistance des éprouvettes curées à 23 °C sont plus hautes que celles de la résistance des éprouvettes curées à températures comprises entre 0 °C et 10 °C. Cette constatation est nettement moins évidente dans le cas des courbes obtenues de l'essai Marshall où toutes les valeurs se trouvent dans une plage plus serrée des données.

Finalement, le degré de relation entre les deux essais est montré en traçant la relation entre la Stabilité Marshall et la résistance ITS telle que présentée à la Figure 4.18. On montre que cette relation n'est pas linéaire et qu'elle peut-être simulée à une relation en puissance de la forme ax^b . Dans un tel cas, le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,76 (R^2).

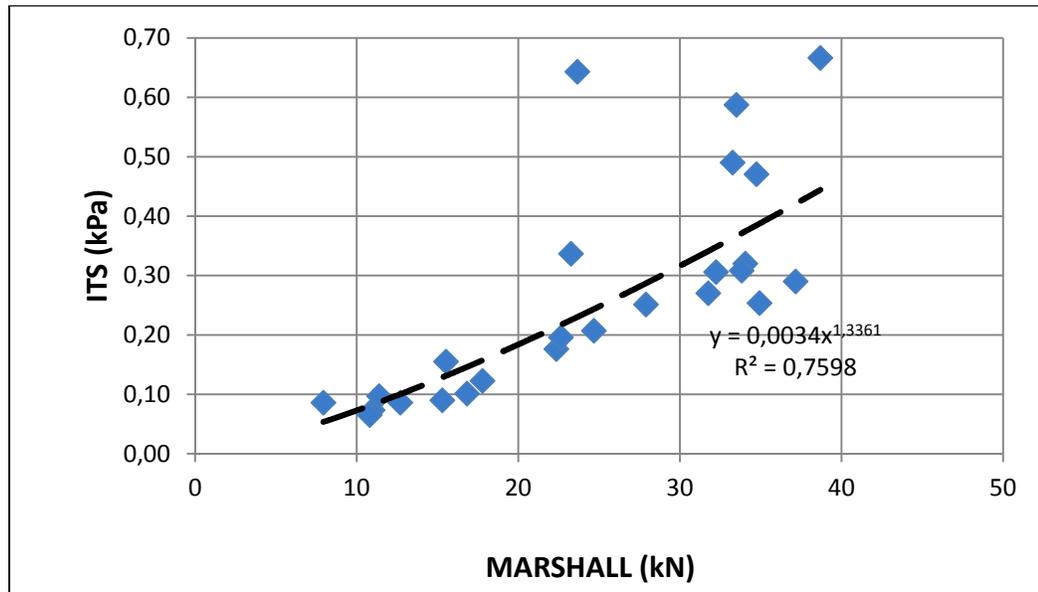


Figure 4.18 Relation directe entre les deux méthodes d'essai

Les résultats de la Figure 4.16 montrent que la dispersion des données est plus marquée au fur et à mesure que la valeur de la Stabilité Marshall augmente. C'est-à-dire que plus la résistance du matériau est significative, moins la relation entre les deux méthodes de mesures est corrélable

4.5 Essais complémentaires

L'analyse de résultats a mis en relief une évolution de la résistance suivant deux phases. La première, entre $t=0$ et $t=72h$, pour laquelle on a assumé un comportement linéaire, et une deuxième entre les 72 h et 14 jours de cure des éprouvettes, où le comportement semble plus aléatoire. En conséquence, il a été jugé pertinent de refaire une série d'essais à la mousse de bitume, en variant légèrement du programme expérimental, afin de vérifier le comportement des ERF-MB à une température de cure inférieure à 10 °C.

Les essais complémentaires ont été abordés en deux volets : 1) comparer les résultats de stabilité Marshall par rapport à la résistance ITS pour des matériaux de type MR-5 MB à une

température de cure variant entre 4 °C et 7 °C, et, 2) comparer les valeurs de stabilité Marshall et résistance ITS, à la température ambiante (23 °C), de MR-5 fabriqué avec de la mousse de bitume (ERF-MB) avec des MR-5 à l'émulsion de bitume (ERF-É).

La méthodologie de cure à basse température pour ces essais est la même que celle proposée dans le chapitre 2. Les éprouvettes ont été compactées avec 75 coups de marteau Marshall de chaque cote, pour ensuite être démoulées et entreposées à la température de cure ciblée.

4.5.1 Résultats pour les MR-5 fabriqués à la MB, curés entre 4 °C et 7 °C

Les résultats des essais Marshall et ITS sont présentés dans les Figures 4.1 à 4.4 respectivement. Pour les stabilités Marshall, on a vu que la température ne semble pas avoir un grand effet, car tous les résultats sont rapprochés. D'autre part, les résultats ITS montrent que la différence est plus appréciable après 72 h de cure.

Afin de mieux comprendre le comportement des données dans une période d'analyse de trois et sept jours, on a comparé les valeurs de stabilité Marshall et de résistance ITS sur des éprouvettes curées entre 4 °C et 7 °C versus des éprouvettes curées a température ambiante (23 oC). Cela permet de faire une meilleure analyse de sensibilité des ERF à des températures de cure inférieures à 10 °C pour la période définie comme « chaotique » dans les sections précédentes.

Le Tableau 4.5 montre les résultats obtenus pour chaque méthode d'essai dans les conditions de temps et température de cure particulières.

Tableau 4.5 Résultats de résistance par méthode d'essai et température de cure

Essai	Température de cure (°C)	Temps de cure (jours)	
		3 (R _i)	7 (R _f)
Stabilité Marshall	23	31,5	33,6
	4 à 7	27,3	27,9
	*Taux de croissance (%)	-13,3%	-16,8%
ITS	23	0,50	0,45
	4 à 7	0,31	0,25
	Taux de croissance (%)	-37,4%	-45,4%

$$\text{Taux de croissance} = (R_f - R_i) / R_i$$

Le taux de croissance négatif signifie que par exemple la stabilité Marshall à 3 jours est 13,3 % inférieure à une température entre 4 °C et 7 °C, par rapport à la stabilité Marshall du même matériau curé à la température ambiante (23 °C).

La Figure 4.19 illustre les différences de résistance atteintes pour les éprouvettes curées à une température entre 4 °C et 7 °C, par rapport aux éprouvettes curées à la température ambiante (23 °C). De même, on peut voir qu'il y a une augmentation de la stabilité Marshall pour les deux températures de cure, tandis que la résistance ITS diminue de 10% de 3 à 7 jours de cure à 23 °C et de 21% à une température de cure de 4 °C à 7 °C.

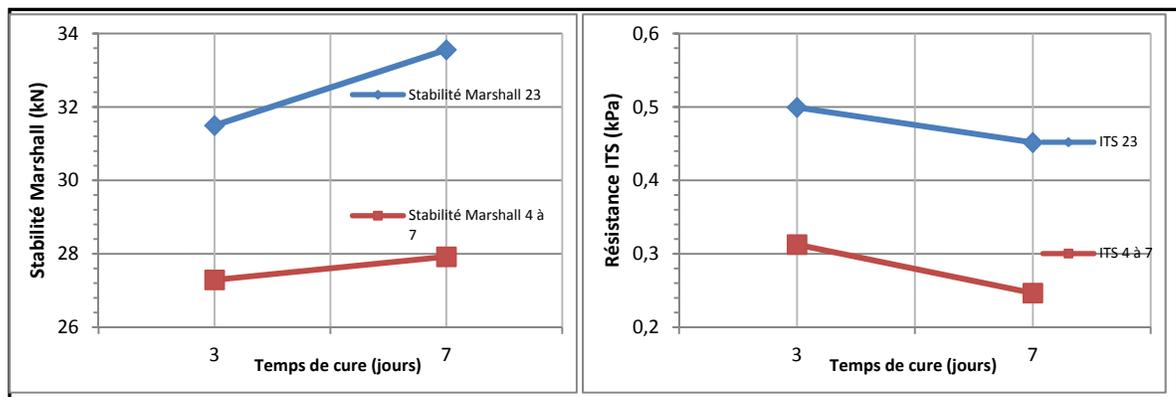


Figure 4.19 Résistances à 3 et 7 jours pour deux températures de cure

L'analyse du Tableau 4.5 et de la Figure 4.18 montre bien que les résistances Marshall et ITS sont plus élevées à température ambiante qu'à des températures en deçà de 10°C. Par contre, les valeurs d'ITS diminuent avec le temps, au lieu d'augmenter, comme attendu et comme observé pour les stabilités Marshall. Cette diminution de résistance est probablement due aux manipulations des éprouvettes.

Ce qu'il est important de noter c'est que la différence entre les résultats Marshall aux deux températures oscillent entre 13% et 17%, ce qui est appréciable, mais petit en comparaison des différences pour l'ITS avec des différences de 37% à 45%. Donc selon ces résultats, l'essai ITS est mieux indiqué pour évaluer l'effet de la température de cure sur le comportement des MR5.

4.5.2 Résultats pour les MR5 curés à la température ambiante (23 °C), en changeant le type de liant.

À partir de la norme LC-002 (Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion), on obtient la formulation pour le MR-5 à l'émulsion : teneur en eau optimale au compactage et teneur en bitume optimale à ajouter. La formulation à l'émulsion de bitume a été prise du projet de stage de Mme. Amel Benaissa (2011). Les pourcentages retenus sont montrés dans le Tableau 4.6. La formulation pour la fabrication des éprouvettes du MR5-MB demeure la même que celle que l'on a utilisée dans la section précédente.

Tableau 4.6 Formulation du MR-5 à l'émulsion du bitume

Matériau	FBR-E (%)	Wopt (%)	% bit aj	% ciment
MR5-émulsion	62	5	3,05	1
MR-5 MB	-	4	3,0	1

Où :

FBR-E (%) : fraction bitume résiduel correspondante

%bit aj (%) : teneur optimale en bitume ajouté

Wopt (%) : teneur optimale en eau de compactage

%ciment : Pourcentage de ciment ajouté

Le temps de cure a été réduit à sept jours, de sorte que les essais ont été faits sur une période de cure de : 0-15 min; 1 h; 3 h; 24 h; 72 h et 7 jours. Finalement, on a comparé les résultats de la résistance mécanique des éprouvettes MR-5 MB et MR-5 É d'après les deux méthodes d'essai utilisées, soit Marshall et ITS.

Les résultats de stabilité Marshall et de résistance ITS sont présentés dans les Figures 4.20 et 4.21. L'échelle semi-logarithmique facilite la présentation afin de remarquer l'évolution des résultats, particulièrement dans les premières heures de cure.

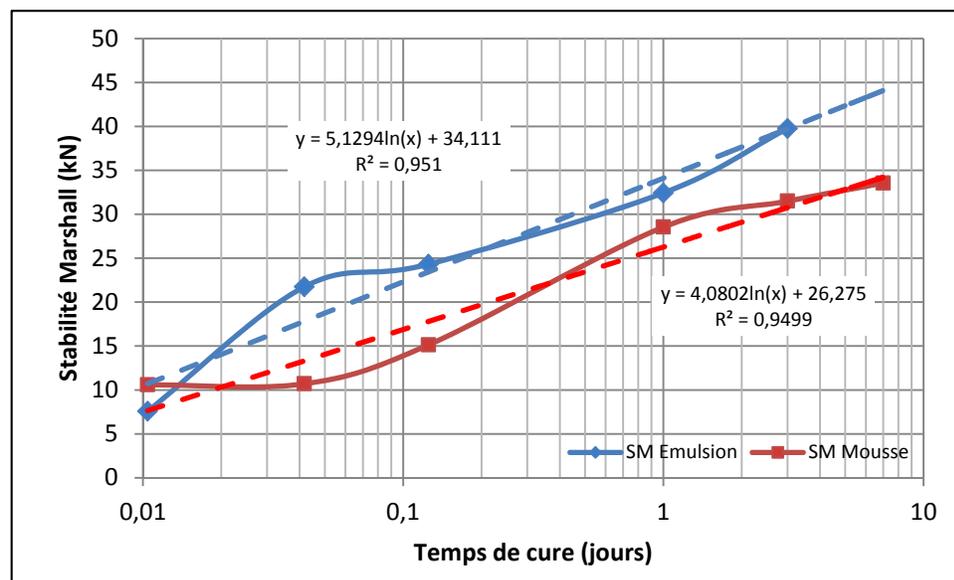


Figure 4.20 Stabilités Marshall pour deux MR-5 avec différents types de liant

À la Figure 4.20, nous pouvons apprécier, à nouveau, que les résultats ont une tendance à la hausse. Bien que la courbe de tendance du MR-5 à l'émulsion de bitume présente des valeurs

de stabilité Marshall plus hautes, que celle-ci des MR-5 MB, il est intéressant de distinguer que les courbes de données montrent des comportements similaires. Par contre, il est intéressant de constater que pour les MR-5 É, il y a une montée rapide en cohésion dans la première heure, mais que pour la mousse, la cohésion ne semble pas changer durant cette même période. En fait, pour la mousse, le premier vrai changement se produit autour de 3 heures de cure.

Par ailleurs, les courbes de résistance ITS de la Figure 4.21, montrent des montées en cohésion exponentielle similaire entre les deux liants. Cette fois, les deux courbes montrent que très peu de changement avant 3 heures de cure. Il est intéressant de voir que contrairement aux résultats Marshall, les résultats à la mousse donnent des résistances supérieures aux matériaux à l'émulsion.

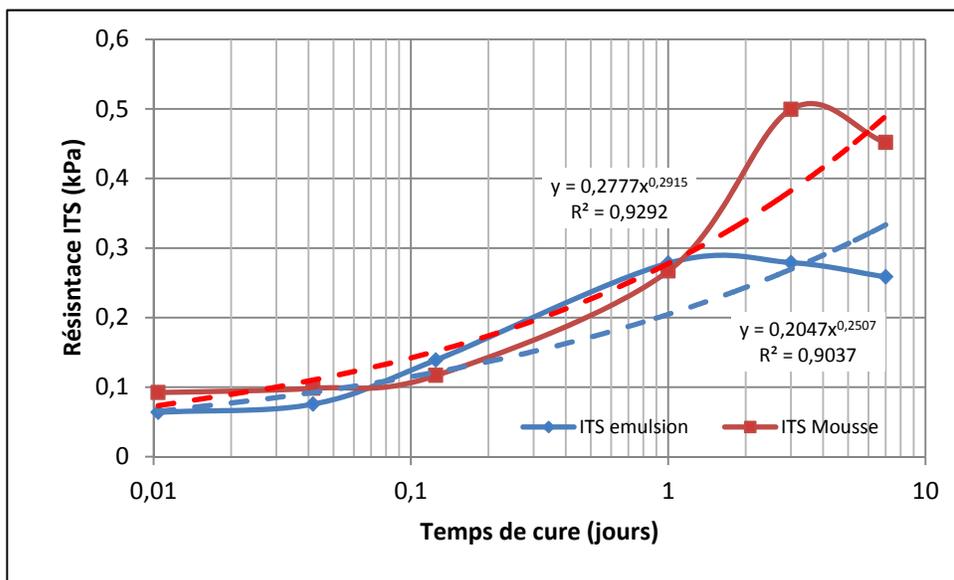


Figure 4.21 Résistance ITS pour deux MR-5 avec différents types de liant

Selon ces résultats, il n'est pas possible d'identifier clairement si les MR5 à la mousse ou ceux à l'émulsion donnent des résistances mécaniques supérieures; d'autres essais seraient nécessaires, avec d'autres matériaux, afin de statuer sur ce point.

CONCLUSIONS

L'étude des matériaux recyclés, composés de 50% de GBR et 50% de matériaux vierges, traités à la mousse de bitume, a permis d'établir avec certitude un point d'inflexion dans le comportement de ce type des matériaux de point de vue de la température de cure.

En général l'étude a permis de confirmer que la fabrication des enrobés à températures inférieures à 10 °C est déconseillée, car on a constaté une perte importante de résistance pendant le temps de cure, variant de 30% à 60% par rapport à la résistance à la température ambiante. Cela signifie que les ERF soumis aux températures de cure entre 23° C et 10 °C, sont susceptibles de perdre jusqu'à 30% de la résistance attendue ou de conception.

On confirme alors, les exposés des auteurs comme Davidson (2004), Muthen (2009) et Jenkins (2000), qui ont étudié l'influence de la température de l'air dans le processus de cure. La perte de résistance aux températures inférieures à la température ambiante, ainsi que les valeurs d'indice de ductilité montrent une diminution de la cohésion du mélange.

Cependant, ce phénomène est seulement visible à l'aide des valeurs obtenues lors de l'essai de résistance ITS. Le comportement des courbes de tendance obtenues lors des essais de stabilité Marshall et résistance ITS, permettent d'affirmer que l'essai ITS est plus sensible aux changements de caractère mécanique que l'essai Marshall pour de matériaux traités à froid à la mousse de bitume.

En outre, la méthodologie énoncée, a permis d'identifier un température de cure de 38 °C pendant 72h et une compaction de 75 coups de chaque coté des éprouvettes, comme des paramètres à suivre pendant l'étape de formulation des ERF.

Le calcul des facteurs additionnels tel que l'indice de fracture (IF) et l'indice de ductilité (ID) pour optimiser la mousse est un atout dans l'interprétation des données et permet d'étayer

l'analyse usuelle fondée sur les paramètres habituels du temps de demi-vie et de l'expansion. Avec le calcul de l'indice de moussabilité, on valide vraiment l'essai d'optimisation de la mousse.

L'humidité diminue avec le temps de cure. L'évolution des courbes d'humidité est cohérente avec les essais de résistance, parce qu'on a pu constater que, même à températures inférieures à la température ambiante, il y a une perte de la teneur en eau.

Il a été constaté que, pour les deux types d'essai réalisés, l'évolution de la résistance est dépendante du temps de cure. Les meilleures résistances s'obtiennent à des températures plus élevées.

Les courbes Marshall pour les différentes températures de cure, rapportent des données très proches l'une de l'autre dans une plage de données étroite, ce qui ne permet pas de bien différencier les comportements. Selon les résultats des Figures 4.6 et 4.7, on peut dire que soit la température de cure a très peu d'incidence sur la résistance mécanique de ces matériaux, soit la méthode Marshall n'est pas assez précise pour mesurer l'influence de la température de cure. Si on fait abstraction de la température dans l'analyse des données, on obtient un coefficient de corrélation de 0.86 pour la relation entre la résistance mesurée et le temps de cure. Cela indique que l'essai Marshall n'est pas suffisamment sensible aux variations de température.

En analysant les données, on trouve que les courbes de résistance ITS obtenues pour chaque température de cure, évoluent aussi avec le temps. Cependant, au fur et à mesure que le temps de cure avance, les éprouvettes curées à la température ambiante ont atteint des valeurs ITS plus hautes que celles-ci à températures de 10 °C et moins. Dans ce contexte, on

constate à nouveau que l'essai ITS s'avère plus représentatif des conditions de cure des matériaux de type MR-5 que l'essai Marshall.

Le calcul des paramètres associés (IF, ID et pseudomodule) permet d'analyser beaucoup plus en profondeur le comportement des ERF, notamment la sensibilité au changement de température. Dans le cas de l'indice de fracture, les variations des résultats à température ambiante et à 5 °C ont permis de confirmer que l'essai ITS est plus sensible aux variations de la température par rapport à la capacité de libération d'énergie : l'indice de fracture est un bon indicateur pour analyser le comportement des ERF-MB.

Les paramètres associés à la résistance mécanique permettent de confirmer ou de contredire les tendances des données. Par exemple, les courbes de résistance Marshall sont ascendantes, de même que les valeurs de l'indice de fracture. Cela est cohérent parce qu'en effet, il y a un écrasement de l'échantillon. Cependant, les valeurs de l'indice de ductilité sont descendantes, car la méthode Marshall ne considère pas les efforts à traction.

Les courbes de résistance ITS sont ascendantes, de même que les valeurs IF et ID associées. Bien que les courbes d'évolution de résistance pour les deux essais soient ascendantes, pour l'essai ITS, celles-ci montrent des pentes plus raides pour les températures inférieures à 10 °C, tandis que pour Marshall on ne voit pas une différence. Cela nous permet de justifier l'utilisation de l'essai ITS comme plus représentatif pour ce type de matériaux.

On a proposé le calcul du pseudomodule pour ce type des matériaux à partir de la courbe force-déplacement obtenue lors des essais de résistance Marshall et ITS. Le pseudomodule correspond à la pente de la courbe. Les courbes de pseudomodule dans l'essai ITS ont un comportement ascendant, tandis que les courbes de pseudomodule correspondants aux essais Marshall ne sont pas clairement défini. Cela indique une certaine fragilité des mélanges, qui est plus marquée aux basses températures.

Finalement, la comparaison des valeurs de résistance mécanique sur un MR-5 à la mousse de bitume avec un MR-5 à l'émulsion nous a permis de voir comme pour les essais Marshall que les résistances du MR-5 à l'émulsion sont plus hautes que pour le MR-5 à la mousse. Par contre, l'essai ITS montre les plus hautes valeurs sur les éprouvettes fabriqués à la mousse. Cette variation nous laisse croire, à nouveau, que l'essai ITS pourrait s'avérer plus précis pour caractériser les ERF à la mousse de bitume.

On constate aussi que le 75% de la résistance finale, dans un période d'analyse de 14 jours, s'atteint entre les trois et sept jours de cure. Cela est important pour définir que le temps de cure à jeune âge doit être dans les premiers 72 heures de cure.

RECOMMANDATIONS

Avec la méthode Marshall ou la méthode ITS, les températures de cure inférieures à la température ambiante ont un impact sur les valeurs de résistance. De nouveaux essais sont nécessaires pour évaluer l'effet du temps de reconditionnement d'une éprouvette à la température ambiante, une fois qu'on le retire de la chambre à température contrôlée.

Il est important de reproduire cette expérience avec des échantillons provenant d'un chantier, afin de vérifier le comportement des variables.

On recommande de procéder à une analyse comparative des matériaux à la mousse de ceux à l'émulsion en termes de valeur de module dynamique. Cela pourrait donner plus de détails sur les comportements des matériaux soumis aux variations de température réelles de chantier, et avec beaucoup plus de précision.

L'essai ITS s'avère comme le plus précis pour les matériaux de type MR 5, autant à la mousse de bitume comme à l'émulsion. On propose d'établir des paramètres spécifiques pour les essais ITS afin de développer une nouvelle norme qui permettrait d'évaluer et de qualifier les résultats d'après des expériences en chantier.

Le rapport environnemental dans un MR-5 à la mousse de bitume n'a pas suffisamment été abordé. Des recherches quantitatives s'avèrent nécessaires pour évaluer certains paramètres, comme la consommation d'énergie, la perte d'humidité et l'impact de l'humidité relative dans les résultats de résistance.

Afin de suivre la recherche sur les ERF, il s'avère nécessaire d'aborder le sujet de la cure à jeune âge restreint aux 72 premières heures de cure.

ANNEXE I

RÉSULTATS DE LABORATOIRE

Granulométries GBR avant extraction du bitume	139
Granulométries GBR après extraction du bitume	151
Densités maximales GBR et mr-	167
Résultats extraction du bitume GBR	169
Résultats extraction du bitume MR-5	175
Caractérisation du bitume résiduel GBR et MR-5	185
Formulation et optimisation de la mousse de bitume	193
Détermination du pourcentage optimale du bitume pour la formulation du MR-5 d'après essai Marshall	213
Détermination du pourcentage optimale du bitume pour la formulation du MR-5 d'après essai ITS	217
Teneur en eau des échantillons pendant la cure	219
Résultats de résistance Marshall et ITS pour des échantillons curés à 0 °C	225
Résultats de résistance Marshall et ITS pour des échantillons curés à 5 °C	239
Résultats de résistance Marshall et ITS pour des échantillons curés à 10 °C	253
Résultats de résistance Marshall et ITS pour des échantillons curés à la température ambiante ($\pm 23^{\circ}\text{C}$)	267
Résultats calcul indice de fracture et indice de ductilité	287

BIBLIOGRAPHIE

- Akeroyd, FML, et BJ Hicks. 1988. « Foamed bitumen road recycling ». *Highways*, vol. 56, n° 1933.
- Angel Cruz, Miguel, Frederic Delfosse, Bernard Eckmann, Paul Landa et Tine Tanghe. 2006. « Le projet SCORE (Superior cold recycling)-Enrobage a la mousse de bitume-Partie 2 ». *RGRA-Revue Generale des Routes et des Aerodromes*, n° 849, p. 61-69.
- ARRA, Asphalt Recycling and Reclaiming Association. 2001. *Basic Asphalt Recycling Manual*. 265 p.
- Asphalt Academy. 2009a. « Technical Guideline : Bitumen Stabilised Materials : A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials ». (28 mai 2012), p. 136.
- Asphalt Institute. 1983. *Principles of construction of hot-mix asphalt pavements*. Lexington, Ky.: Lexington, Ky. : Asphalt Institute.
- Asphalt Institute. 1989. *The Asphalt handbook*. Coll. « Manual series no. 4 ». Lexington, Ky.: Asphalt Institute, xxxi, 607 p.
- Bellerose, Michel. 2008. « Stabilisation de Chaussée ». In *Congrès annuel AQTR, L'heure des choix* (14 au 16 avril 2008). Québec, CA.
- Bergeron, Guy. 1996. « Retraitement en place des chaussées ». p. xi, 120.
- Bergeron, Guy. 2001. « Recyclage à froid des enrobés ». *Bulletin d'information technique. INFO DLC*. Vol. 6, n° 4.
- Bergeron, Guy. 2005. « Performance des techniques de retraitement en place et de recyclage à froid au Québec ». In *Congrès annuel de 2005 de l'Association des transports du Canada*. Calgary (Alberta).
- Bergeron, Guy. 2006a. « Le retraitement en place des chaussées au Québec ». *Revue Routes/Roads*, n° 330.
- Bergeron, Guy. 2008. « Performance des techniques de retraitement en place et de recyclage à froid au Québec ». *Via Bitume*, vol. 3, n° 3 (Octobre, 2008), p. 43.
- Bissada, Amir F. 1987. « Structural Response of Foamed-Asphalt--Sand Mixtures in Hot Environments ». *Transportation Research Record*, n° 1115.

- Bitumequebec. 2010. *Profil de l'industrie de la chaussée souple au Québec*. Bitume Québec.
- Bowering, RH, et CL Martin. 1976. « Foamed bitumen production and application of mixtures evaluation and performance of pavements ». In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* Vol. 45.
- Brennen, Mrn, M Tia, AG Altschaeffl et LE Wood. 1983. « Laboratory investigation of the use of foamed asphalt for recycled bituminous pavements ». *Transportation Research Record*, vol. 911, p. 80-87.
- Brosseaud, Yves. 2007. « Les types de retraitement à froid ». In *Le retraitement à froid des chaussées souples*. Montréal, CA.
- Carter, Alan. 2011. « Le recyclage des enrobés: à chaud, tiède et à froid ». *Via Bitume*, vol. 6, n° 3 (octobre, 2011), p. 59.
- Castedo-Franco, L. H., C. C. Beaudoin, E. L. Wood et A. G. Altschaeffl. 1984. « Durability characteristics of foamed asphalt mixtures ». In *Canadian Technical Asphalt Association Conference, Proceedings of the 29th Annual (1984)*, sous la dir. de Association, Canadian Technical Asphalt. Montreal, Canada.
- Cazacliu, Bogdan, Marian Peticila, Bernard Guieysse, Jacques Colange, Cedric Leroux, Jacques Bonvallet et Richard Blaszczyk. 2008. « Effect of Process Parameters on Foam Bitumen-based Road Material Production at Ambient Temperature ». *Road Materials and Pavement Design*, vol. 9, n° 3, p. 499-523.
- CCA-ACC. 2005. « Guide d'économie d'énergie pour la réfection des routes à l'intention des entrepreneurs canadiens en construction routière ». [Ottawa]: PEEIC, Ressources naturelles Canada Association canadienne de la construction.
- Chan, Susanne, P Eng, Pavement Design Engineer, Becca Lane, Chris Raymond, Senior Pavement Design Engineer, Warren Lee et Tom Kazmierowski. 2009. « Five Year Performance Review of Cold In-place Recycling and Cold In-place Recycling with Expanded Asphalt Mix on Highway 7, Perth, Ontario ». In *2009 Annual conference and exhibition of the transportation association of canada-transportation in a climate of change*.
- D. Jones, P. Fu, J. Harvey, and F. Halles. 2008b. *Full-Depth Pavement Reclamation with Foamed Asphalt : Final Report*. University of California Pavement Research Center UC Davis, UC Berkeley.

- Davidson, Keith, Blais Claude, Cruteau-Jean Martin. 2004. « A review of in-place cold recycling/reclamation in Canada ». In *Transportation Association of Canada Fall 2004 meeting*.
- Deneuvillers, C, et E Cornet. 1999. « emulsions de bitume - influence de la teneur en bitume sur la performance des enrobes a froid ». *revue generale des routes (RGRA)*, n° 773.
- Di Benedetto, Hervé, et Jean-François Corté. 2005. *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Paris: Hermès Science Publications, 283 p.
- Doré, Guy, et Hannele K. Zubeck. 2009. *Cold regions pavement engineering*. Reston, Virg. : New York: Reston, Virg. : ASCE Press New York : McGraw-Hill.
- EAPA, European asphalt pavement association. 2012. *asphalt in figures 2011*. Brussels, Belgium, 5 p.
- FHWA, Federal Highway Administration. 2011. « Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice ». McLean, VA: FHWA.
- FHWA, Federal Highway Administration. 2012. *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. FHWA-RD-97-148. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Fu, Pengcheng, David Jones, John T Harvey et Felipe A Halles. 2009. « Investigation of the curing mechanism of foamed asphalt mixes based on micromechanics principles ». *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, n° 1, p. 29-38.
- Gaudefroy, Vincent, François Olard, Bogdan Cazacliu, Chantal de La Roche, Etienne Beduneau et Jean Antoine. 2007. « Laboratory Investigations of Mechanical Performance of Foamed Bitumen Mixes That Use Half-Warm Aggregates ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1998, n° -1, p. 89-95.
- Gonzalez, Alvaro, Misko Cubrinovski, Bryan Pidwerbesky et David Alabaster. 2010. « Strength and deformational characteristics of foamed bitumen mixes under suboptimal conditions ». *Journal of Transportation Engineering*, vol. 137, n° 1, p. 1-10.
- Halles, Felipe, et Guillermo Thenoux. 2009. « Degree of Influence of Active Fillers on Properties of Recycled Mixes with Foamed Asphalt ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2095, n° -1, p. 127-135.

- James, A. 2006. *Overview of asphalt emulsion*. Coll. « Asphalt Emulsion Technology », E-C102. 500 Fifth Street, NW Washington, DC 20001: Transportation Research Board, 1 p.
- Jenkins, K. J., A. A. A. Molenaar, J. L. A. De Groot et M. F. C. Van De Ven. 2000. « Developments in the uses of foamed bitumen in road pavements ». *Heron*, vol. 45, n° Compendex, p. 167-176.
- Jenkins, Kim Jonathan. 2000. « Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis of foamed bitumen ». Doctor of Philosophy (Engineering), Stellenbosch, South Africa, University of Stellenbosch, 368 p. Consulté le 14 mai 2012.
- Jenkins, Kim Jonathan, et P. K. Moloto. 2008b. « Technical Memorandum : Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines: Design Report, Phase II : Task 8: Curing Protocol: Validation (TG2 Design Report, Phase II : Appendix - H) ». (28 mai 2012), p. 18.
- Jones, David, Pencheng Fu, James Harvey et Felipe Halles. 2008. *Full-Depth Pavement Reclamation with Foamed Asphalt: Final Report* Coll. « Partnered Pavement Research Program (PPRC) Contract Strategic Plan Element 4:12. ». Berkeley, US: California Department of Transportation, University of California.
- Kandhal, Prithvi , et Rajib Basu. Mallick. 1997. *Pavement recycling guidelines for state and local governments participant's reference book*. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration ; National Center for Asphalt Technology.
- Kazmierowski, Tom, Pamela Marks et Stephen Lee. 1999. « Ten-year performance review of in situ hot-mix recycling in Ontario ». *Transportation Research Record*, n° Compendex, p. 194-202.
- Khweir, K. 2007. « Performance of foamed bitumen-stabilised mixtures ». *Proceedings of the ICE-Transport*, vol. 160, n° 2, p. 67-72.
- Kim, Yongjoo, et Hosin David Lee. 2006. « Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt ». *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 18, n° 1, p. 116-124.
- Kowalski, Tim E, et Dale W Starry Jr. 2007. « Modern Soil Stabilization Techniques ». In *Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Saskatoon, Saskatchewan, October*. p. 14-17.

- Lacombe, J. 2008. « Caractérisation des enrobés recyclés à froid et dimensionnement de la couche de roulement ». MR42973, Canada, Université de Sherbrooke (Canada), 218 p.
- Lane, Becca, et Tom Kazmierowski. 2005. « Implementation of cold in-place recycling with expanded asphalt technology in Canada ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1905, n° 1, p. 17-24.
- Lee, Hosin, et Yongjoo Kim. 2006. « Influences of binder and RAP temperatures and foaming water content on cold in-place recycling mix design process using foamed asphalt ». In *2006 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference, April 30, 2006 - May 3, 2006*. Vol. 2006, p. 377-387. Coll. « Proceedings of the 2006 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference ». Atlanta, GA, United States: American Society of Civil Engineers.
- Lelièvre, André. 1994. *Les enrobés bitumineux*. Sainte-Foy, Québec: Éditions Le Griffon d'argile, 409 p.
- Lombardi, Bernard. 2007. « Liants hydrocarbonés ». *Techniques de l'ingénieur*. Vol. Les routes, les ponts et les parcs de stationnement, Génie civil, Construction (22-03-2012).
- M. Cruz, F. Delfosse, B. Eckmann, P. Landa et T. Tanghe. 2006. « Enrobage à la mousse de bitume ». *Revue générale des routes et aérodromes*, n° 849 (juin 2006).
- Maccarrone, S, G Holleran, DJ Leonard et S Hey. 1994. « Pavement recycling using foamed bitumen ». In *17TH ARRB conference, gold coast, queensland, 15-19 august 1994; proceedings; volume 17, part 3*.
- Ministry of Transportation Ontario, MTO. . 2001. *LS-297 method of test for the determination of indirect tensile strength of expanded asphalt mixes*. Toronto: Laboratory Testing Manual.
- MTQ, Ministère des Transports du Québec. 1999. « Recyclage des chaussées ». *Info DLC*.
- Murphy, Daniel T, et John J Emery. 1996. « Modified cold in-place asphalt recycling ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1545, n° 1, p. 143-150.
- Muthen, KM. 1998. « Foamed asphalt mixes-Mix design procedure ». *Transportation Research Record*, vol. 898, p. 290-296.

- Nataatmadja, Andreas. 2001. « Some characteristics of foamed bitumen mixes ». *Transportation Research Record*, n° Compendex, p. 120-125.
- PIARC, Association Mondial de la route. 2001. *recyclage des chaussées souples existantes*. Coll. « Le Comité technique AIPCR des Routes souples ». 40 p.
- PIARC, Association Mondial de la route. 2003. *recyclage des chaussées*. Coll. « Comité Technique AIPCR C7/8 – "Chaussées Routières" ».
- PIARC, Association Mondial de la route. 2008a. « Revue de la progression et du développement du recyclage dans la construction des chaussées. ». *Chaussées routières*.
- Planche, Jean-Pascal. 2008. « European Survey on the use of RAP ». In *International ISAP Symposium on Asphalt Pavements and Environment (August 18th – 20th, 2008)*, sous la dir. de Pavement, ISAP - International Society for Asphalt. p. 10. Zürich, Switzerland.
- Rens, Ir L. 2003. « le retraitement en place des chaussées au moyen de ciment ». Vol. 30.
- Roberts, Freddy L, Johann C Engelbrecht et Thomas William Kennedy. 1984. « Evaluation of recycled mixtures using foamed asphalt ». *Transportation Research Record*, n° 968.
- Romanoschi, Stefan, Mustaque Hossain, Andrew Gisi et Michael Heitzman. 2004. « Accelerated Pavement Testing Evaluation of the Structural Contribution of Full-Depth Reclamation Material Stabilized with Foamed Asphalt ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1896, n° -1, p. 199-207.
- Ruckel, PJ, SM Acott et RH Bowering. 1983. « Foamed-asphalt paving mixtures: preparation of design mixes and treatment of test specimens ». *Transportation Research Record*, vol. 911, p. 88-95.
- Serfass, J. P. 2009a. « Recyclage et retraitement en place des matériaux de chaussée ».
- Serfass, J. P. 2009b. *Recyclage et retraitement en place des matériaux de chaussée*.
- SÉTRA, Service d'études techniques des routes et autoroutes. 2004. « Guide Technique - Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées ». Paris:

- Thenoux, Guillermo, Álvaro Gonzalez et Rafael Dowling. 2007. « Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile ». *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 49, n° 4, p. 325-339.
- Theyse, Hechter, Fenella Long, John T. Harvey, and Carl L. Monismith. 2004. *Discussion of Deep In-Situ Recycling (DISR)*. Coll. « Technical Memorandum TM-UCB-PRC-2004-6 ». Pavement Research Center Institute of Transportation Studies
- TRB, Transportation Research Board. 2006. *Asphalt Emulsion Technology*. circular. Coll. « TRB Research Circular E-C102 ». Washington, DC: TRB, 52 p.
- USIRF, union de syndicats de l'industrie routière française. 2006. *Les émulsions de bitume*. Paris: Syndicat des fabricants d'emulsions routieres de bitume (SFERB), 339 p.
- WAPA. 2011a. « Washington Asphalt Pavement Association ». n° 15-04-2011.
- Wijk, A van, et LE Wood. 1983. « Use of foamed asphalt in recycling of an asphalt pavement ». *Transportation Research Record*, n° 911.
- Wirtgen, GmbH. 2001. *Bitume mousse - le liant innovateur pour la construction routière*. 12.
- Wirtgen, GmbH. 2004a. *Cold processing of road construction materials Soil stabilization, cold mixes, cold recycling*. 12.
- Wirtgen, GmbH. 2004b. *Cold Recycling Manual*. Coll. « Cold Recycling ». Wirtgen Group.
- Yongjoo, Kim. 2008. « Laboratory Evaluation of Cold In-place Recycling Mixtures using Foamed Asphalt Based on Dynamic Modulus and Repeated Dynamic Load Tests ». *TRB 87th Annual meeting*, vol. 87, p. 19.