

VALORISATION DU BARDEAU D'ASPHALTE
POSTCONSOMMATION POUR LES CHAUSSÉES NON
REVÊTUES

Par

MOHAMED AYMEN SALHI

RAPPORT DE PROJET PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAITRISE EN INGÉNIEURIE
M. Ing.

MONTRÉAL, LE 8 AOÛT 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.



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 RAPPORT DE PROJET A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-Claude Carret, directeur de projet
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, codirecteur de projet
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Vaillancourt, évaluateur de projet
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à chacun pour leur précieuse contribution et soutien tout au long de ce projet.

Tout d'abord, je tiens à adresser mes remerciements aux directeurs de Projet Jean-Claude Carret et Alan Carter pour leur guidage éclairé et leur leadership inspirant. Leur expertise et dévouement ont été essentiels pour mener à bien ce projet. Je tiens aussi à remercier Gabriel Orozco et Michel Vaillancourt pour leur contribution. Grâce à leur mentorat, j'ai pu développer mes compétences professionnelles.

Ensuite, je tiens à adresser mes remerciements aux techniciens de laboratoire Sylvain Bibeau et Francis Bilodeau. Leur engagement et dévouement ont été exemplaires. Leur expertise technique a été inestimable pour la réussite de ce projet.

Je tiens également à remercier toute l'équipe pour l'esprit de collaboration et le travail d'équipe exceptionnel dont chacun a fait preuve.

VALORISATION DU BARDEAU D'ASPHALTE POSTCONSOMMATION POUR LES CHAUSSÉES NON REVÊTUES

MOHAMED AYMEN SALHI

RÉSUMÉ

L'entretien des routes non revêtues dans la région de Gaspésie est un défi majeur en raison des conditions climatiques difficiles et du trafic intensifié. Le microsurfaçage à base des bardeaux d'asphalte post-consommation est préconisé pour prolonger la durée de vie de ces chaussées. Cependant, au Québec, la valorisation de ce matériau reste faible. Dans ce contexte, La Régie Intermunicipale de Traitement des Matières Résiduelles de Gaspésie a confié au laboratoire de chaussée et des matériaux bitumineux la formulation d'un enrobé de microsurfaçage à teneur optimale en bardeaux d'asphalte. Cette étude porte sur la formulation à froid d'un enrobé de microsurfaçage selon les procédures développées par « *International Slurry Surfacing Association* ». La première phase de la campagne expérimentale consiste à étudier un mélange de référence pour évaluer l'effet de la variation des teneurs des différents constituants. La deuxième phase consiste à étudier l'impact de modification de granulométrie. La troisième phase consiste à étudier l'effet de changement de type d'émulsion. La quatrième phase consiste à évaluer l'effet de l'incorporation du bardeau sur les performances du mélange optimal.

La variation des teneurs en émulsion et en eau ainsi que la variation de la granulométrie du mélange ont eu un faible effet sur la vitesse de montée en cohésion. La perte par abrasion est inversement corrélée à la teneur en émulsion. L'analyse a montré également que la résistance aux déformations est inversement corrélée à la teneur en liant et à la surface spécifique du squelette granulaire. Un mélange de référence, à granulométrie moyenne, composé de 12,5% d'émulsion et 9% d'eau d'apport est sélectionné pour l'incorporation du bardeau. Celle-là a potentiellement modifié la granulométrie de mélange en une granulométrie plus fine.

L'essai d'abrasion humide et du sable adhérent peuvent être utilisés pour déterminer la teneur optimale en émulsion des mélanges « *slow set-slow traffic* ». Cependant, ces mélanges ne peuvent pas être testés selon la procédure de l'essai de déplacement latéral.

Mots clés : Microsurfaçage, mélange à froid, RAS, entretien des chaussées, cohésion des ECF.

VALORISATION DU BARDEAU D'ASPHALTE POSTCONSOMMATION POUR LES CHAUSSÉES NON REVÊTUES

MOHAMED AYMEN SALHI

ABSTRACT

The maintenance of gravel roads in the Gaspésie region is a major challenge due to difficult weather conditions and increased traffic. Microsurfacing using recycled asphalt shingles (RAS) is recommended to extend the lifespan of these roadways. However, in Quebec, the valorization of this material in road pavement remains low. In this context, the Inter-municipal Residual Materials Treatment Authority of Gaspésie entrusted the road and bituminous material laboratory to develop a microsurfacing asphalt mixture with optimal RAS content. This study focuses on the cold mix design following the procedures developed by the International Slurry Surfacing Association.

The first phase of the experimental program involves studying a reference mixture to evaluate the effect of content variation of mix elements. The second phase involves studying the impact of a modification in mix gradation. The third phase involves studying the effect of changing the emulsion type. The fourth phase aims to assess the effect of incorporating RAS on the performance of the selected optimal mixture.

The emulsion and water content variation as well as the gradation had a low effect on the mixture cohesion rise rate. The loss by abrasion is inversely correlated with the emulsion content. The analysis also showed that resistance to permanent deformations is inversely correlated with the binder content. RAS was incorporated in a reference mixture with medium gradation, consisting of 12.5% emulsion and 9% added water. This potentially modified the mixture gradation to a finer one.

The wet abrasion and sand adhesion tests can be used to determine the optimal emulsion content for "slow set-slow traffic" mixtures. However, these mixtures cannot be tested using the lateral displacement test procedure.

Keywords: Microsurfacing, cold mix, RAS, road maintenance, cold mix cohesion."

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 Revue de la littérature	3
1.1 Les chaussées non revêtues	3
1.1.1 Définition	3
1.1.2 Problématiques d'exploitation des chaussées non revêtues	5
1.1.2.1 Facteurs de détérioration	5
1.1.2.2 Dégradation des chaussées non revêtue	7
1.1.3 Entretien et réhabilitation.....	10
1.2 Les matériaux de chaussées	13
1.2.1 Granulats	13
1.2.2 Bitume.....	15
1.2.3 Émulsion de bitume	17
1.3 Enrobés coulés à froid (ECF) et enrobés de microsurfaçage	20
1.3.1 Généralités.....	20
1.3.2 Composition des ECF	22
1.3.3 Formulation des ECF de microsurfaçage.....	23
1.3.3.1 Méthode ISSA A143	23
1.3.3.2 Méthode ASTM D 6372.....	26
1.3.3.3 Méthode TTI 1289	28
1.4 Les bardeaux d'asphalte	29
1.4.1 La composition des bardeaux d'asphalte	30
1.4.2 Scénarios de valorisation des RAS	31
1.4.3 Propriétés de bitume composant les bardeaux	32
1.4.4 Les considérations durant la production et la construction.....	33
1.5 Performance des enrobés contenant des bardeaux d'asphalte	33
1.5.1 Évaluation quantitative des fissurations à basse température:	33
1.5.2 Performance mécanique des enrobés à chaud contenant des RAS :.....	35
CHAPITRE 2 Programme expérimental	39
2.1 Objectif de recherche	39
2.2 Organisation de la recherche	39
2.3 Matériaux.....	40
2.3.1 Granulats	40
2.3.2 Bardeaux d'asphalte.....	44
2.3.3 Comparaison des granulométries des bardeaux et granulats.....	46
2.3.4 Émulsion de bitume	46
2.4 Méthode de formulation et essai de validation	49
2.4.1 Essai de cohésion modifié ISSA TB 139	49
2.4.2 Essai d'abrasion humide ISSA TB 100	51
2.4.3 Essai de déplacement latéral ISSA TB 147.....	53

2.4.4	Essai du sable adhérent ISSA TB 109	54
2.5	Campagne expérimentale.....	55
CHAPITRE 3 Résultats et analyse		61
3.1	Étude d'un mélange de référence.....	61
3.1.1	Essai de cohésion	61
3.1.2	Essai d'abrasion humide.....	64
3.1.3	Essai de déplacement latéral.....	67
3.1.4	Essai du sable adhérent	69
3.1.5	Sommaire.....	70
3.2	Impact de la granulométrie sur les mélanges sans bardeau	71
3.2.1	Essai de cohésion	71
3.2.2	Essai d'abrasion	72
3.2.3	Essai de déplacement latéral.....	74
3.2.4	Essai du sable adhérent	75
3.2.5	Sommaire.....	76
3.3	Impact de type d'émulsion sur les mélanges sans bardeau.....	76
3.3.1	Essai de cohésion	76
3.3.2	Essai d'abrasion humide.....	78
3.3.3	Essai de déplacement et du sable adhérent.....	79
3.3.4	Sommaire.....	80
3.4	Effet de l'incorporation des bardeaux sur les performances du mélange optimal	81
3.4.1	Remarque préventive sur la pertinence des formules testées	81
3.4.2	Essai de cohésion (ISSA TB139) :.....	81
3.4.3	Essai d'abrasion humide (ISSA TB100) :.....	82
3.4.4	Essai de déplacement latéral et vertical (ISSA TB147).....	84
CONCLUSION		86
RECOMMANDATIONS.....		89
ANNEXE I Essais complémentaires de caractérisation		91
ANNEXE II Résultats des essais de la phase II (changement de granulométrie)		97
ANNEXE III Résultats des essais de la phase III (changement de type d'émulsion)		99
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		101

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1: Classification des composants minéraux selon la classe granulaire (Corté and Di Benedetto 2004).....	13
Tableau 1-2 : Les spécifications de la granulométrie des agrégats selon la méthode ISSA A143 (ISSA 2020).....	23
Tableau 1-3: Essai et propriétés des granulats selon la méthode ISSA (ISSA 2020)	24
Tableau 1-4: Essais et propriétés de l'émulsion selon la méthode ISSA (ISSA 2020).....	24
Tableau 1-5: Essais de vérification recommandés par la méthode ISSA pour le microsurfaçage (ISSA 2020).....	25
Tableau 1-6: Système de classement de la compatibilité recommandé par la méthode ISSA pour le microsurfaçage (ISSA 2019)	26
Tableau 1-7: Les spécifications de la granulométrie selon la méthode ASTM (ASTM 2015).....	27
Tableau 1-8: Essais de vérification recommandés par la méthode ASTM pour le microsurfaçage (Robati 2012).....	27
Tableau 1-9: Spécifications de la granulométrie selon la méthode TTI (Robati 2012)	28
Tableau 1-10: Les teneurs des composants de bardeau (Williams, Willis et al. 2019).....	31
Tableau 1-11: Propriété d'un bitume extrait des RAS (Noël, Perraton et al. 2006).....	33
Tableau 1-12: Teneur en bitume d'apport des mélanges ESG10 testés (Malo 2013).....	36
Tableau 2-1: Propriétés physiques des granulats	41
Tableau 2-2: Pourcentages du passant sur chaque tamis pour les granulométries testées.....	43
Tableau 2-3: Propriétés physiques des bardeaux	45
Tableau 2-4: Propriétés de l'émulsion EnviroColle d'après McAsphalt	47
Tableau 2-5: Essais de caractérisation complémentaires pour le résidu des émulsions	47
Tableau 2-6: Pénétrabilité moyenne de résidu des émulsions	48
Tableau 2-7: Résultats de l'essai DSR pour le résidu de l'émulsion CSS-1H.....	48

XIV

Tableau 2-8: Résumé des propriétés des résidus de l'EnviroColle et de CSS-1H.....	49
Tableau 2-9: Campagne expérimentale des phases I à III.....	58
Tableau 2-10: Campagne expérimentale de la phase IV (incorporation des RAS).....	59
Tableau 3-1: Composition des mélanges et valeurs de couple pour la combinaison (CSS-1H, GM).....	63
Tableau 3-2: Composition des mélanges et perte par unité de surface pour (CSS-1-H, GM).....	65
Tableau 3-3: Les valeurs de déplacement pour la granulométrie GM avec CSS-1H.....	68
Tableau 3-4: Compositions et masse du sable adhérent pour la Granulométrie GM avec CSS-1H.....	70
Tableau 3-5: Composition et masse du sable adhérent de G1 et M1 formulé avec CSS-1H.....	75

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1: Chaussée non revêtue (Le Vern 2016)	3
Figure 1-2: Profil en travers type d'une chaussée non revêtue (Le Vern 2016)	4
Figure 1-3: Processus de détérioration des chaussées non revêtues (Alzubaidi and Magnusson 2002)	5
Figure 1-4: Illustration d'une émulsion anionique et cationique (Yaacob, Hainin et al. 2013)	19
Figure 1-5: ECF fraîchement posé sur la surface de chaussée (SETRA 2005)	21
Figure 1-6: Composition typique des bardeaux d'asphalte (Williams, Willis et al. 2019)	30
Figure 1-7: Dispositif expérimental de l'essai d'émission acoustique (Arnold 2014)	34
Figure 1-8: Températures de fragilisations des mélanges en fonction de la teneur en RAS (Arnold 2014)	35
Figure 1-9: Résultats de l'essai de PCG sur les mélanges ESG10 (Malo 2013)	36
Figure 1-10: Résultats des essais d'orniérage sur les enrobés de surface ESG10 (Malo 2013)	37
Figure 2-1: Granulométrie des granulats 0-5 mm lavés	42
Figure 2-2: Courbes granulométriques des mélanges testés	44
Figure 2-3: Courbe granulométrique des bardeaux post-consommation de RITMRG	45
Figure 2-4: Granulométrie des bardeaux et granulats en comparaison avec le fuseau ISSA ..	46
Figure 2-5: Dispositif expérimental pour l'essai de cohésion	51
Figure 2-6: Dispositif expérimental de l'essai d'abrasion humide	52
Figure 2-7: Dispositif expérimental de l'essai de déplacement	54
Figure 3-1: Classification des mélanges par l'essai de cohésion (ISSA 2017)	62
Figure 3-2: Résultats de l'essai de cohésion des mélanges à Granulométrie GM et émulsion CSS-1H	64

Figure 3-3: Perte par abrasion de la granulométrie GM avec CSS-1H (E : Émulsion, W : eau).....	66
Figure 3-4: La direction de déplacement latéral et vertical à considérer	67
Figure 3-5: Les valeurs de déplacement latéral et vertical de GM avec CSS-1H (E : Émulsion, W : eau)	69
Figure 3-6: Comparaison des mesures de couple après 60 min des mélanges à Granulométrie GG et GM.....	72
Figure 3-7: Perte par abrasion de GG vs GM avec CSS-1H après 1-h d'imbibition (E : Émulsion, W : eau)	73
Figure 3-8: Valeurs de déplacement latéral de GG vs GM avec CSS-1H après 1000 cycles (E : Émulsion, W : eau).....	74
Figure 3-9: Valeurs de déplacement vertical de GG vs GM avec CSS-1H après 1000 cycles (E : Émulsion, W : eau).....	75
Figure 3-10: Cohésion de GM avec CSS-1H vs EnviroColle après 60 min	77
Figure 3-11: Différence entre un mélange préparé avec EnviroColle (à gauche) et CSS-1H (à droite)	78
Figure 3-12: Perte par abrasion de GM avec CSS-1H vs EnviroColle après 1-h d'imbibition (E : Émulsion, W : eau).....	79
Figure 3-13: Différence entre deux échantillons préparés avec CSS-1H et EnviroColle.....	80
Figure 3-14: Résultats de l'essai de cohésion des mélanges avec RAS	82
Figure 3-15: Résultats de l'essai d'abrasion des mélanges avec RAS.....	83
Figure 3-16: Résultats de l'essai de déplacement des mélanges avec des RAS	85

INTRODUCTION

L'entretien des nombreuses chaussées non revêtues dans la région de Gaspésie représente un défi majeur. Ces routes sont primordiales pour le développement économique et la connectivité des différentes communautés rurales, elles font face à des conditions climatiques difficiles et à des sollicitations du trafic intensifié par la faible portance de ce type de chaussées. Ceci entraîne une dégradation progressive qui gêne les utilisateurs et qui peut amener à la reconstruction de la route. L'état d'une route s'évalue par l'indice de condition de la chaussée (*Pavement condition index (PCI)*, qui varie au cours de la durée de vie de la chaussée en fonction de la nature de l'entretien appliqué (préventif ou curatif), comme présenté dans la Figure 0-1.

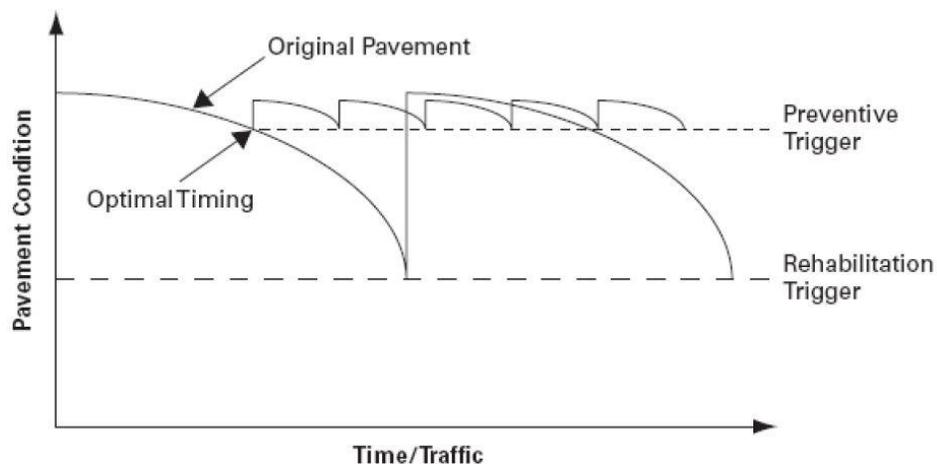


Figure 0- 1: Indice de la condition de la chaussée (Ong, Nantung et al. 2010)

Un entretien préventif est la meilleure solution à envisager pour prolonger la durée de vie d'une chaussée, car il est généralement admis que ces coûts sont inférieurs d'environ un ordre de grandeur par rapport aux travaux de réhabilitation. Le microsurfaçage compte parmi les entretiens préventifs les plus efficaces pour préserver l'état des chaussées non revêtues. Il consiste à appliquer une couche de protection et d'imperméabilisation. Des études antérieures ont montré que l'incorporation des matériaux résiduels dans ce type d'enrobée est toujours possible (Noël, Perraton et al. 2006, Ddamba 2011, Malo 2013, Garfa 2018).

Le bardeau d'asphalte post-consommation, produit par la reconstruction des toitures des bâtiments résidentiels, est un matériau qui est faiblement valorisé au Québec en comparaison avec d'autres pays comme les États-Unis qui recyclent chaque année 12,6 millions de tonnes de bardeau principalement dans les enrobés. La production des bardeaux post-consommation au Québec est estimée à plus de 200 000 tonnes par année. Dans un contexte de développement durable, les gestionnaires des matériaux résiduelles cherchent toujours à valoriser ce matériau. La Régie Intermunicipale de Traitement des Matières Résiduelles de Gaspésie (RITMRG) a confié au laboratoire de chaussée et des matériaux bitumineux (LCMB) la formulation d'un enrobé de microsurfaçage à teneur optimale en bardeaux d'asphalte. Le matériau formulé servira à entretenir et préserver les chaussées non revêtues de la région.

Ce mémoire se concentre sur la formulation à froid d'un enrobé bitumineux en incorporant les bardeaux de RITMRG. Cependant, une autre étude au sein de LCMB va traiter de la formulation à chaud.

Le premier chapitre est une revue de la littérature qui renseigne sur les méthodes de formulation des enrobés à froid et leurs composants. Il renseigne également sur les propriétés des bardeaux d'asphalte et leur utilisation dans les enrobés. Il traite également des problématiques liées à l'exploitation des chaussées non revêtues.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés et à la description des essais réalisés. Il présente la composition des mélanges testés et les phases de la campagne expérimentale.

Le troisième chapitre présente les résultats des essais et analyse les comportements des mélanges en fonction de leur composition.

La conclusion résume la méthodologie utilisée durant les travaux effectués et résume les résultats clés de la recherche.

CHAPITRE 1

Revue de la littérature

1.1 Les chaussées non revêtues

1.1.1 Définition

Une chaussée non revêtue se distingue des autres types de chaussées conventionnelles (souples et rigides) par l'absence d'un revêtement de protection contre les sollicitations au niveau de la surface. Les véhicules circulent directement sur une couche de roulement formée par des matériaux granulaires non traités (Figure 1-1) (Le Vern 2016).



Figure 1-1: Chaussée non revêtue (Le Vern 2016)

Généralement, les chaussées non revêtues sont faiblement sollicitées. Pour des raisons économiques, elles ne sont pas pavées. Cependant, elles forment des routes de campagne et d'accès aux ressources qui supportent un trafic forestier et minier. Ceci peut induire d'importantes sollicitations (Le Vern 2016).

Le profil en travers type se limite généralement à une couche granulaire posée sur une couche de fondation en pierre concassée. Ces deux couches sont supportées par une couche de sous-fondation en sable qui repose elle-même sur le sol de fondation (Figure 1-2)

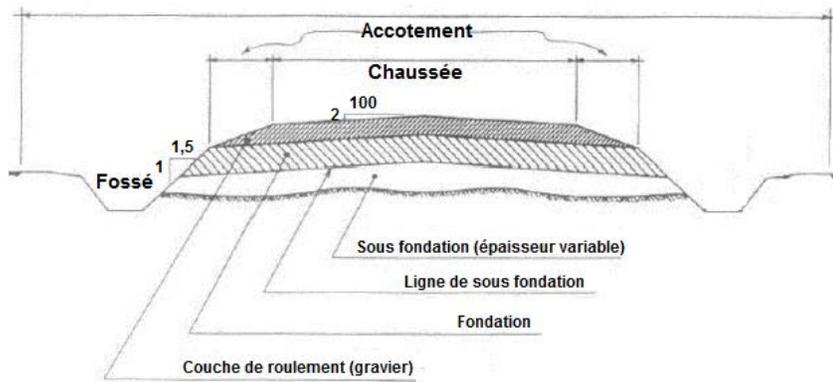


Figure 1-2: Profil en travers type d'une chaussée non revêtue (Le Vern 2016)

Les chaussées non revêtues se classent en trois sous-catégories selon les conditions de circulation :

- **La piste naturelle :**

C'est un chemin d'accès qui n'a subi aucun aménagement particulier. Le trafic roule sur le sol de fondation en suivant le moins mauvais tracé formé par des véhicules précédents. Les conditions naturelles du site influent largement sur le niveau de service de ces pistes. Ces voies sont généralement saisonnières. Elles ne sont pas exploitables durant les saisons de pluies vu l'absence partielle ou totale du drainage routier (Autret, 1997). La vitesse moyenne sur ces pistes est de l'ordre de 25 à 50 km/h (Lo and Ndiaye 2009).

- **La route en terre (piste améliorée) :**

C'est une route distinguable des pistes naturelles par des aménagements sommaires qui servent à améliorer le tracé au niveau des points critiques. Ces interventions se résument en quelques ouvrages de franchissements et des travaux d'assainissement (Autret, 1997). La construction d'une route en terre est généralement pour des activités agricoles saisonnières. La circulation est réservée pour les véhicules tout-terrain. Le trafic peut rouler à une vitesse moyenne de 50 à 60 km/h (Lo and Ndiaye 2009).

- **La route élaborée non revêtue :**

C'est une route qui présente toutes les caractéristiques d'une chaussée conventionnelle sauf une couche de revêtement. Le profil en long, en travers et le tracée en plan sont aménagés tout au long de la route pour assurer une circulation permanente du trafic. Une couche granulaire

de roulement et des couches de fondations forment la structure de chaussée. Le drainage latéral et longitudinal est assuré par des fossés et des dalots au niveau des intersections avec les cours d'eau (Autret, 1997). La route est exploitable par les véhicules légers qui peuvent rouler à une vitesse moyenne de 80 à 100 km/h (Lo and Ndiaye 2009).

1.1.2 Problématiques d'exploitation des chaussées non revêtues

1.1.2.1 Facteurs de détérioration

La détérioration est l'aggravation progressive de l'état d'une route sous les actions combinées du trafic et de l'environnement. Elle est en relation directe avec le comportement des matériaux routiers et la capacité de drainage (Alzubaidi and Magnusson 2002).

Les facteurs qui influent sur le processus de dégradation d'une route non revêtue (trafic, géométrique, physique, météorologique) rendent difficile d'établir un modèle mathématique empirique fiable qui décrit le processus global de détérioration. La Figure 1-3 résume le processus de détérioration. Les dégradations les plus communes sont : insuffisance du système de drainage, poussière, nids-de-poule, orniérage, ondulation, dégradation due au gel, arrachement du granulat (Alzubaidi and Magnusson 2002).

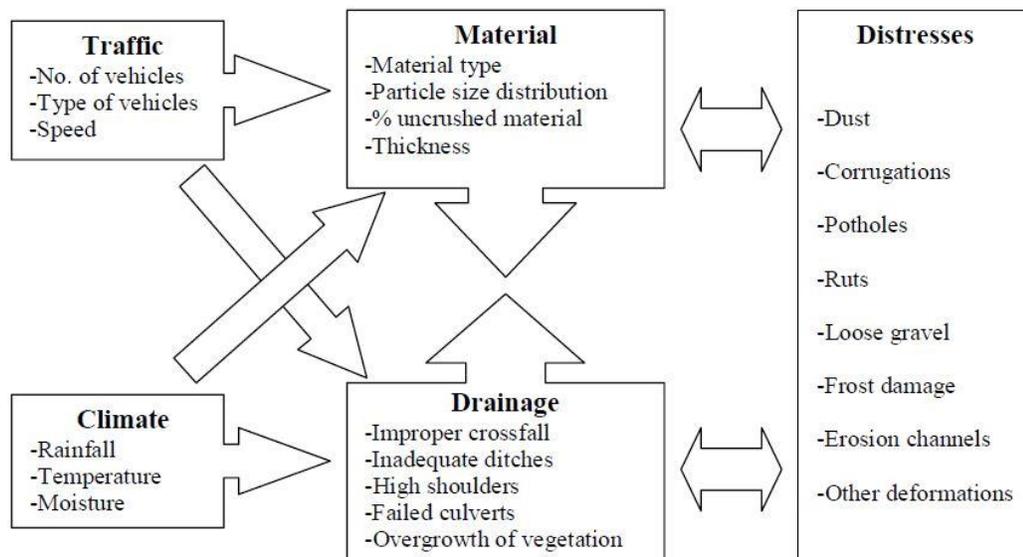


Figure 1-3: Processus de détérioration des chaussées non revêtues (Alzubaidi and Magnusson 2002)

- Facteurs liés au trafic :

Ces facteurs se résument principalement en volume, nature et vitesse du trafic. Les coûts de maintenance sont corrélés avec le volume de trafic. En effet, un flux plus large de trafic induit un arrachement des matériaux plus importants. L'indice international de rugosité (IRI) peut augmenter de 5 m/km pour une nouvelle route jusqu'à 20 m/km durant quelques semaines si le volume de trafic est important (Alzubaidi and Magnusson 2002).

Si le trafic est composé par des poids lourds, l'usure sur la surface de chaussée sera plus importante surtout pendant les périodes de dégel. Les véhicules légers qui circulent à une vitesse de 80 km/h ne produisent pas des ondulations même après un grand nombre de passages. Cependant, les camions peuvent provoquer de graves ondulations après seulement 100 passages (Alzubaidi and Magnusson 2002).

La quantité de la poussière émise est corrélée à la vitesse des véhicules. La perte annuelle des agrégats est plus importante si les véhicules circulent à des vitesses élevées.

- Facteurs géométriques :

Ces facteurs se résument principalement en la largeur de la route, les alignements verticaux et horizontaux et le profil en travers. Une route plus large nécessite une quantité des matériaux plus importante. Le trafic sur une route moins étroite doit circuler sur une surface moins large. Ceci induit plus de trafic sur une seule voie. De plus, la largeur insuffisante de la route limite les équipements de maintenance (Alzubaidi and Magnusson 2002).

Une route sinueuse exige un entretien complexe. En effet, les contraintes sont plus élevées dans les courbes et donc les matériaux de la structure de chaussée sont plus susceptibles à l'arrachement. Sur une route vallonnée, la circulation peut causer un déplacement des graviers de la couche de roulement vers des points plus bas. Les eaux pluviales peuvent donc causer l'érosion des matériaux déplacés (Alzubaidi and Magnusson 2002).

- Facteurs physiques :

Ce sont les propriétés des agrégats, la forme et la taille des particules, comportement vis-à-vis de cycle gel-dégel et topographie du terrain. La nature des agrégats utilisée comme couche de roulement influe largement sur la résistance à l'arrachement et à l'usure. En effet, une couche en sable se dégrade 20 fois plus vite qu'une couche en agrégats latéritique (Alzubaidi and Magnusson 2002).

Les particules angulaires ont un frottement interne plus important que les particules arrondies. Cela empêche le mouvement entre particules et donc limite les déformations. La roche concassée est préférable aux granulats naturels. De plus, la densité d'une couche formée par des particules de forme irrégulière est plus importante que celle formée par des particules arrondies (Alzubaidi and Magnusson 2002).

La couche de roulement en gravier doit satisfaire aux trois exigences suivantes: une capacité portante maximale, cohésion maximale en temps sec et nivellement mécanique satisfaisant de la surface. Par conséquent, la granulométrie des agrégats doit respecter un fuseau granulométrique prédéfinie. La taille maximale des particules ne doit pas dépasser 20 mm pour réduire les dégâts causés par l'arrachement des granulats (Alzubaidi and Magnusson 2002). De plus, une teneur en vide minimale est souhaitable puisque la densité influe largement sur les propriétés élastiques d'un matériau granulaire non lié.

Une structure routière contenant des matériaux susceptibles au gel ou proche d'une nappe phréatique se dégrade plus rapidement qu'une structure formée par des agrégats grossiers dans un milieu sec (Alzubaidi and Magnusson 2002).

- Facteurs météorologiques

Ils se résument en la précipitation, la température, l'humidité et l'exposition à la neige.

Une précipitation minimale nécessite un contrôle de poussière tandis qu'un excès des eaux pluviales diminue la résistance aux actions de trafic et érode la surface. Ceci induit la formation des nids-de-poule. Une température élevée accélère le séchage de la surface non revêtue et donc entraîne le dégagement de poussière tandis que des températures basses entraînent la formation des lentilles de glace qui entraîne des dégradations majeures au niveau de la surface de roulement (Alzubaidi and Magnusson 2002).

1.1.2.2 Dégradation des chaussées non revêtue

- Capacité de drainage insuffisante :

Les différents aspects de l'insuffisance de drainage se résument en : dévers inapproprié ou insuffisant, des accotements élevés, des fossés inadéquats avec une prolifération de végétation et des dalots effondrés (Alzubaidi and Magnusson 2002). Les chaussées non revêtues tendent à être plus inégale que les routes conventionnelles donc l'eau s'écoule plus lentement, pour cela

le dévers doit être légèrement plus raide que sur les routes revêtues. Les accotements élevés sont généralement le résultat de l'accumulation des agrégats lâche et d'amas de terre, ils empêchent l'eau de s'écouler dans les fossés donc il coule tout au long de la route et reste retenues sur les sections horizontales ce qui peut induire la création des nids-de-poule sous l'action du trafic (Alzubaidi 1999).

- Poussière :

La poussière est un ensemble des particules de diamètre inférieur à 0,075 mm (Alzubaidi 1999), le phénomène de poussière peut être considéré comme une forme d'érosion du sol, elle peut créer des problèmes environnementaux et de sécurité. La quantité de poussière dans l'atmosphère émise par les routes non revêtues dépend de plusieurs facteurs : la vitesse et le nombre des véhicules, les propriétés des granulats qui forment la couche de roulement, le degré de compaction des couches et le climat (Edvardsson 2009) .

- Ondulation de la surface :

Les ondulations sont des crêtes et des vallées transversales étroitement espacées à intervalles réguliers, ils entraînent une conduite inconfortable et un risque pour la sécurité, la hauteur des vagues est la différence de hauteur entre les vallées et les crêtes qui varie de quelque centimètres à 10-20 centimètres (Alzubaidi 1999), les matériaux qui forment la couche de roulement se décomposent progressivement sous l'action du trafic et du sable se forme ce qui induit une sensibilité à la formation des ondulations (Autret and Brousse 1998). Elles se forment généralement sur les pentes, les courbes et les zones d'accélération ou de décélération. Les roues projettent une partie du matériau non lié sous la forme d'un nuage de poussière et rattrapent le reste, ceci implique que les particules intermédiaires s'accumulent dans les crêtes des ondulations et lui donne une composition sableuse graduée, les particules les plus grosses peuvent rouler, si elles ont une forme arrondie, et ne peuvent pas rester sur les crêtes (Alzubaidi and Magnusson 2002).

- Nids-de-poule :

Les nids-de-poule sont des dépressions en forme de bol dans la surface de moins de 0,5 m de diamètre. Leur profondeur varie entre 3 et 7 cm (Alzubaidi and Magnusson 2002). Ils se forment lorsque le matériau de surface est arraché ou délogé sous les sollicitations du trafic, l'accumulation de l'eau à l'intérieur de ces trous aggrave la détérioration, la route continue à

se désintégrer en raison de la perte de matériau de surface et de la formation de point faible dans le sol sous-jacent. Les nids-de-poule qui présentent une profondeur de plus de 10 cm sont un indicateur d'un manque de résistance ou d'une mauvaise conception (Alzubaidi and Magnusson 2002). Ils se forment généralement sur les sections horizontales, dans les dépressions et dans les sections où la route est susceptible à former des ondulations (Alzubaidi 1999).

- Orniérage :

L'orniérage est une dépression dans la trajectoire des roues qui est parallèle à l'axe de la chaussée. Les ornières influent largement le confort du conducteur puisque les pneus tendent à les suivre (Alzubaidi and Magnusson 2002). Les formes et le caractère des ornières varient en fonction de la cause de l'orniérage. Les déformations peuvent se produire dans le sol de fondation, la couche de surface ou la couche de la base. Si la plateforme a une capacité portante insuffisante, une déformation permanente se produit dans la structure de la route. La couche de base et la couche de surface peuvent être déplacées et surélevées de chaque côté de l'ornière. La charge de trafic peut également donner lieu à un compactage et un déplacement de matériaux au niveau de la couche de roulement (Alzubaidi 1999). Les ornières peuvent accumuler de l'eau et induire d'autres dégradations. Ils peuvent être classés sous trois catégories : des ornières mineures (moins de 3 cm de profondeur) peuvent être une indication d'un volume de trafic élevé et se produisent à la suite d'un délogement de la circulation, les ornières entre 3 et 7 cm sont un indicateur des limites de résistance liées à la couche de roulement, les ornières importantes (plus que 7 cm de profondeur) peuvent indiquer une épaisseur de couche ou une capacité portante insuffisante (Alzubaidi and Magnusson 2002).

- Gravier lâche :

L'arrachement des granulats forme une quantité excessive de matériau meuble à la surface. Sous l'action du trafic, ce gravier peut s'accumuler entre les passages des pneus et les accotements. Ceci crée un risque de circulation et réduit la capacité de drainage (Alzubaidi 1999). Des accumulations de granulats lâches d'une hauteur supérieure à 10 cm indiquent une couche de roulement médiocre (Alzubaidi and Magnusson 2002).

- Susceptibilité au cycle de gel-dégel

Les détériorations causées par ce cycle sont les suivantes : le soulèvement dû au gel, le ramollissement causé par le dégel, l'ébullition due au gel et la migration des pierres (Alzubaidi 1999). La principale cause du soulèvement est la migration de l'eau vers la zone de gel et sa congélation en glace. Ceci entraîne la formation de couches de glace superposées ayant des épaisseurs variables (Le Vern 2016). Plus le niveau d'eau souterraine est élevé, plus l'eau s'écoule rapidement vers la zone de congélation, plus la croissance des couches de glace est rapide et plus le soulèvement par le gel est important.

Lorsque l'eau gèle, elle se dilate et l'expansion a lieu vers le haut. L'élévation totale peut varier entre 20 et 50 cm (Alzubaidi and Magnusson 2002). Les sols les plus susceptibles au gel sont les limons et les moraines à grains fins (Alzubaidi and Magnusson 2002). Lorsque le sol dégèle, les couches de glace formées se fondent et une quantité d'eau. La chaussée perd donc sa capacité portante et des fissures se produisent (Le Vern 2016).

L'ébullition de gel prend naissance au plus profond de la structure de chaussée. Sous l'action du trafic lourd, l'eau et les particules fines sont évacuées à travers la surface de la chaussée. La migration des pierres dépend de la sensibilité du sol au gel (Alzubaidi and Magnusson 2002). Durant le cycle de gel, une couche de glace se forme autour de la pierre, ce qui augmente son volume et force la pierre à se déplacer vers le haut. Durant le cycle de dégel, la glace se fond et les fines remplissent le vide autour de la pierre. Ceci l'empêche de reprendre sa position initiale et détériore la surface de roulement (Alzubaidi and Magnusson 2002).

1.1.3 Entretien et réhabilitation

Les méthodes appliquées pour l'entretien et la réhabilitation des chaussées non revêtues sont similaires dans la plupart des pays. Le but de l'entretien est de garder la surface de roulement libre de poussière et uniforme et d'assurer le drainage de la structure. L'objectif est donc d'assurer le confort et la sécurité de conducteur tout au long de la durée de vie de la chaussée. La réhabilitation des routes non revêtues se concentre majoritairement sur la couche de roulement. Les principales mesures comprennent le dépoussiérage, le nivellement, le rechargement, l'arrosage, le rapiécage et l'amerrissage. La méthode à appliquer dépend largement du degré de détérioration de la chaussée.

- Dépoussiérage

Il s'agit d'une intervention couteuse qui peut couvrir jusqu'à 30% des frais de maintenance. Cependant, elle peut réduire les couts de réhabilitation à long terme. Le contrôle de la poussière permet au matériau de la couche de roulement de conserver sa composition plus longtemps. La route peut donc garder son état sans nivellement ou rechargement (Alzubaidi 1999).

Le dépoussiérage peut être selon trois méthodes :

- Une méthode chimique où des agents sont épandus ou ajoutés à la chaussée. Les agents peuvent être des sels comme le chlorure de calcium CaCl_2 , le chlorure de magnésium MgCl_2 ou le chlorure de sodium NaCl . Ils peuvent être également des liants bitumineux ou des produits chimiques organiques tels que la lignine (Edvardsson 2009).
- Une méthode mécanique qui prend en considération le problème de poussière dès la phase de la conception de la chaussée. Elle consiste à utiliser une feuille filtrante ou un matériau de surface sans poussière dans la structure de la route (Alzubaidi 1999).
- Une méthode administrative qui consiste à imposer une limite de vitesse. L'émission de poussière peut diminuer de 40% en passant d'une vitesse de 40 mph à 35 mph (Alzubaidi 1999).

- Nivellement

Le nivellement est une opération qui vise à restaurer la planéité de la surface d'une route. C'est l'entretien le plus critique pour une route non revêtue. Pendant cette opération, la route est nivelée en passant un engin dans chaque direction. La cambrure et le dévers de la route sont ajustés grâce à un nivellement en profondeur. En effet, une lame coupe la route selon un angle approprié. Le matériau ainsi retiré est ensuite utilisé pour ajuster la forme de la route et rendre la couche de roulement uniforme. Le nivellement de la surface permet également d'éliminer les touffes d'herbe qui réduisent la capacité de drainage au niveau des accotements. Cela contribue à améliorer le système de drainage de la route en permettant une évacuation plus efficace de l'eau. (Autret and Brousse 1998).

- Rechargement

L'objectif de rechargement est de donner à la couche de roulement une épaisseur suffisante et une bonne répartition granulométrique. La courbe granulométrique de la couche de roulement doit être conforme à la courbe idéale et avoir une teneur en matériaux fins suffisante. Un rechargement spécial est appliqué en connaissant la granulométrie de la couche de roulement et en ajoutant les fractions granulaires manquantes pour avoir la courbe idéale qui respecte le fuseau granulaire. Avant le rechargement, une évaluation de la capacité de drainage est nécessaire pour éviter l'érosion du matériau ajouté et donc diminuer la fréquence de l'intervention (Alzubaidi 1999).

- Arrosage

L'arrosage sert à réduire le broyage du granulat et de maintenir l'efficacité du traitement anti-poussière. Si la route n'est pas suffisamment humidifiée lors de l'application des sels de dépoussiérage, l'intervention n'affecte que la surface de la couche de roulement. Ceci peut entraîner des risques de corrugation et de formation de nids-de-poule. D'autre part, un grand excès d'eau pendant le nivellement peut causer la ségrégation des granulats et une difficulté de compactage. Ceci favorise l'orniérage de la chaussée (Alzubaidi 1999). Maintenir un équilibre lors de l'arrosage et du nivellement est important. La quantité d'eau utilisée doit être suffisante pour réduire le broyage et maintenir l'efficacité du traitement anti-poussière. Cependant, un excès d'eau peut causer des problèmes de ségrégation et de compactage.

- Rapiéçage

Le rapiéçage est souvent recommandé après le nivellement si le nombre de nids-de-poule est limité ou s'ils sont trop larges. Lors du rapiéçage, les agents de dépoussiérage sont ajoutés au matériau utilisé afin d'éviter les pertes de poussière.

Afin de compenser le compactage causé par le trafic, il est conseillé d'utiliser un excès de matériau pour remplir les nids-de-poule. (Alzubaidi 1999).

- Amerrissage

Les fossés sont l'élément le plus important dans le système de drainage des routes non revêtues. S'ils sont détériorés, la capacité portante de la route est compromise. L'amerrissage est la construction de nouveaux fossés et le dégagement des fossés obstrués. Ceci consiste à corriger leur forme et de les débarrasser des végétations et des débris qui peuvent les obstruer. Le sol retiré des fossés peut contenir des métaux lourds et d'autres substances contaminantes. Par

conséquent, toute matière dangereuse doit être traitée conformément aux règlements en vigueur. (Alzubaidi 1999).

1.2 Les matériaux de chaussées

1.2.1 Granulats

Les granulats présentent environ 95% de la masse et 80 à 85% du volume d'un enrobé bitumineux conventionnel. Ceci implique que les propriétés des agrégats utilisés dictent les caractéristiques mécaniques d'un mélange bitumineux. Les granulats désignent l'ensemble des sables, gravillons ou pierres concassées. Ils peuvent avoir un aspect arrondi et lisse s'ils sont creusés directement à partir d'un gisement. Ils peuvent également être anguleux et concassés s'ils sont extraits d'une roche compacte. Selon leur aspect, leur utilisation peut être en vrac (brut ou tout-venant) sans aucune modification. Ils peuvent également être traités (concassage, tamisage, lavage, ajout de matériaux) pour viser une granulométrie qui convient avec le domaine d'utilisation (Corté and Di Benedetto 2004).

La taille d et D , qui désigne respectivement la taille de plus petite et de plus grands grains qui constituent le mélange granulaire, définit la classe granulaire d/D (Hunter, Self et al. 2015). Selon cette classe, les composants minéraux pour la formulation des enrobés sont classés. Le Tableau 1-1 présente une classification selon la classe granulaire des mélanges.

Tableau 1-1: Classification des composants minéraux selon la classe granulaire (Corté and Di Benedetto 2004)

Désignation retenue	Type de composants minéraux	Classes granulaires élaborées (possibles)
Granulats	Pierres concassées, ballast	> 22
	Gravillons	2/4 ; 4/8 ; 6/8, 8/11 ; 11/16 ; 16/22
	Sables	0/2, ou 0/4
Filler	Filler, fines ou farine de pierre	$\leq 0,063$; $\leq 0,080$ ou $\leq 0,090$

Les caractéristiques des granulats se résument en;

- Caractéristique géométrique :

Pour que le squelette granulaire puisse supporter les charges du trafic et les transmettre à travers les différentes couches de la chaussée jusqu'au sol de support, les agrégats doivent présenter une forme, une angularité et une surface appropriées. De plus, la dureté des arêtes géométriques et la résistance à la rupture des roches utilisées sont également des critères importants à évaluer. Ces caractéristiques sont essentielles pour limiter l'effet du trafic sur l'aspect géométrique des granulats. En effet, elles assurent la résistance au déplacement au sein d'un mélange bitumineux. (Corté and Di Benedetto 2004).

- Résistance aux efforts :

La structure de chaussée subit des sollicitations et des déplacements considérables. La résistance des couches à ses efforts est liée au comportement mécanique du squelette granulaire. Plusieurs essais peuvent évaluer ces comportements. L'essai *Los Angeles* renseigne sur la résistance aux chocs en mesurant la fragmentation des granulats (Hunter, Self et al. 2015); des boules métalliques fragmentent un échantillon et la quantité des fines de taille inférieures à 1,6 mm est mesurée. Des mesures inférieures à 18% impliquent un matériau très résistant aux chocs (Corté and Di Benedetto 2004). L'essai Micro-Deval renseigne sur la résistance à l'usure. Un échantillon est soumis à une charge abrasive par des billes en acier durant 15 min puis la masse des particules de taille inférieure à 1,6 mm est mesurée. Le coefficient micro-Deval ne doit pas être supérieur à 15% pour les granulats qui forment les couches de roulement (Corté and Di Benedetto 2004).

- Susceptibilité au gel :

La susceptibilité des granulats au gel est effectivement liée à leur porosité et à leur degré de fissuration. La résistance au gel des granulats peut être évaluée en les soumettant à des cycles de gel-dégel répétés. Cette évaluation est réalisée en exposant les granulats à des températures qui varient généralement de -17,5 à +20°C. Le processus de test comprend généralement 10 cycles de gel-dégel successifs. Pendant ces cycles, les granulats subissent des changements de température répétés. Ceci peut provoquer la formation de particules fines. À la fin du processus, le pourcentage des particules fines formées est déterminé. (Corté and Di Benedetto 2004).

- Compatibilité avec le liant hydrocarboné :

La compatibilité entre granulat et bitume est essentielle pour s'assurer de l'adhésivité et de la cohésion du mélange. Elle dépend de la polarité de la surface des granulats et de sa porosité et propreté. Les granulats calcaires, qui ont une nature basique, présentent généralement une meilleure adhésivité avec le bitume que les granulats siliceux, qui ont une nature acide. (Corté and Di Benedetto 2004). La propreté des granulats est un autre aspect crucial. La présence d'impuretés, telles que les fines (particules de petite taille), peut affecter l'adhésivité et la cohésion du mélange bitumineux. L'essai d'équivalent de sable est souvent utilisé pour évaluer la propreté des granulats en mesurant la floculation des fines. Le filler est un matériau finement broyé ajouté au mélange bitumineux. Il joue également un rôle important. En raison de sa surface spécifique importante qui s'élève à 1000 m²/kg, il peut absorber une quantité significative de liant bitumineux et contribuer à la résistance à l'orniérage. Il est essentiel que le filler soit propre avec une faible teneur en argile (Corté and Di Benedetto 2004).

1.2.2 Bitume

Le bitume est un produit obtenu par distillation du pétrole. C'est la fraction la plus lourde et visqueuse du pétrole brut. Il constitue un liant hydrocarboné largement utilisé dans la construction routière en remplaçant le goudron utilisé auparavant. Le bitume présente une composition chimique complexe avec des hydrocarbures aromatiques, des résines et des asphaltènes. Ces composants confèrent au bitume ses propriétés adhésives et cohésives essentielles pour assurer une liaison solide avec les composants minéraux de la route. Cette interaction permet de former un mélange bitumineux à une résistance importante face aux diverses sollicitations auxquelles il est soumis. (Corté and Di Benedetto 2004).

Le bitume est principalement constitué de molécules d'hydrocarbures. Il est constitué également de quelques espèces hétérocycliques et des groupes fonctionnels avec des atomes de soufre, d'azote et d'oxygène. La composition chimique du bitume peut être divisée en deux groupes : les asphaltènes et les maltènes. Les maltènes, à leur tour, peuvent être subdivisés en trois catégories : les composés aromatiques, les résines et les composés saturés. (Hunter, Self et al. 2015)

Les propriétés de bitume peuvent être modifiées par l'ajout d'autre composant afin de répondre à des conditions d'emploi spécifique. Plusieurs catégories peuvent être énumérées selon le composant ajouté (Corté and Di Benedetto 2004):

- Les bitumes purs, spéciaux, modifiés ou naturels.
- Les bitumes industriels ou oxydés.
- Les bitumes fluidifiés ou fluxés (cutback).
- Les bitumes en émulsion.

Les deux premières catégories ne peuvent être utilisées qu'à des températures supérieures à 130°C. La formulation avec ces types de bitumes est principalement réalisée à chaud. La catégorie des bitumes traités avec des fluidifiants peut être utilisée à des températures inférieures à celles des bitumes conventionnels, variant entre 25 et 100°C. La catégorie des émulsions bitumineuses est principalement destinée à la formulation et au recyclage à froid. Le bitume est traité avec des émulsifiants qui réduisent considérablement sa viscosité pour qu'il puisse être utilisé à des températures inférieures à 60°C (Corté and Di Benedetto 2004). Les propriétés des bitumes utilisés sont définies par des normes de l'industrie variant d'un pays à l'autre. La densité du bitume est principalement utilisée pour convertir les quantités exprimées en volume. Pour des températures comprises entre 15 et 25°C, elle est mesurée à l'aide d'un pycnomètre et se situe généralement entre 1,00 et 1,10 (Corté and Di Benedetto 2004). Elle dépend de son origine et de sa classification. La densité de bitume est inversement proportionnelle à la température. Pour des températures élevées, elle peut être mesurée à l'aide d'un densimètre électronique.

Une autre propriété importante est la chaleur spécifique du bitume. Elle varie généralement entre 1,7 KJ/kg/°C à 0°C et 2,09 KJ/kg/°C à 25°C. Cette valeur est relativement faible par rapport à la chaleur spécifique de l'eau, qui est d'environ 4,18 KJ/kg/°C (Corté and Di Benedetto 2004). Cela implique la nécessité d'une quantité modérée d'énergie pour chauffer le bitume à une température utile. Cependant, sa conductivité thermique est d'environ 0,163 W/m.°C (Corté and Di Benedetto 2004). Des surfaces de chauffage étendues sont donc nécessaires pour atteindre les températures requises pour l'enrobage.

Le comportement mécanique du bitume dépend à la fois de la température et de la durée de chargement. Par conséquent, les résultats de tout test sur le bitume doivent être interprétés en

tenant compte de ces deux facteurs. Une large gamme d'essais de caractérisation est normalisée conformément aux règles de l'industrie.

L'essai de pénétration est l'un des premiers tests développés pour caractériser les propriétés des bitumes. Il consiste à faire pénétrer une aiguille de dimensions spécifiées dans un échantillon de bitume sous une charge connue, à une température fixe et pendant une durée déterminée. La pénétration est exprimée en décimillimètres (1 dmm = 0,1 mm). Elle correspond à la distance à laquelle une aiguille standard pénètre verticalement dans l'échantillon de bitume dans des conditions spécifiques de température, de charge et de durée de chargement. (Hunter, Self et al. 2015). L'essai de point de rupture de Fraass est l'un des rares essais qui permettent de caractériser le comportement des bitumes à très basse température (-30°C). C'est un outil de recherche qui détermine la température à laquelle le bitume atteint une rigidité critique (Hunter, Self et al. 2015).

La viscosité est une propriété physique du bitume qui mesure sa résistance à l'écoulement. Elle représente le rapport entre la contrainte de cisaillement appliquée et le taux de déformation de cisaillement. Différents types de viscosimètres et de rhéomètres sont utilisés pour déterminer le comportement d'écoulement du bitume dans diverses conditions. Une méthode fondamentale pour mesurer la viscosité consiste à utiliser un viscosimètre à plaque. Ce dispositif évalue la contrainte de cisaillement (exprimée en Pa) et le taux de déformation (exprimé en s⁻¹) d'un film mince de bitume placé entre deux plaques planes. Les rhéomètres à cisaillement dynamique sont également utilisés pour caractériser le comportement viscoélastique des bitumes. Ils permettent d'étudier les propriétés viscoélastiques telles que le module de cisaillement complexe, la viscosité complexe et le module de stockage (Hunter, Self et al. 2015).

1.2.3 Émulsion de bitume

D'un point de vue chimique, une émulsion est un système fluide colloïdal dans lequel des gouttelettes d'un liquide sont dispersées dans un autre liquide non miscible. Une émulsion est symbolisée par H/E si la phase continue est une solution aqueuse (généralement de l'eau). Elle est symbolisée par E/H si la phase continue est un liquide organique (généralement de l'huile).

Des émulsions plus complexes, telles que H/E/H, sont également possibles (Hunter, Self et al. 2015).

Les émulsions de bitume sont des systèmes fluides hétérogènes à deux phases composées de deux liquides non miscibles : le bitume et l'eau. Ces deux liquides sont mélangés et stabilisés par l'ajout d'un émulsifiant. Dans une émulsion de bitume, le bitume est dispersé sous forme de particules discrètes dans toute la phase aqueuse. Les particules de bitume ont généralement un diamètre compris entre 1 et 10 μm (Hunter, Self et al. 2015) Elles sont maintenues en suspension grâce aux charges électrostatiques transmises par l'émulsifiant. La teneur de chaque composant dans l'émulsion de bitume peut varier considérablement en fonction de son domaine d'utilisation. La teneur en bitume peut varier entre 40 et 75%. La teneur en eau peut varier entre 25 et 60%. La teneur en émulsifiant peut varier de 0,1 à 2,5% (Corté and Di Benedetto 2004). Les émulsions bitumineuses peuvent être classées en quatre catégories (Hunter, Self et al. 2015):

- Émulsions cationiques
- Émulsions anioniques
- Émulsions non ioniques
- Émulsions stabilisées à l'argile

Les émulsions cationiques et anioniques sont les plus couramment utilisées. Leur appellation est basée sur les charges électriques des gouttelettes de bitume. Cette classification s'appuie sur l'une des lois fondamentales de l'électricité. Selon laquelle, les charges similaires se repoussent et les charges opposées s'attirent. Si un potentiel électrique est appliqué entre deux électrodes immergées dans une émulsion contenant des particules de bitume chargées négativement, celles-ci migreront vers l'anode. Ceci qualifie l'émulsion d'anionique. Si les particules de bitume sont chargées positivement, elles se déplaceront vers la cathode et l'émulsion sera qualifiée de cationique (Hunter, Self et al. 2015). La Figure 1-4 illustre une émulsion anionique et cationique. Dans une émulsion non ionique, les particules de bitume sont neutres et ne se déplacent donc vers aucune électrode. Ce type d'émulsion n'est pas utilisé sur les autoroutes. Les émulsions stabilisées à l'argile sont principalement utilisées dans des applications industrielles plutôt que dans des applications routières. Les émulsifiants utilisés

sont des fines minérales, souvent des argiles naturelles ou transformées (Hunter, Self et al. 2015).

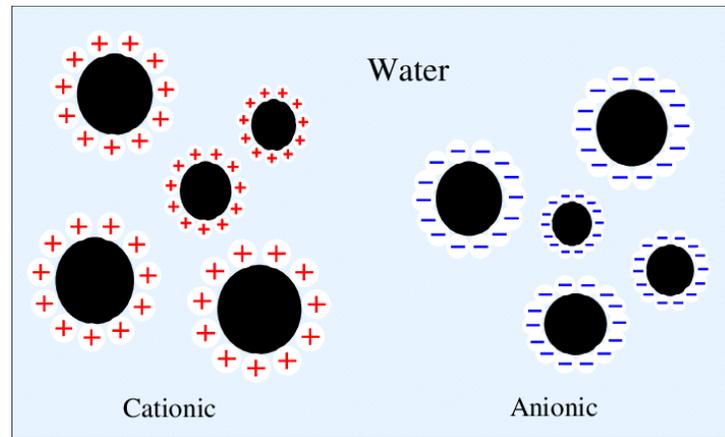


Figure 1-4: Illustration d'une émulsion anionique et cationique (Yaacob, Hainin et al. 2013)
La rupture de l'émulsion se produit lorsque ses composants se séparent et qu'une phase bitumineuse continue se forme. Ce phénomène est causé par l'augmentation du pH qui résulte de la réaction des acides présents dans l'émulsion avec les granulats.

Il est également possible de classer les émulsions en fonction de leur vitesse de rupture (Baklouti 2022):

- Les émulsions à prise rapide (Rapid Setting: RS) se caractérisent par une rupture très rapide, se produisant dans les premières secondes de contact avec les granulats. Elles sont généralement utilisées pour les traitements de surface et les couches d'accrochage.
- Les émulsions à prise moyenne (Medium Setting: MS) ont une rupture moins rapide que celle des émulsions RS. Elles sont utilisées pour la formulation à froid avec des granulats dont la surface spécifique est relativement faible à moyenne.
- Les émulsions à prise lente (Slow Setting: SS) se distinguent par une rupture plus lente, pouvant durer quelques minutes. Elles sont destinées à la formulation à froid, utilisant des granulats fins avec une surface spécifique relativement grande.

Afin de garantir que l'émulsion produite soit adaptée à la construction routière, elle doit répondre à certaines exigences :

- **Stabilité** : Lorsqu'il y a un contact entre deux particules de bitume dans une émulsion, elles peuvent se fusionner. Cependant, cela est empêché grâce à la répulsion des charges électriques présentes et à la protection mécanique offerte par l'émulsifiant. Tout

effet qui dépasse ces forces peut entraîner une floculation et une coalescence des particules. La température de stockage varie généralement entre 20 et 60°C. Il est essentiel de maintenir l'émulsion dans une plage de température appropriée pour assurer sa stabilité et préserver ses caractéristiques (Garfa 2018).

- Viscosité : Il est essentiel que l'émulsion ait une viscosité appropriée pour une manipulation facile à température ambiante. Ceci facilite l'enrobage des granulats lors de la formulation à froid. Cependant, elle doit également être suffisamment visqueuse pour éviter les écoulements indésirables, en particulier pour les émulsions utilisées dans les traitements de surface. La viscosité de l'émulsion est inversement corrélée au diamètre moyen des gouttelettes de bitume dispersées (Garfa 2018).
- Stockage : Les émulsions modernes peuvent être stockées pendant plusieurs mois sans modification majeure de leurs propriétés physiques. Il est recommandé d'utiliser des réservoirs de stockage verticaux de petit diamètre avec une section horizontale minimale, équipée d'un tuyau de remplissage qui s'étend jusqu'au fond du réservoir de stockage (Hunter, Self et al. 2015).

1.3 Enrobés coulés à froid (ECF) et enrobés de microsurfaçage

1.3.1 Généralités

Les enrobés coulés à froid (ECF) sont des revêtements bitumineux utilisés dans le domaine de la construction routière. Contrairement aux enrobés classiques qui sont généralement appliqués à chaud, les enrobés coulés à froid sont produits et appliqués à des températures ambiantes ou légèrement supérieures. Ils sont principalement utilisés comme enrobés de microsurfaçage pour créer des couches de roulement adaptées à un trafic faible à moyen. Ils sont également utilisés pour des travaux de réhabilitation et d'entretien. Les ECF se distinguent par leur rapidité de formulation et d'exécution, nécessitant un minimum d'équipements (IDRRIM 2017). La Figure 1-5 illustre un exemple d'enrobé coulé à froid lors de son application sur la surface de la chaussée.



Figure 1-5: ECF fraîchement posé sur la surface de chaussée (SETRA 2005)

Il s'agit d'une technique relativement récente. Son application a connu une croissance constante depuis une dizaine d'années. Entre 1996 et 2001, la surface traitée par les enrobés coulés à froid en France est passée de 11 m² à 30 m² (IDRRIM 2017). Cette croissance a conduit au développement de plusieurs méthodes de formulation visant à garantir la durabilité et les performances du matériau en fonction de son utilisation prévue.

Bien que les enrobés coulés à froid ne puissent pas résoudre les problèmes structurels d'une chaussée, en particulier lorsqu'ils sont utilisés pour le microsurfaçage avec des épaisseurs réduites, leur application en bicouche peut contribuer à corriger des faiblesses structurales mineures (SETRA 2005).

Les avantages des ECF se résument en (Garfa 2018):

- Moins d'énergie consommée pour le produire et donc réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Possibilité de réaliser des couches très minces.
- Réduction de bruit généré par le trafic
- Rapidité d'application avec un atelier compact et une perturbation minimale pour les usagers de la route
- Réouverture rapide de la route après maximum 60 min des travaux de pavage

1.3.2 Composition des ECF

Les ECF sont composés principalement de granulats concassés à granulométrie continue (0/4, 0/6 ou 0/10) (IDRRIM 2017) représentant 85% à 95% de leur masse. Ils comprennent également des émulsions de bitume. Celles-ci sont généralement de nature cationique. Elles peuvent avoir une rupture lente ou rapide en fonction de leur utilisation spécifique. L'eau est une autre composante importante des ECF. Elle est ajoutée au mélange pour faciliter l'enrobage en mouillant les granulats, améliorant ainsi l'adhésivité entre le bitume et les granulats (IDRRIM 2017).

Des additifs peuvent être incorporés au mélange pour conférer des propriétés spécifiques aux ECF :

- Régulatrices de ruptures :

Ce sont des additifs utilisés pour contrôler la vitesse de rupture du mélange, facilitant ainsi sa mise en œuvre lors du pavage et évitant une rupture prématurée. La teneur en régulateurs varie généralement entre 0% et 2% de la masse de l'émulsion. Il est important de contrôler cette teneur afin d'éviter un ralentissement indésirable de la rupture, qui pourrait diminuer la cohésion du mélange (Garfa 2018).

- Fines (ciment et chaux) :

Elles ajustent la vitesse de rupture en favorisant une cohésion précoce du mélange. Elles contribuent également à corriger la granulométrie du squelette granulaire. La teneur en fines est généralement inférieure à 1%, voire 2% dans le cas des ciments. Une teneur élevée en ciment peut rendre le mélange trop rigide (Garfa 2018).

- Fibres

L'ajout de fibres vise à modifier le comportement rhéologique, l'élasticité, l'adhésivité et la cohésion du mélange. Les fibres favorisent l'homogénéité du mélange à court terme, ce qui permet l'utilisation de granulométries discontinues tout en évitant la ségrégation. En raison de leur déformabilité, les fibres confèrent aux couches formées une grande souplesse (Garfa 2018).

1.3.3 Formulation des ECF de microsurfaçage

La formulation des ECF est un processus qui vise à déterminer les proportions appropriées des différents composants afin d'obtenir un mélange cohérent. Étant donné que les ECF sont principalement utilisés pour réaliser des couches minces, les méthodes de formulation se concentrent généralement sur la formulation des enrobés de microsurfaçage. La plupart de ces méthodes sont développées par *l'International Slurry Surfacing Association (ISSA)*.

1.3.3.1 Méthode ISSA A143

Les spécifications ISSA A143 constituent la procédure de formulation la plus couramment utilisée pour le microsurfaçage. Les composants du mélange doivent répondre à certaines exigences. La granulométrie des agrégats doit respecter les limites du fuseau granulométrique associées aux types II ou III. Le Tableau 1-2 montre que la granulométrie de type III est plus grossière que celle de type II. Le choix de la granulométrie dépend donc du volume de trafic, avec la granulométrie de type II associée à un volume de trafic moyen et la granulométrie de type III associée à un volume de trafic élevé.

Tableau 1-2 : Les spécifications de la granulométrie des agrégats selon la méthode ISSA A143 (ISSA 2020)

SIEVE SIZE	TYPE II PERCENT PASSING	TYPE III PERCENT PASSING	STOCKPILE TOLERANCE
3/8 (9.5 mm)	100	100	
# 4 (4.75 mm)	90 - 100	70 - 90	± 5%
# 8 (2.36 mm)	65 - 90	45 - 70	± 5%
# 16 (1.18 mm)	45 - 70	28 - 50	± 5%
# 30 (600 um)	30 - 50	19 - 34	± 5%
# 50 (300 um)	18 - 30	12 - 25	± 4%
#100 (150 um)	10 - 21	7 - 18	± 3%
#200 (75 um)	5 - 15	5 - 15	± 2%

Les granulats doivent également respecter les propriétés spécifiées dans le Tableau 1-3. La partie fine (inférieure à 2,5 mm) doit avoir une faible teneur en poussières ou en particules argileuses (au moins 65% d'équivalent de sable). De plus, ils doivent présenter une durabilité suffisante pour résister aux contraintes causées par le trafic routier.

Tableau 1-3: Essai et propriétés des granulats selon la méthode ISSA (ISSA 2020)

TEST	TEST METHOD		SPECIFICATION
	AASHTO	ASTM	
Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate	T 176	D 2419	65 Minimum
Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate of Magnesium Sulfate	T 104	C 88	15% Maximum w/NA ₂ SO ₄ 25% Maximum w/MgSO ₄
Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine ¹	T 96	C 131	30% Maximum

Le liant utilisé est une émulsion d'asphalte modifiée aux polymères, conforme aux exigences de la norme ASTM D2397 pour CSS-1H. L'émulsion doit contenir un minimum de 62% de résidu de distillation, avec une pénétration comprise entre 40 et 90 à 25°C. Les essais et les spécifications du liant utilisé sont résumés dans le Tableau 1-4 (ISSA 2020).

Tableau 1-4: Essais et propriétés de l'émulsion selon la méthode ISSA (ISSA 2020)

TEST	TEST METHOD		SPECIFICATION
	AASHTO	ASTM	
Settlement and Storage Stability of Emulsified Asphalts, 24-h	T 59	D 6930	1% Maximum
Distillation of Emulsified Asphalt ¹	T 59	D 6997	62% Minimum
Tests on Emulsified Asphalt Residue			
Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)	T 53	D 36	135°F (57°C) Minimum
Penetration of Bituminous Materials at 77°F (25°C)	T 49	D 5	40-90 ²

Le Tableau 1-5 résume les essais de formulation recommandés par ISSA pour le microsurfaçage, Il convient de noter que tous ces essais ne sont pas obligatoires et le concepteur conserve le droit de négliger un ou plusieurs essais selon l'expérience personnelle.

- Essai de cohésion (ISSA TB 139) :

Cet essai consiste à mesurer la cohésion du mélange après coulage à des intervalles de temps prédéfinis (30, 60, 90, 150, 210 minutes). On mesure le couple nécessaire pour faire tourner le cylindre en néoprène en contact avec l'échantillon. Un tracé du couple en fonction du temps est réalisé pour déterminer le temps de réouverture pour le trafic (ISSA 2017).

Tableau 1-5: Essais de vérification recommandés par la méthode ISSA pour le microsurfaçage (ISSA 2020)

TEST	ISSA TB NO.	SPECIFICATION
Mix Time @ 77°F (25°C)	TB 113	Controllable to 120 Seconds Minimum
Wet Cohesion @ 30 Minutes Minimum (Set) @ 60 Minutes Minimum (Traffic)	TB 139	12 kg-cm Minimum 20 kg-cm or Near Spin Minimum
Wet Stripping	TB 114	Pass (90% Minimum)
Wet-Track Abrasion Loss One-hour Soak Six-day Soak	TB 100	50 g/ft ² (538 g/m ²) Maximum 75 g/ft ² (807 g/m ²) Maximum
Lateral Displacement Specific Gravity after 1,000 Cycles of 125 lb (56.71 kg)	TB 147	5% Maximum 2.10 Maximum
Excess Asphalt by LWT Sand Adhesion	TB 109	50 g/ft ² (538 g/m ²) Maximum
Classification Compatibility	TB 144	11 Grade Points Minimum (AAA, BAA)

- Essai du sable adhérent par essai de déplacement (ISSA TB 109):

Cet essai vise à évaluer le ressuage du mélange après durcissement et sous l'effet du trafic. Il permet de déterminer la teneur maximale en émulsion de bitume nécessaire pour éviter le ressuage à la surface de la chaussée. Le paramètre mesuré est l'adhérence du sable, qui est une mesure indirecte de la quantité de bitume en excès. L'échantillon subit 1100 cycles de compactage (1000 cycles de conditionnement et 100 cycles pour l'essai) par une roue chargée d'une masse de 56,7 kg (ISSA 2022).

- Essai d'abrasion humide (ISSA TB 100) :

Il s'agit d'une simulation pour mesurer la résistance à l'usure du mélange dans des conditions d'abrasion humide. Il permet de déterminer la teneur minimale en émulsion nécessaire pour prévenir l'usure excessive du mélange après durcissement. L'essai consiste à mesurer la perte par abrasion après 1 heure et après 6 jours d'imbibition dans l'eau, ce qui permet d'évaluer respectivement la susceptibilité à l'exposition à l'humidité à court et à long terme (ISSA 2018).

- Mix time test (ISSA TB 113):

Il s'agit d'une méthode d'essai-erreur pour déterminer si le mélange peut être mélangé à une température de 25°C pendant au moins 180 secondes avant que la rupture d'émulsion ne se produise (ISSA 2017).

- Essai de déplacement (ISSA TB 147) :

La procédure de l'essai fait partie de l'essai du sable adhérent (ISSA TB 109). Les mesures de la largeur et de la hauteur de l'échantillon sont prises (au niveau de la trajectoire de la roue) avant et après 1000 cycles de compactage, et les déplacements verticaux et latéraux sont calculés. La densité peut également être calculée. Les spécifications de la méthode ISSA précisent des déplacements latéraux et verticaux maximaux respectivement de 5% et 10% de la largeur d'origine et de l'épaisseur à mi-longueur (ISSA 2022).

- Essai de classification (ISSA TB 144) :

L'essai est un système de classement qui évalue la compatibilité relative entre le filler et le résidu de bitume. Le Tableau 1-6 présente le système de classification recommandé par la méthode ISSA. Les résultats de l'essai sont présentés sous forme d'une valeur de classement de l'adhésion (pourcentage d'enrobage), de la perte par abrasion (en grammes) et de la cohésion à haute température (absorption en grammes et intégrité en pourcentage de masse retenue). Pour qu'un mélange soit accepté, il doit atteindre un minimum de 11 points (ISSA 2019).

Tableau 1-6: Système de classement de la compatibilité recommandé par la méthode ISSA pour le microsurfaçage (ISSA 2019)

Grade Rating	Point Rating	Abrasion Loss, g	Integrity, % Retained	Adhesion, % Coated
A	4	0 – 0.7	90 – 100	90 – 100
B	3	0.8 – 1.0	75 – 89	75 – 89
C	2	1.1 – 1.3	50 – 74	50 – 74
D	1	1.4 – 2.0	10 – 49	10 – 49
0	0	2.1+	0	0

1.3.3.2 Méthode ASTM D 6372

Il s'agit d'une méthode dérivée de la méthode ISSA, les composants du mélange sont testés en premier, la granulométrie du squelette granulaire doit être conforme à l'une des deux Granulométries présentées dans le Tableau 1-7, Les types II et III sont respectivement adoptés pour les faibles à moyens et forts trafics. Contrairement à la méthode ISSA, la méthode ASTM ne spécifie pas de tolérance pour les classes granulométriques.

Les spécifications et les essais qui traitent les propriétés et caractéristiques des agrégats et émulsions utilisés sont les mêmes que ceux de la méthode ISSA A143 (voir Tableaux 1-3 et 1-4). Les agrégats doivent avoir un minimum d'équivalent de sable de 65 % et le filler doit

contenir une teneur minimale en particule argileuse, l'émulsion doit contenir un minimum de 62 % de résidu qui doit avoir une pénétrabilité entre 40 et 90 à 25°C.

Tableau 1-7: Les spécifications de la granulométrie selon la méthode ASTM (ASTM 2015)

Sieve Size	Type II Percent Passing	Type III Percent Passing
9.5 mm	100	100
4.75 mm	90 to 100	70 to 90
2.36 mm	65 to 90	45 to 70
1.18 mm	45 to 70	28 to 50
600 µm	30 to 50	19 to 34
330 µm	18 to 30	12 to 25
150 µm	10 to 21	7 to 18
75 µm	5 to 15	5 to 15

Le Tableau 1-8 résume les essais recommandés par la méthode de formulation ASTM.

Tableau 1-8: Essais de vérification recommandés par la méthode ASTM pour le microsurfaçage (Robati 2012)

ISSA TEST NO	DESCRIPTION	SPECIFICATION
ISSA TB 139 (For Quick-Traffic)	Wet cohesion 30 Minutes (Set) Wet cohesion 60 Minute	12kg-cm Minimum 20kg-cm Minimum
ISSA TB 109 (For Heavy-Traffic)	Excess asphalt by loaded wheel test sand adhesion	538 g/m ² Maximum
ISSA TB 100	wet track abrasion lost, one-hour soak	807 g/m ² Maximum
ISSA TB 144	Classification test	Minimum 11 Points

Les spécifications de l'essai de cohésion (ISSA TB 139), de l'essai du sable adhérent (ISSA TB 109) et de l'essai de classification sont les mêmes que dans la méthode ISSA. La seule différence réside dans l'essai d'abrasion humide (ISSA TB 100) où la méthode ASTM recommande une seule période d'imbibition d'une heure et spécifie une valeur maximale de 807 g/m² (Robati 2012).

1.3.3.3 Méthode TTI 1289

Le Texas Transportation Institute (TTI) a proposé une méthode de formulation différente des méthodes ISSA et ASTM pour l'enrobé de microsurfaçage en 1994. Selon la méthode TTI, le squelette granulaire doit répondre à la Granulométrie de type II ou III spécifiée dans le Tableau 1-9, avec des pourcentages de passage différents de ceux proposés par la méthode ISSA. TTI exige que le squelette granulaire soit plus fin du tamis 3/8 au tamis No. 16 (Robati 2012).

Tableau 1-9: Spécifications de la granulométrie selon la méthode TTI (Robati 2012)

Sieve Size		% Passing by Weight		Stockpile Tolerance, %
In	mm	Type II	Type III	
3/8	9.500	100	100	+/- 5
No. 4	4.750	98-100	99-100	+/- 5
No. 8	2.360	75-90	45-65	+/- 5
No. 16	1.180	50-75	25-46	+/- 5
No. 30	0.600	30-50	15-35	+/- 3
No. 50	0.300	18-35	10-25	+/- 3
No. 100	0.150	10-21	7-18	+/- 3
No.200	0.075	5-15	5-15	+/- 2

Les spécifications et les essais traitant des propriétés et caractéristiques des agrégats et émulsions utilisés sont les mêmes que ceux de la méthode ISSA A143 (voir Tableaux 1-3 et 1-4), à l'exception de l'essai d'équivalent de sable. La méthode TTI exige un minimum de 70 % d'équivalent de sable, tandis qu'ISSA et ASTM exigent un minimum de 65 %. L'émulsion exigée par TTI doit être cationique à prise lente avec des polymères (désigné CSS-1P) et elle doit répondre aux exigences suivantes (Robati 2012) :

- Teneur minimale en polymère de 3 % en masse.
- Viscosité, Saybolt Furol à 25°C : 20 à 100 secondes.
- Essai de stabilité de stockage, 1 jour : maximum de 1 %.
- Essai de tamis : 0,1 % maximum.
- Résidu de distillation : 62 % minimum.
- Huile distillée : maximum de 0,5 % en volume d'émulsion.

TTI recommande plusieurs essais de validation pour les mélanges formulés. L'essai d'abrasion humide (ISSA TB 100) est utilisé pour sélectionner la teneur minimale en résidu de bitume.

L'essai de cohésion (ISSA TB 139) est utilisé pour sélectionner la teneur optimale en ciment. L'essai de malaxage (ISSA TB 113) est utilisé pour sélectionner la teneur minimale en eau (TTI 1996). La méthode propose deux autres essais de formulation pour sélectionner la teneur optimale en résidu de bitume et en eau :

- Estimation de la teneur optimale du liant (résidu de bitume) :

L'essai ASTM D51 48-90 est utilisé pour déterminer l'indice de centrifuge Kérosène équivalent (CKE). Ceci mesure la tendance de l'enrobé à se déformer ou à se compacter. La méthode de formulation Hveem l'utilise pour déterminer le ratio de bitume approximatif (ABR). La méthode de formulation TTI recommande l'utilisation de CKE et ABR pour déterminer la teneur optimale en résidu de bitume. Ceci est une majoration de 2 % de la valeur de l'ABR (Robati 2012).

- Essai Cup Flow modifié (TTI 1996) :

Cet essai est utilisé pour déterminer la teneur en eau optimale. Il suit la méthode d'essai par erreur. Chaque combinaison de teneurs (émulsion, ciment) est testée pour sélectionner la teneur en eau pour laquelle la séparation entre solide et liquide est supérieure à 5 mm. La teneur optimale en eau correspond donc à 98 % de la teneur sélectionnée. TTI exige que la teneur optimale en eau obtenue par cet essai soit supérieure à la teneur minimale obtenue lors de l'essai de malaxage (ISSA TB 113) (Robati 2012).

1.4 Les bardeaux d'asphalte

Les bardeaux d'asphalte (*Shingles*) représentent les deux tiers du marché des toitures pour les bâtiments résidentiels et les installations des toitures commerciales. Aux États-Unis, 13,2 millions de tonnes de bardeaux sont produites chaque année. Au Canada, la quantité est d'environ 1,5 million de tonnes. La plupart des déchets de bardeaux de toiture proviennent du remplacement des toits résidentiels (90 à 95 %). Le reste est généré lors de l'installation ou de la fabrication. Ces déchets représentent un flux important vers les décharges. Ils ont un impact environnemental négatif (Ddamba 2011). Actuellement, seulement environ 9 % des déchets de bardeaux disponibles sont utilisés par les producteurs d'enrobés (Ddamba 2011). Il est donc nécessaire de promouvoir davantage l'incorporation des bardeaux post-consommation, également appelés RAS (*Reclaimed Asphalt Shingles*), dans la production des enrobés

bitumineux (Williams, Willis et al. 2019). L'utilisation de bardeaux d'asphalte recyclés présente plusieurs avantages, en particulier sur le plan environnemental. Cependant, il est important de noter qu'elle comporte également des défauts potentiels. Ainsi, les enrobés bitumineux contenant ce matériau doivent être conçus et fabriqués selon les normes de l'industrie pour assurer des performances durables à long terme.

1.4.1 La composition des bardeaux d'asphalte

La composition des bardeaux d'asphalte varie en fonction de sa source et son âge. Les constituants de base sont le liant bitumineux, filler minéral, des agrégats et des fibres de verre ou de feutre organique. La Figure 1- 6 présente une composition typique des bardeaux.

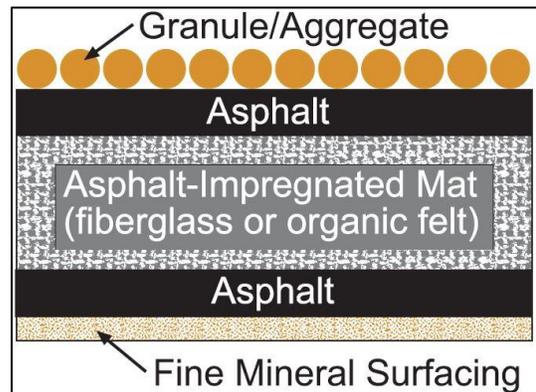


Figure 1-6: Composition typique des bardeaux d'asphalte (Williams, Willis et al. 2019)

Les agrégats minéraux, tels que les particules de céramique et le sable, représentent la plus grande proportion en masse des bardeaux d'asphalte. Les particules de céramique sont particulièrement importantes pour la performance des bardeaux. En effet, elles sont très durables et anguleuses. Ceci est souhaitable pour la formulation des enrobés. Ces agrégats peuvent également contribuer à la création de vides supplémentaires dans le mélange (*void in mineral aggregate* VMA). Ces vides peuvent être utiles lorsque les exigences minimales de VMA sont difficiles à atteindre (Williams, Willis et al. 2019).

Le bitume contenu dans les bardeaux recyclés (RAS) est extrêmement dur et rigide par rapport au bitume conventionnel. Sa teneur dépend de la nature des fibres utilisées dans les bardeaux. Le bitume de surface est utilisé pour l'imperméabilisation et l'adhérence des granulats de

surface. Le bitume de saturation agit comme un liant pour les fibres utilisées. (Noël, Perraton et al. 2006).

Les fibres utilisées dans la fabrication des bardeaux sont généralement des fibres de cellulose synthétique ou d'amiante (Noël, Perraton et al. 2006). Elle représente entre 2 et 15 % de la masse du bardeau (Williams, Willis et al. 2019). Ces fibres sont principalement utilisées pour renforcer le matériau. Leur nature influence la teneur en bitume, qui dépend de leur surface spécifique et de leur capacité à absorber le bitume. Les fibres de cellulose absorbent davantage de bitume que les fibres minérales. (Noël, Perraton et al. 2006).

Le Tableau 1-10 présente les teneurs typiques de chaque composant du bardeau.

Tableau 1-10: Les teneurs des composants de bardeau (Williams, Willis et al. 2019)

Component	Organic (% by Wt.)	Fiberglass (% by Wt.)
Asphalt binder	30–36	19–22
Mat (fiberglass or organic felt)	2–15	2–15
Mineral granules/aggregate	20–38	20–38
Mineral filler/stabilizer	8–40	8–40

1.4.2 Scénarios de valorisation des RAS

- Incorporation dans les enrobés bitumineux :

Avant d'être incorporés dans les enrobés, les RAS doivent subir un processus de déchetage et tous les matériaux indésirables doivent être éliminés. L'élimination des matériaux nuisibles se fait après le déchetage à l'aide d'un champ magnétique pour les composants métalliques, ainsi que par flottation pour les résidus de papier et de bois. Les RAS déchetés doivent respecter certaines exigences, notamment en ce qui concerne la taille maximale des morceaux, qui ne doit pas dépasser 13 mm. Cette limite de taille garantit que les RAS fonctionnent comme des enrichisseurs de bitume plutôt que comme des granulats (BILODEAU 2011). Lors du processus de broyage, la température du bardeau peut augmenter, ce qui peut entraîner l'agglomération des particules. Pour éviter cela, les RAS peuvent être arrosés pendant le déchetage ou le processus peut être effectué à une température inférieure à -10 °C. Ceci est

possible pendant les mois d'hiver (BILODEAU 2011). Après le reconditionnement, les RAS doivent être entreposés proprement ou utilisés directement pour formuler les enrobés.

- Construction des chemins :

Tout comme dans le scénario d'incorporation dans les enrobés, les RAS doivent subir un processus de broyage et de décontamination pour éliminer les matériaux indésirables. Une fois ce processus est terminé, les RAS sont mélangés avec des agrégats 0/2 (BILODEAU 2011). Le mélange ainsi formé peut être étalé sur des surfaces pour construire des chemins de parc ou des chemins en terre, ce qui permet de limiter la poussière et l'érosion.

- Incorporation aux enrobés de rapiéçage (*Slurry seal*):

Après le déchiquetage et la décontamination, les RAS sont traités avec un solvant pour réduire leur teneur en bitume oxydé. Ensuite, ils sont tamisés pour séparer les particules dont la taille est inférieure à 0,5 cm, qui peuvent être incorporées directement avec des granulats (BILODEAU 2011). Ces enrobés sont utilisés lors de travaux de réhabilitation pour réparer les nids-de-poule.

1.4.3 Propriétés de bitume composant les bardeaux

Pour évaluer les propriétés du bitume contenu dans les RAS, il est nécessaire d'utiliser des méthodes d'extraction et de récupération. L'extraction par centrifugation selon la méthode Abson Recovery compte parmi les essais possibles. Cependant, des études ont montré que cette méthode n'est pas suffisante en raison de la coloration foncée des RAS après l'essai (Noël, Perraton et al. 2006). La composition des bardeaux et l'oxydation du bitume rendent difficile son extraction sans altérer ses propriétés. Une méthode conventionnelle consiste à immerger les RAS dans un solvant pendant une longue durée. Puis, le bitume est séparé du solvant par distillation ou évaporation. Les résultats de cette méthode dépendent du processus et du solvant utilisés (Noël, Perraton et al. 2006).

Le Tableau 1-11 présente les propriétés évaluées d'un bitume extrait des bardeaux par centrifugation selon la norme ASTM 2172, puis séparé du solvant par distillation selon la norme ASTM D 1856. Les résultats montrent que le bitume des bardeaux présente une viscosité cinématique plus élevée que les bitumes conventionnels. Par conséquent, le grade de

bitume des RAS est estimé à PG100. Cependant, les bitumes conventionnels ont un grade de PG58 à PG70 (Noël, Perraton et al. 2006). Ce problème fait partie des défis majeurs liés à l'incorporation des bardeaux dans les enrobés.

Tableau 1-11: Propriété d'un bitume extrait des RAS (Noël, Perraton et al. 2006)

Essai effectué	Résultat	Norme
Essais de pénétration à 25°C	17.0 dmm	ASTM D 5
Viscosité cinématique à 135°C	54,000 cSt	ASTM D 2170
Densité	1.000	ASTM D-3124

1.4.4 Les considérations durant la production et la construction

Étant donné que les propriétés des RAS diffèrent de celles des agrégats conventionnels et des granulats bitumineux recyclés, des mesures peuvent être prises lors de la production afin de minimiser l'agglomération des bardeaux. Par exemple, les tas de RAS peuvent être couverts pour limiter leur exposition à l'humidité. Les bacs d'alimentation doivent être équipés d'un écran de scalpage pour éliminer les particules agglomérées et de grandes tailles. Il est également possible d'ajouter une certaine quantité de sable (maximum 20 % de la masse des bardeaux) pour réduire l'agglomération (Williams, Willis et al. 2019).

Les RAS sont généralement plus légers que les granulats conventionnels. Il est donc nécessaire de prendre des mesures pour empêcher qu'ils soient emportés par le vent pendant l'alimentation.

En raison de la rigidité du bitume contenu dans les RAS, la durée pendant laquelle l'enrobé formulé reste manipulable peut être réduite. Il est donc essentiel d'équilibrer la production en fonction de la demande afin d'éviter que l'enrobé ne reste trop longtemps dans les camions de transport (Williams, Willis et al. 2019).

1.5 Performance des enrobés contenant des bardeaux d'asphalte

1.5.1 Évaluation quantitative des fissurations à basse température:

Malgré les nombreuses études menées sur les enrobés à chaud contenant des RAS, les effets de ces derniers sur les performances à basse température ne sont pas bien compris. Afin d'évaluer ces performances, des études ont été réalisées en utilisant l'émission acoustique (AE)

pour estimer la température de fragilisation des enrobés. Cette approche peut remplacer les méthodes AASHTO-TP1 et AASHTO MP1A en raison de sa facilité d'utilisation et de transport des instruments (Arnold 2014). L'émission acoustique est causée par les contraintes thermiques qui se produisent lorsque la température de l'échantillon diminue jusqu'à la fissuration. La température de fragilisation correspond à une émission acoustique égale ou supérieure à $4V2$ (Arnold 2014). La Figure 1-7 présente le dispositif utilisé pour l'essai d'émission acoustique. L'ensemble du dispositif étant placé dans un congélateur.

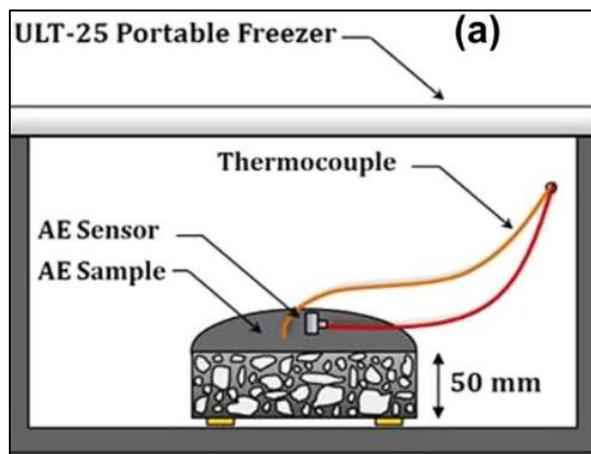


Figure 1-7: Dispositif expérimental de l'essai d'émission acoustique (Arnold 2014)

L'essai consiste à réduire la température des différents échantillons de 15 à -50°C et à enregistrer les émissions émises. Il est important de noter que les températures déterminées ne sont qu'une estimation et ne précisent pas la température de fragilisation réelle (Arnold 2014). Les échantillons testés contiennent 0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 %, 10 % et 12,5 % de RAS. Ils ont été prélevés à partir d'échantillons compactés par compaction giratoire. Tous les échantillons ont été formulés à trois températures différentes (120, 155 et 200°C) afin d'évaluer l'effet de la température de malaxage sur le comportement à basse température (Arnold 2014).

La Figure 1-8 résume les températures estimées à partir des émissions.

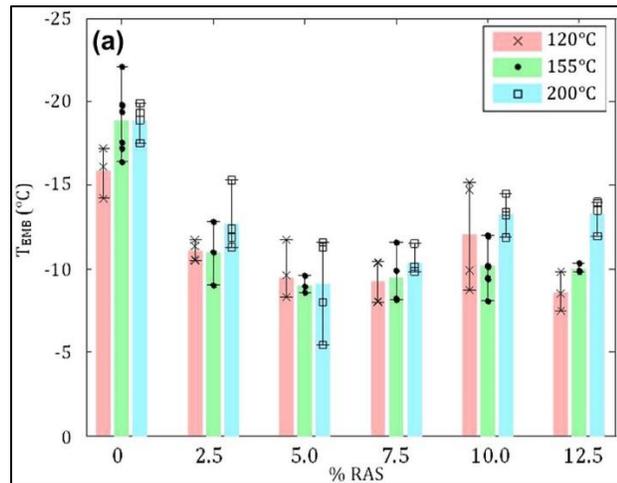


Figure 1-8: Températures de fragilisations des mélanges en fonction de la teneur en RAS (Arnold 2014)

Les résultats montrent que la présence de RAS affecte significativement la température de fragilisation, qui est inversement proportionnelle à la teneur en bardeaux. Par exemple, après l'incorporation de 2,5 % de RAS dans les mélanges formulés à 155 °C, la température de fragilisation est passée de 18,90 °C à 10,97 °C (Arnold 2014). La croissance de la température de fragilisation en passant de 7,5 à 10 % de RAS peut être expliquée par l'agglomération des particules de RAS au sein de l'échantillon. Ces particules sont plus susceptibles aux fissurations en diminuant la température (Arnold 2014). Par ailleurs, les résultats ont montré que la température de malaxage n'a pas d'effet significatif sur les performances à basse température (Arnold 2014).

1.5.2 Performance mécanique des enrobés à chaud contenant des RAS :

Afin d'évaluer l'effet du bardeau sur le comportement mécanique des enrobés, des études ont été réalisées sur des enrobés de surface de type ESG10, en respectant les spécifications du MTQ. Il est important de noter que la teneur en bardeau ne doit pas dépasser 3% de la masse totale de l'enrobé, et 40% du bitume contenu dans les RAS est mobilisable. Il convient de souligner que les RAS sont composés de 20% de bitume. Ainsi, des ajustements de la teneur en bitume ont été effectués pendant le malaxage pour maintenir une teneur en bitume constante de 5,65% en masse d'enrobés (Malo 2013). L'étude a également pris en compte des

pourcentages de bitume mobilisable supplémentaires. Le Tableau 1-12 présente les enrobés de type ESG10 qui ont été testés.

Tableau 1-12: Teneur en bitume d'apport des mélanges ESG10 testés (Malo 2013)

Appellation de l'enrobé	Mobilisation considérée du bitume des bardeaux	Bitume bardeau mobilisé considéré ^A	Bitume d'ajout	Bitume total ^B	Bitume bardeau mobilisé considéré + Bitume d'ajout
ESG10-B0	s. o.	-	5,65 %	5,65 %	5,65 %
ESG10-B3-0	0 %	0,00 %	5,65 %	6,25 %	
ESG10-B3-20	20 %	0,12 %	5,53 %	6,13 %	
ESG10-B3-40	40 %	0,24 %	5,41 %	6,01 %	
ESG10-B3-60	60 %	0,36 %	5,29 %	5,89 %	

L'essai de presse à cisaillement giratoire (PCG) a été réalisé conformément à la méthode d'essai LC 26-003 (Malo 2013). Les résultats sont présentés dans la Figure 1-9. Les teneurs en vide de tous les mélanges respectent les exigences minimales spécifiées par la méthode d'essai (indiquées par "LI" dans la figure).,

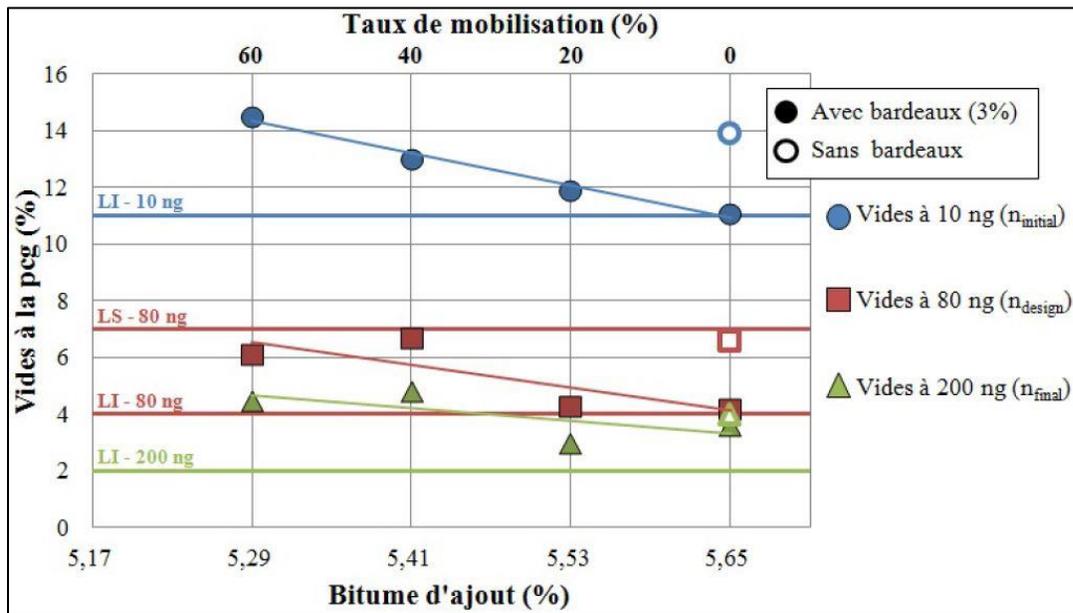


Figure 1-9: Résultats de l'essai de PCG sur les mélanges ESG10 (Malo 2013)

Les résultats ont montré qu'en incorporant des RAS sans ajustement de la teneur en bitume, le mélange est plus apte à se compacter (Malo 2013). Cependant, la teneur en vide augmente

lorsque la teneur en bitume d'apport est ajustée ou diminuée. Les résultats montrent également une similarité entre le mélange ESG10 avec 60% de bitume mobilisable et l'ESG10 de référence (Malo 2013).

La mesure de la résistance à l'orniérage est conforme à la méthode d'essai LC 26-410. Les résultats sont présentés dans la Figure 1-10. Toutes les mesures d'orniérage sont au-dessous de la limite maximale de 10% pour les enrobés ESG10. Les résultats montrent que le comportement des mélanges avec ajustement des teneurs en bitume d'apport vis-à-vis l'orniérage est très similaire à celui de l'enrobé de référence (Malo 2013).

Les résultats de l'essai PCG et d'orniérage favorisent l'hypothèse de la mobilisation du bitume des RAS.

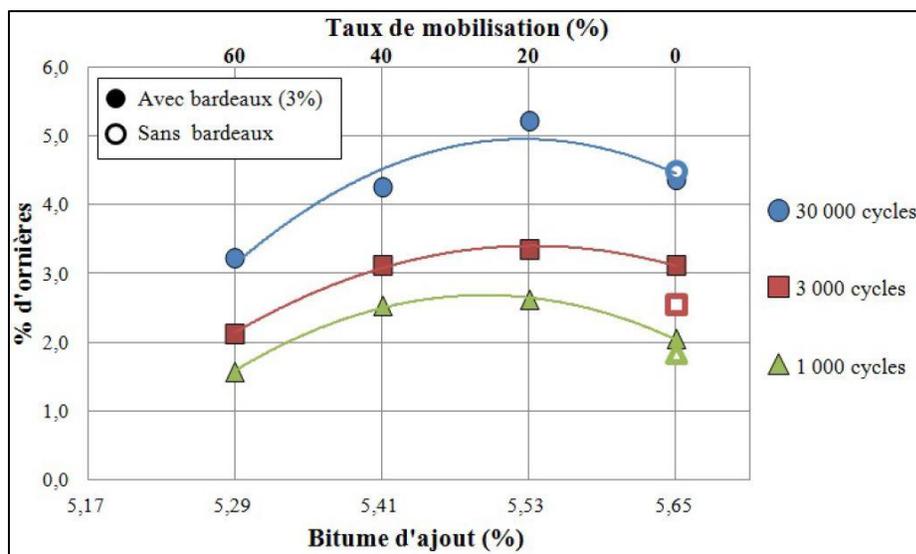


Figure 1-10: Résultats des essais d'orniérage sur les enrobés de surface ESG10 (Malo 2013)

CHAPITRE 2

Programme expérimental

2.1 Objectif de recherche

Ce projet fait partie d'un mandat de recherche qui vise à valoriser les bardeaux d'asphalte post-consommation produite au Québec pour la formulation des enrobés, plus précisément dans la zone de Gaspésie où les nombreuses chaussées non revêtues sont difficiles à entretenir.

La Régie Intermunicipale de Traitement des Matières Résiduelles de la Gaspésie (RITMRG) a confié au laboratoire des chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) la formulation d'un enrobé de microsurfaçage avec une teneur importante en bardeaux. Le matériau formulé doit servir à prolonger la durée de vie des chaussées non revêtues de la région.

L'objectif est de produire un matériau de resurfaçage à froid à une empreinte environnementale réduite, en valorisant les bardeaux post-consommation produits par RITMRG, tout en veillant à respecter les normes internationales de l'ISSA pour la formulation des enrobés de microsurfaçage.

Dans le cadre de cette démarche, vingt-quatre mélanges de référence sont étudiés. Puis, le comportement de deux enrobés à deux teneurs différentes en bardeaux, dépassant les teneurs recommandées par le MTQ, est évalué.

Le but est de formuler un matériau qui va agir principalement comme une couche de protection et d'imperméabilisation des structures non revêtues. Cette couche doit supporter un trafic faible à moyen. Les performances à évaluer sont la résistance à l'abrasion, la cohésion du mélange et la compatibilité des bardeaux avec les granulats. Les performances mécaniques, comme la résistance à l'orniérage et le module complexe, ne sont pas visées.

2.2 Organisation de la recherche

Le projet est séparé en trois phases. La première phase consiste à faire une revue de littérature exhaustive. Elle informe sur les différentes méthodes de formulation des enrobés coulés à froid. Elle renseigne également sur l'état de l'art pour la valorisation des bardeaux d'asphalte dans les matériaux de chaussée au Canada et à l'étranger. Ensuite, la deuxième phase consiste à

caractériser les matériaux utilisés comme les granulats, les émulsions et les bardeaux de RITMRG. Enfin, la troisième phase consiste à la formulation à froid d'un matériau de surfacage pour les chaussées non revêtues.

Pour la première phase, une revue documentaire est menée pour évaluer les pratiques actuelles liées au recyclage des bardeaux et à la formulation des enrobés coulés à froid. Ce travail permet notamment de définir les essais de formulation à réaliser. Il permet également de quantifier les matériaux nécessaires pour la campagne expérimentale.

Pour la deuxième phase, l'objectif est d'évaluer les propriétés des matériaux à utiliser dans la campagne expérimentale. Pour les granulats, les propriétés comportent la granulométrie et la densité. Pour les émulsions, les propriétés à évaluer sont le taux de résidu d'évaporation et sa pénétrabilité. Pour les bardeaux reçus par RITMRG, les caractéristiques à déterminer sont la granulométrie, la densité et la teneur en eau.

Pour la troisième phase, le travail consiste en la formulation d'un ECF de référence, tout en respectant les exigences d'ISSA. Puis, le but est d'incorporer des teneurs en bardeaux dans le mélange. Cette phase est divisée en quatre sous-phases; premièrement, une campagne expérimentale est menée pour identifier une formule de référence en variant les teneurs des composants. Deuxièmement, l'effet de la variation de la granulométrie des mélanges est étudié. Troisièmement, l'influence de la variation du type d'émulsion est évaluée. Finalement, l'effet de l'incorporation des bardeaux sur les propriétés des enrobés formulés est étudié.

2.3 Matériaux

2.3.1 Granulats

Les granulats utilisés dans ce projet sont fournis par l'entreprise DJL Construction à partir de la carrière Saint-Philippe. Il s'agit de pierre concassée de calibre 0-5 mm, de nature minéralogique calcaire. Les agrégats sont lavés à travers le tamis No 200 (0.08 mm) pour éliminer le filler. Ils sont livrés au LCMB dans des sacs étanches.

La première étape consiste à sécher les granulats à 110 °C pendant au moins 15 heures dans une étuve. Ensuite, ils sont transvasés dans de nouveaux sacs étanches, avec une identification de leur provenance et de leur calibre. Puis, ils sont entreposés dans le dépôt du laboratoire jusqu'à leur utilisation.

La caractérisation des granulats comprend les éléments suivants :

- Détermination de la densité et de l'absorption selon la méthode d'essai LC 21-066.
- Détermination de la granulométrie selon la méthode d'essai LC 21-040.

L'échantillonnage pour les essais de caractérisation est effectué conformément à la méthode d'essai LC 21-015 à l'aide d'un séparateur d'échantillons.

Conformément à la méthode d'essai LC 21-066, l'échantillon de granulats est tamisé à travers le tamis No 8 (2.5 mm) pour obtenir deux classes granulaires : 0-2,5 mm et 2,5-5 mm. Ces classes granulaires sont ensuite lavées à travers le tamis No 200 (0.08 mm) pour éliminer complètement le filler. La densité des deux classes granulaires est déterminée. Ensuite, la densité des granulats d'origine est déterminée. Il convient de noter que cet essai est réalisé à une température de 23 °C. Le Tableau 2-1 résume les caractéristiques des granulats.

Tableau 2-1: Propriétés physiques des granulats

Propriétés	Méthode d'essai	Unité	Valeur
Densité brute (sec)	LC 21-066	-	2,697
Densité apparente	LC 21-066	-	2,748
Absorptivité	LC 21-066	%	0,9
Dimension nominale maximale	N/A	mm	5

Conformément à la méthode d'essai LC 21-040, l'échantillon de granulats est lavé à travers le tamis No 200 (0.08 mm) pour éliminer complètement le filler. Ensuite, il est séché à nouveau à 110 °C pendant 15 heures. Par la suite, un tamisage est effectué pour déterminer le pourcentage du passant pour chaque tamis. Il convient de noter que la quantité de filler enlevé lors du conditionnement de l'échantillon (lavage) doit être ajoutée pour déterminer le pourcentage du passant à travers le tamis 0.08 mm. La Figure 2-1 présente la courbe granulométrique des granulats.

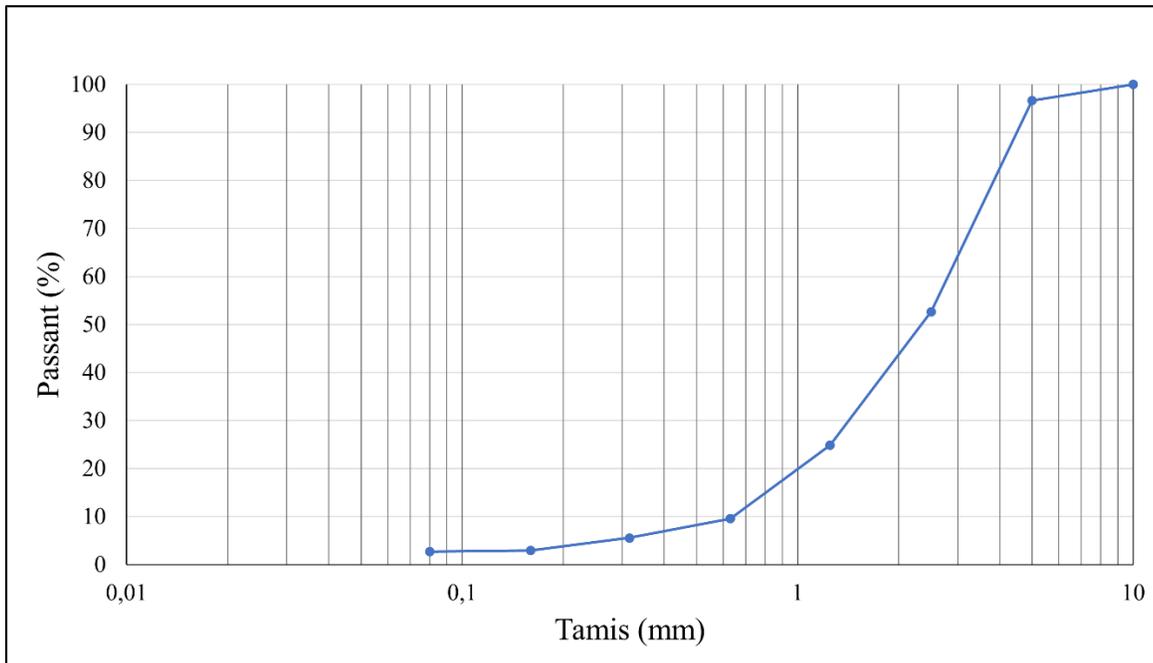


Figure 2-1: Granulométrie des granulats 0-5 mm lavés

Les granulats disponibles pour la campagne expérimentale ont été tamisés à travers les tamis de 5 ; 2,5 ; 1,25 ; 0,630 ; 0,315 ; 0,160 et 0,08 mm. Puis, chaque calibre a été stocké dans des sacs étanches. Ceci facilite l'imposition d'une granulométrie spécifique au squelette granulaire formé. Deux granulométries sont testées pour la formule de référence :

- Granulométrie Grossière (GG) : ne respecte pas les limites ISSA relatives à la granulométrie du squelette granulaire (contient moins de fines).
- Granulométrie Moyenne (GM) : correspond au milieu de fuseau granulométrique recommandé par la méthode ISSA.

Le choix de la granulométrie GG est basé sur des résultats obtenus dans des travaux antérieurs au laboratoire LCMB (Robati 2012). Elles ont montré que la maniabilité des mélanges à froid peut augmenter en diminuant la quantité des fines dans le mélange. En effet, la diminution des quantités des fines retarde la rupture de l'émulsion et la rigidification du mélange (Robati 2012). Le Tableau 2-2 et la Figure 2-2 présentent les granulométries testées ainsi que la surface spécifique de chaque granularité.

La surface spécifique est la somme des surfaces des périmètres des particules d'un squelette granulaire. Elle est estimée selon la méthode suivante : pour chaque fraction retenue sur un des tamis, les particules sont supposées parfaitement sphériques.

- Un rayon moyen des particules est choisi (moyenne entre taille maximale et minimale).
- Le volume d'une particule est déterminé.
- Connaissant la densité des granulats, la masse d'une particule est calculée.
- Le nombre des particules est déterminé en divisant la masse totale de retenu sur le tamis par la masse d'une particule.
- La surface spécifique est déduite en multipliant le nombre des particules par la surface de périmètre d'une particule.
- Pour obtenir la surface spécifique par unité de surface, la surface est divisée par la masse de retenu sur le tamis.

Tableau 2-2: Pourcentages du passant sur chaque tamis pour les granulométries testées

Tamis (mm)	Granulométrie GG (%)	Granulométrie GM (%)	Spécifications ISSA (%)
10	100	100	100
5	95	95	90 - 100
2,5	76	78	65 - 90
1,25	48	58	45 - 70
0,63	25	40	30 - 50
0,315	14	24	18 - 30
0,16	11	16	10 - 21
0,08	10	10	5 - 15
Surface spécifique (m ² /kg)	7,49	8,9	5,79 - 12

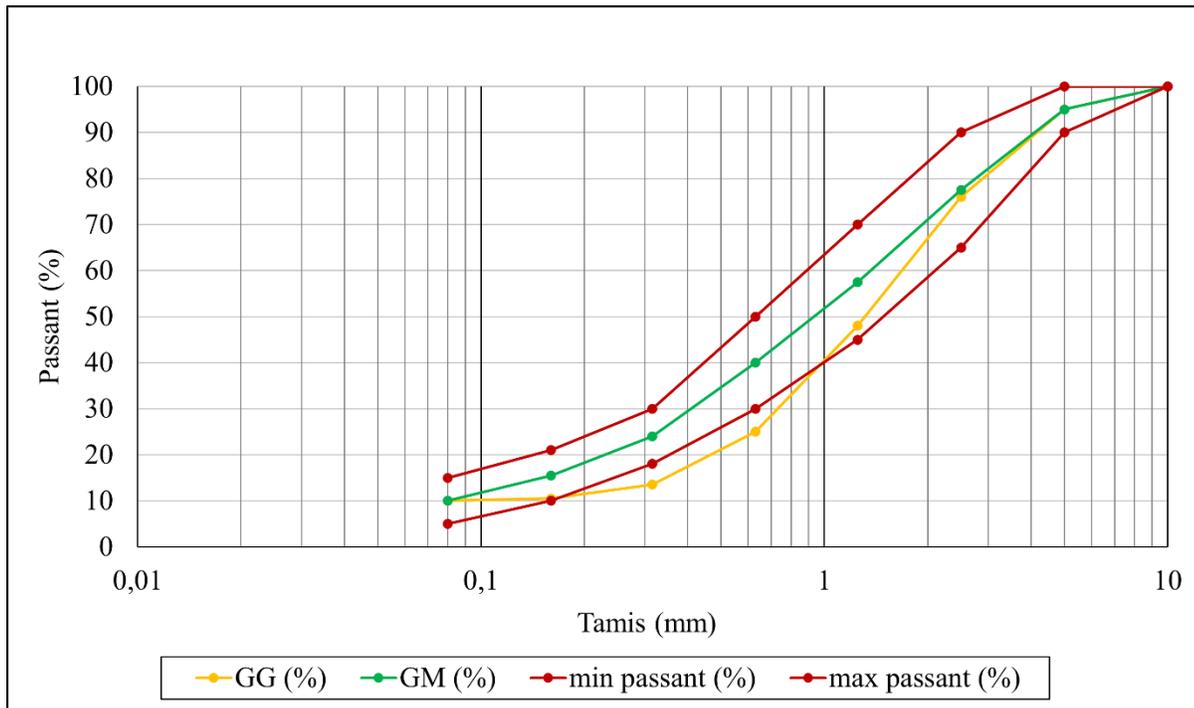


Figure 2-2: Courbes granulométriques des mélanges testés

2.3.2 Bardeaux d'asphalte

Le fournisseur des bardeaux post-consommation est la RITMRG. Ils proviennent de la région de Gaspésie. Les bardeaux sont déchiquetés en particules d'une taille entre 0,08 et 40 mm et livrés au laboratoire LCMB dans des sacs étanches.

Les bardeaux reçus sont répartis dans quatre récipients. Ensuite, ils sont séchés à 40 °C pendant 4 jours dans une étuve pour éviter l'agglomération des particules. Après le séchage, le matériau a perdu 5,34 % de sa masse. La teneur en bitume ne peut pas être déterminée par la méthode conventionnelle en utilisant un four à ignition en raison de la présence de fibres dans les bardeaux.

La densité maximale a été déterminée conformément à la méthode d'essai LC 26-045. Cette méthode est généralement utilisée pour déterminer la densité totale des enrobés ou des granulats bitumineux recyclés. Deux échantillons de 500 g ont été préparés en éliminant les particules d'une taille supérieure à 5 mm. Puis la densité totale a été mesurée à une température de 25,5 °C. Le Tableau 2-3 résume les propriétés déterminées au laboratoire.

Tableau 2-3: Propriétés physiques des bardeaux

Propriété	Méthode d'essai	Unité	Valeur
Teneur en eau	N/A	%	5,34
Densité totale	LC 26-045	-	1,993

Les bardeaux contiennent une quantité importante d'agrégats minéraux. Donc ils sont considérés comme des granulats dans les mélanges formulés. Par conséquent, il est nécessaire de déterminer leur granulométrie.

La granulométrie des bardeaux séchés est évaluée conformément à la méthode d'essai LC 26-040. Les tamis utilisés ont une taille maximale de 5 mm. Les tamis de taille supérieure à 10 mm n'ont pas pu être utilisés. Il est important de noter que les particules d'une taille supérieure à 5 mm ne peuvent pas être utilisées dans la formulation. La Figure 2-3 présente la courbe granulométrique des bardeaux.

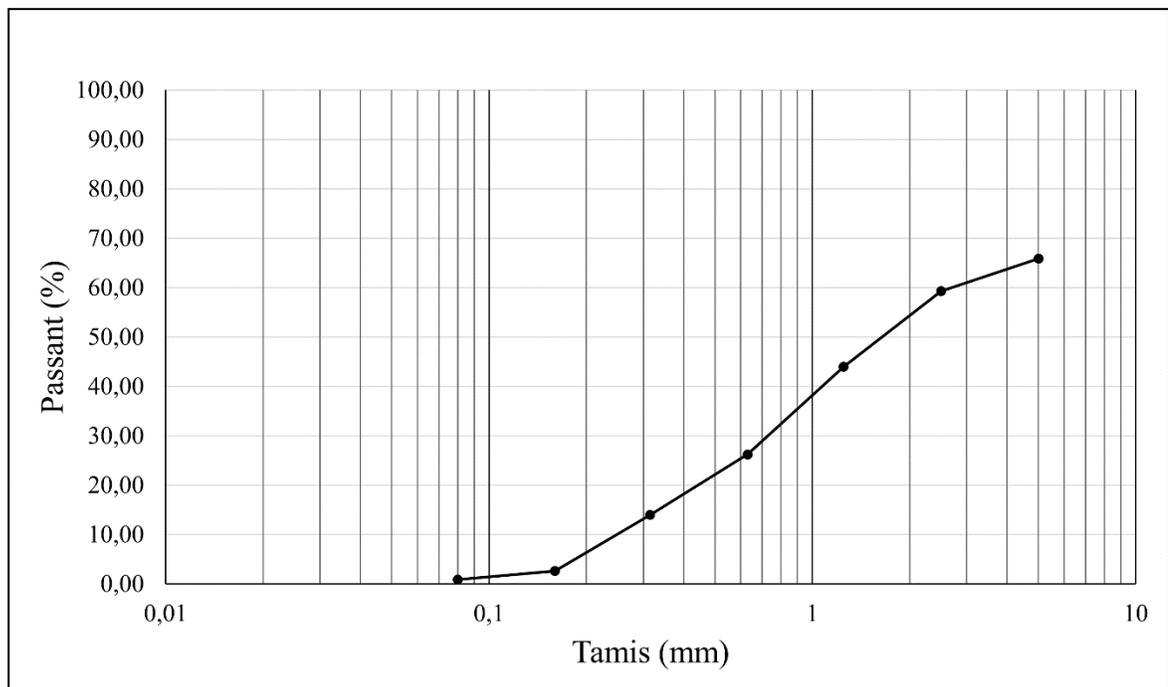


Figure 2-3: Courbe granulométrique des bardeaux post-consommation de RITMRG

2.3.3 Comparaison des granulométries des bardeaux et granulats

La Figure 2-4 compare la granulométrie des bardeaux et des granulats avec le fuseau granulométrique de la méthode de formulation ISSA A143. En effet, les courbes granulométriques ne respectent pas les exigences de la méthode ISSA.

Vu la faible teneur en fines des granulats (seulement 25 % du passant sur le tamis 1,25 mm), des fines provenant de la même source que les granulats d'origine sont utilisés pour corriger la granulométrie des agrégats.

Tous comme les granulats, les bardeaux sont séparés selon la taille des particules. Puis, ils sont entreposés dans des sacs étanches identifiés par leur taille.

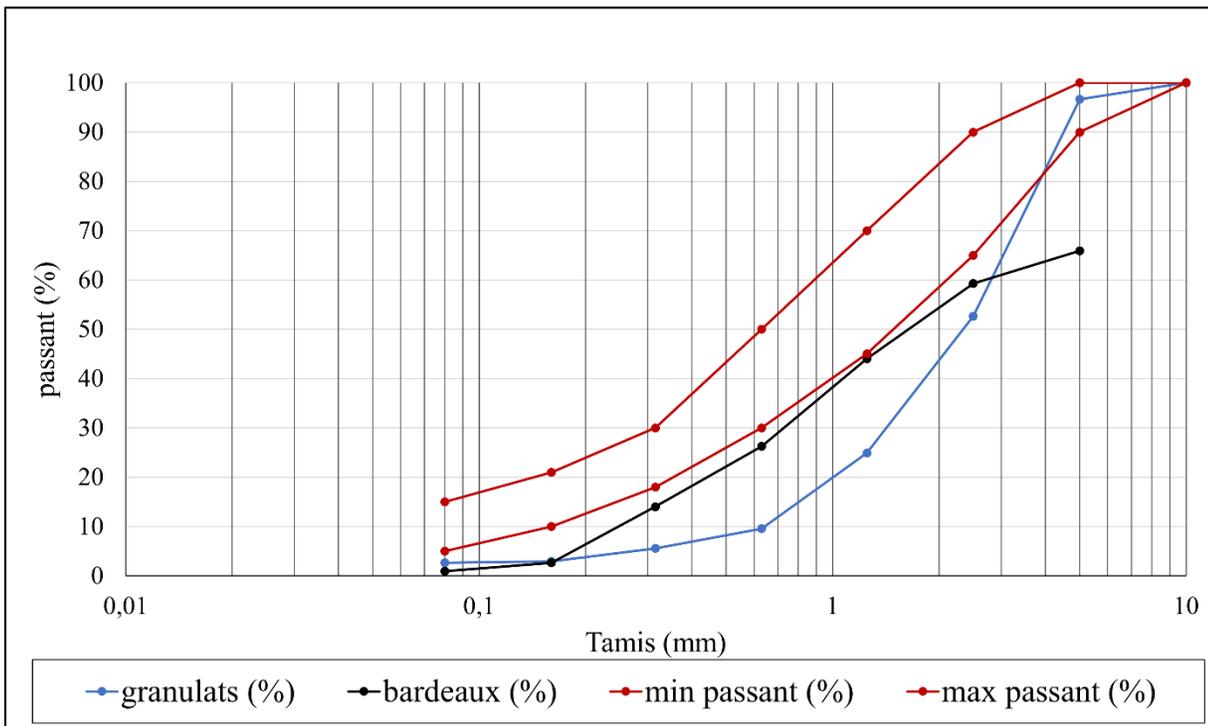


Figure 2-4: Granulométrie des bardeaux et granulats en comparaison avec le fuseau ISSA

2.3.4 Émulsion de bitume

L'émulsion de bitume est constituée principalement par de bitume et de l'eau qui s'évapore durant la prise. Deux types d'émulsion cationique ont été utilisés pour la formulation :

- Émulsion cationique à prise rapide nommée « EnviroColle ».

- Émulsion cationique à prise lente nommée « CSS-1H ».

Les émulsions sont fournies par la compagnie McAsphalt. Les propriétés de l'émulsion EnviroColle sont fournies par le fabricant. Cependant, la pénétrabilité du résidu de distillation n'est pas fournie. Les propriétés de l'émulsion CSS-1H ne sont pas fournies.

Le Tableau 2-4 résume les propriétés de l'émulsion cationique EnviroColle d'après le fabricant McAsphalt. Le taux de résidu de distillation est 63,4 % ce qui répond aux exigences de la méthode ISSA. La valeur du ratio $G^*/\sin\delta$ est déterminée par l'essai DSR (*Dynamic Shear Rheometer*). Elle permet de classer le bitume de l'émulsion. Généralement, pour un bitume (PG Hn-L), le paramètre ($G^*/\sin(\delta)$) doit être supérieur ou égal à 1 kPa à la température H. La valeur du ratio $G^*/\sin\delta$ à 64°C est égale à 1 kPa. Ceci implique que le bitume utilisé pour la fabrication de l'EnviroColle est de grade PG 64.

Tableau 2-4: Propriétés de l'émulsion EnviroColle d'après McAsphalt

Propriété	Résultats	Spécifications		Méthode d'essai
		Min	Max	
Tamis. 850 μm (% masse)	0,01	-	0,10	ASTM D6933
Viscosité Saybolt Furol à 25 °C (s)	35,5	20	100	ASTM D7496
Résidu de distillation à 260 °C (%)	63,4	57	-	ASTM D6997
Huile dans le distillat (%)	0,0	-	-	ASTM D6997
Teneur en cendre (%)	0,13	-	0,50	ASTM D8078
$G^*/\sin\delta$ à 64°C (kPa)	1,00	1,00	3,50	LC 25-012

Des essais complémentaires de caractérisation ont été nécessaires pour valider la conformité des émulsions avec les exigences de la méthode ISSA. Le Tableau 2-5 résume les essais complémentaires réalisés.

Tableau 2-5: Essais de caractérisation complémentaires pour le résidu des émulsions

Essai	Norme	EnviroColle	CSS-1H
Résidu d'évaporation	ASTM D6934		X
Pénétrabilité	ASTM D5/D5M	X	X
DSR	ASSHTO T315		X

Les procédures et les résultats de ces essais sont présentés en détail dans les parties I.1 et I.2 de l'ANNEXE I.

La détermination du taux de résidu de bitume par évaporation est réalisée selon la méthode ASTM D6934. La teneur en résidu d'évaporation pour l'émulsion CSS-1H est 63,36 %. Cette teneur est très similaire à la teneur en résidu de l'émulsion EnviroColle (63,4 %). Les deux émulsions respectent l'exigence minimale de 62 %.

L'essai de pénétrabilité est réalisé en respectant la norme ASTM D5/D5M. Le Tableau 2-6 présente la pénétrabilité moyenne des deux émulsions.

Tableau 2-6: Pénétrabilité moyenne de résidu des émulsions

Type de résidu testé	EnviroColle	CSS-1H
Pénétrabilité moyenne à 25°C, 100g, 5s (0,1 mm)	56	98
Exigence de la méthode ISSA (0,1 mm)	40 - 90	40 - 90

La pénétrabilité du résidu de l'émulsion EnviroColle est inférieure à celle de l'émulsion CSS-1H. Ceci implique que le bitume utilisé pour la fabrication de CSS-1H à un grade inférieur (bitume plus mou) à celui utilisé pour la fabrication de l'EnviroColle.

L'émulsion EnviroColle répond aux exigences de la méthode ISSA relative à la pénétrabilité du résidu contrairement à l'émulsion CSS-1H.

Pour mieux caractériser le résidu de l'émulsion CSS-1H, l'essai DSR a été réalisé selon la norme ASSHTO T315. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2-7.

Tableau 2-7: Résultats de l'essai DSR pour le résidu de l'émulsion CSS-1H

Température (°C)	G*/sinδ (kPa)	Module de cisaillement dynamique (kPa)	Angle de phase (°)	Couple (Nm)
64	0,428	0,427	87,090	1,58E-04
58	0,852	0,850	85,960	3,13E-04
52	1,773	1,764	84,380	6,50E-04

Les résultats montrent que ; $G^*/\sin\delta$ (58°C) est inférieure à 1kPa et $G^*/\sin\delta$ (52°C) est supérieure à 1 kPa. Donc le bitume utilisé pour la formulation de l'émulsion CSS-1H est d'un grade intermédiaire entre PG 58 et PG 52. Cependant, le bitume de l'EnviroColle est de grade PG 64 (confirmé par la valeur de $G^*/\sin\delta$ (64°C) = 1kPa dans le Tableau 2-4). Ceci confirme les résultats de l'essai de pénétrabilité.

Le Tableau 2-8 compare les propriétés des résidus de l'EnviroColle et de CSS-1H.

Tableau 2-8: Résumé des propriétés des résidus de l'EnviroColle et de CSS-1H.

Émulsion	EnviroColle	CSS-1H
Teneur en résidu (%)	63,40	63,36
Pénétrabilité moyenne à 25°C, 100g, 5s (0,1 mm)	56	98
Grade de liant	PG64	PG58 - PG52

2.4 Méthode de formulation et essai de validation

La méthode de formulation adoptée est celle décrite dans le guide technique A143 pour le microsurfaçage publié par ISSA en 2020 (ISSA 2020). Ce guide contient des directives pour la formulation et l'évaluation en laboratoires des mélanges à froid. Une description détaillée de la méthode et les spécifications pour les matériaux utilisés sont présentées dans la partie 1.3.3.1. Les essais de validation qui ont été évalués consistent en :

- Essai de cohésion modifié en conformité avec le bulletin technique ISSA TB 139.
- Essai d'abrasion humide en conformité avec le bulletin technique ISSA TB 100.
- Essai de déplacement latéral en conformité avec le bulletin technique ISSA TB 147.
- Essai du sable adhérent en conformité avec le bulletin technique ISSA TB 109.

2.4.1 Essai de cohésion modifié ISSA TB 139

L'essai est utilisé pour évaluer le développement initial de la prise et du durcissement de mélange. Il peut être utilisé aussi pour établir des teneurs optimales en eau, émulsion et ciment. Cet essai quantifie le temps nécessaire avant qu'un revêtement soit ouvert au trafic. La combinaison appropriée des différents composants du mélange est sélectionnée sur la base des résultats obtenus après 30 et 60 minutes de cure à une température ambiante.

Les valeurs minimales requises sont de 12 kg-cm pour le test après 30 minutes et de 20 kg-cm après 60 minutes de cure.

Appareillage :

- Un testeur de cohésion modifié comme suit :
- Vérin pneumatique à deux extrémités de tige de diamètre 28,5 mm avec une tige de 8 mm de diamètre et 75 mm de longueur.
- Pied en caoutchouc néoprène duromètre de diamètre 28,5 mm et épaisseur 6,3 mm.
- Régulateur de pression d'air avec une vanne de purge aval variable pour maintenir la pression constante.
- Vanne de contrôle à quatre voies avec des vannes de régulation à orifice d'échappement.
- Manomètre à air avec une échelle allant de 0 à 700 kPa.
- Alimentation en air sous pression de 700 kPa.
- Couplemètre capable de mesurer un couple d'au moins 35 kg-cm.
- Moules d'échantillon de 60 mm de diamètre et 6 mm d'épaisseur.
- Spatule en acier pour mélanger ou pour nettoyer le pied en néoprène.
- Une balance capable de mesurer 500 grammes à 0,1 gramme près.
- Un chronomètre
- Pour la calibration du testeur :
- Sable d'Ottawa.
- Papier de sable de calibre 220.

Préparation de l'échantillon et procédure de l'essai :

Un échantillon de granulats, dont la granulométrie est conforme aux exigences de la méthode de formulation, a été préparé. La quantité d'émulsion et d'eau a été ajoutée en fonction de la masse du squelette granulaire. Les composants sont mélangés pendant une durée maximale de 30 secondes. Puis, le mélange est coulé dans un nombre approprié des moules de 6 mm d'épaisseur. Ces moules sont posés sur un papier non absorbant. Les mesures de couple sont réalisées chaque 15 min à partir du temps de coulage. Avant chaque mesure, le moule et le papier non absorbant doivent être enlevés et la pression doit être fixée à 200 kPa. Ensuite le

Le pied en néoprène est abaissé à une vitesse de 8 à 10 cm par seconde (voir Figure 2-5). Après 5 à 6 secondes de compactage, le couple mètre est placé sur l'extrémité supérieure de la tige du cylindre. Puis, il est tourné horizontalement en faisant un angle entre 90° et 120° pendant 0,5 à 0,7 seconde. La mesure du couple est notée pour chaque intervalle de temps. Enfin le pied est relevé et nettoyé par grattage.



Figure 2-5: Dispositif expérimental pour l'essai de cohésion

2.4.2 Essai d'abrasion humide ISSA TB 100

C'est un test de simulation qui mesure les qualités d'usure dans des conditions d'abrasion humide. L'essai établit la teneur minimale en émulsion de bitume nécessaire pour empêcher l'usure excessive du revêtement après cure. L'échantillon de l'essai est imbibé dans l'eau pour 1 heure ou bien 6 jours. L'objectif est d'évaluer la susceptibilité à l'humidité à long terme.

Appareillage :

- Moule plat d'épaisseur 6,35 mm et de diamètre 280 mm.
- Un mélangeur Hobart Type C-100, équipé d'une tête d'abrasion de 2,27 kg, d'une plaque de montage et d'un bac métallique à fond plat de 300 mm de profondeur.
- Feutre de toiture en forme carrée de 300 mm.
- Four dont la température est fixée à 60°C.

- Tuyau recouvert de caoutchouc renforcé de 127 mm de longueur et de 19 mm de diamètre et 6,25 mm d'épaisseur de paroi.
- Un bain marin fixé à 25°C.
- Une balance capable de mesurer 5000 grammes à 1 gramme près.

Préparation de l'échantillon et procédure de l'essai :

Le mélange est préparé de la même façon que pour l'essai de cohésion. Puis, il est coulé dans un moule placé sur un feutre de toiture. Quand le mélange se rigidifie, le moule est enlevé. Ensuite le spécimen subit une cure accélérée dans un four à une température de 60 °C pour une durée de 15 à 30 heures. Après la cure, la masse initiale de l'échantillon est mesurée avant qu'elle soit imbibée dans l'eau à 25°C pour 1 heure ou bien 6 jours.

Après la période d'imbibition, l'échantillon est placé dans le bac de 330 mm de diamètre encore immergé dans l'eau à 6 mm de profondeur. Le tuyau en caoutchouc est placé sur la tête d'abrasion. La plateforme de la machine Hobart est élevée jusqu'à ce que le tuyau soit en contact avec la surface de l'échantillon comme présenté dans la Figure 2-6. Puis l'abrasion de spécimen est réalisée durant 315 secondes.

Après l'essai, l'échantillon est lavé soigneusement pour enlever les débris d'abrasion. Puis, il est séché à une température de 60°C jusqu'à une masse constante. Enfin, la masse finale après l'essai est mesurée. La perte par abrasion par unité de surface est définie par la différence entre la masse initiale avant l'imbibition dans l'eau et la masse finale après l'essai.



Figure 2-6: Dispositif expérimental de l'essai d'abrasion humide

2.4.3 Essai de déplacement latéral ISSA TB 147

C'est un essai de simulation qui détermine la teneur maximale en liant bitumineux en mesurant l'aptitude d'un spécimen à se compacter sous l'action d'une roue chargée. L'évaluation consiste à mesurer le taux de déplacement latéral et vertical (orniérage). La teneur maximale en liant correspond au déplacement latéral minimal. Selon les recommandations d'ISSA, le déplacement latéral ne doit pas dépasser 5 % par rapport à la largeur initiale de l'échantillon.

Appareillage :

- Testeur à roues chargées conçues en respectant les spécifications recommandées par le bulletin technique ISSA TB 147 relative à l'essai de déplacement selon la méthode A.
- Moule d'échantillon de 12,5 mm d'épaisseur, 50,8 mm de largeur et 381 mm de longueur.
- Plaques de montage d'échantillon en acier non oxydable de 0,6 mm d'épaisseur, 76,2 mm de largeur et 406,4 mm de longueur.
- Une charge de 56,7 kg de masse pour charger la roue.
- Bloc de jauge de 4,8 mm d'épaisseur, 12,7 mm de largeur et 101,6 mm de longueur (serve pour déterminer le déplacement vertical).
- Pieds à coulisse capable de mesurer la largeur et l'épaisseur de l'échantillon avant et après essai à 0,01 mm près.

Préparation de l'échantillon et procédure de l'essai :

Un mélange est préparé de la même façon que pour l'essai de cohésion. Puis il est coulé dans un moule placé sur la plaque de montage en acier. Ensuite, il est compacté au même niveau du moule d'épaisseur 12,7 mm. Quand l'échantillon se rigidifie, le moule est enlevé et le spécimen subit une cure de 24 heures à une température ambiante. Puis, elle subit une cure accélérée dans une étuve à 60 °C pour une durée entre 15 et 30 heures. Après la cure, la largeur et l'épaisseur de l'échantillon à mi-section sont mesurées en trois points alignés sur la trajectoire de la roue. L'épaisseur est mesurée en plaçant le bloc de jauge sur la trajectoire de la roue. Ensuite, le spécimen subit 1000 cycles de compactage par une roue chargée de 56,7 kg comme présenté dans la Figure 2-7. Ensuite, l'essai est réalisé à une température ambiante. La largeur et l'épaisseur sont mesurées après l'essai au niveau des points fixés auparavant. Le

déplacement est défini par la différence entre les mesures après et avant essai. Les déplacements latéraux et verticaux sont exprimés en pourcentage de la largeur et épaisseur initiaux. Les spécifications de la méthode ISSA exigent un déplacement latéral et vertical maximal respectivement de 5 % et 10 %.



Figure 2-7: Dispositif expérimental de l'essai de déplacement

2.4.4 Essai du sable adhérent ISSA TB 109

L'essai est utilisé également pour déterminer la teneur maximale en liant afin d'éviter le ressuage au niveau de la surface de roulement. Il consiste à une mesure indirecte de l'excès en liant en mesurant la masse du sable adhérent à l'échantillon après les cycles de compactage par une roue chargée. L'essai peut être considéré comme une suite de l'essai de déplacement.

Appareillage :

- Même appareillage que l'essai de déplacement (ISSA TB 147).
- Cadre de sable en acier ($4,8 \times 38,1 \times 355,6$ mm) avec une face en mousse.
- Plaque métallique de même dimension que l'ouverture du cadre du sable.

Préparation de l'échantillon et procédure de l'essai :

L'essai peut être réalisé à la suite de l'essai de déplacement. Après les 1000 cycles de compactage, la masse initiale de l'échantillon est mesurée. Puis, elle est remontée avec le cadre du sable. La face en mousse du cadre est en contact avec l'échantillon. Ensuite, 100 grammes du sable d'Ottawa, chauffé à 82 °C, sont étalés au niveau de l'ouverture du cadre. Après 100

cycles de compactage avec la roue chargée de 56,7 kg, l'échantillon est démonté. Le sable non adhérent est enlevé. Enfin, la masse finale du spécimen est mesurée. Le taux du sable adhérent par unité de surface est défini par la différence entre la masse initiale et finale divisée par la surface de l'ouverture du cadre placé sur l'échantillon. La méthode ISSA exige un taux du sable adhérent maximal de 807 g/m².

2.5 Campagne expérimentale

La plupart des essais ont été réalisés après une durée de cure accélérée d'au moins 15 heures (les échantillons étant placés dans une étuve à 60 °C). L'essai de cohésion est réalisé sans une durée de cure. Il évalue la vitesse de la montée en cohésion des mélanges dans les 60 premières minutes suivant la formulation.

Les teneurs en émulsion, en eau et en ciment sont calculées par rapport à la masse du squelette granulaire sec. Les mélanges contenant du ciment ont été testés uniquement selon la procédure de l'essai de cohésion. L'essai du sable adhérent n'a pas pu être réalisé pour tous les spécimens en raison des importantes déformations subies lors de l'essai de déplacement.

Les propriétés des matériaux utilisés pour la formulation sont décrites dans la partie 2.3 et l'ANNEXE I.

Les échantillons ont été préparés en suivant les recommandations de la méthode ISSA. Elle précise les étapes de formulation, les durées de malaxage et les temps de cure. Les essais de formulation ISSA sont expliqués en détail dans la partie 2.4.

Pour distinguer les mélanges à granulométrie différente :

- Les mélanges nommés « G1 » jusqu'à « G12 » ont la granulométrie GG.
- Les mélanges nommés « M 1 » jusqu'à « M 12 » ont la granulométrie GM.
- Les mélanges nommés « MS10 » et « MS20 » ont la granulométrie GM.

La campagne expérimentale est divisée en quatre phases :

- **Phase I (étude d'un mélange de référence)** : elle consiste à tester la granulométrie GM avec l'émulsion CSS-1H et à étudier l'effet de la variation des teneurs des différents constituants (émulsion, eau, ciment). L'objectif est d'identifier un mélange de référence avec des teneurs optimales en émulsion et en eau. Douze mélanges sont testés. Les résultats à interpréter sont divisés comme suit :

- ISSA TB139 : essai de cohésion pour les mélanges M1 jusqu'à M12.
- ISSA TB100 : essai d'abrasion pour les mélanges M1 jusqu'à M4.
- ISSA TB147 : essai de déplacement latéral pour les mélanges M1 jusqu'à M4.
- ISSA TB109 : essai du sable adhérent pour les mélanges M1 et M4.

- **Phase II (changement de granulométrie):** elle consiste à varier la granulométrie des mélanges testés dans la phase I. L'objectif est d'étudier l'effet de la variation de la surface spécifique sur les propriétés des mélanges. La granulométrie principalement testée est la granulométrie GG, avec une formulation à base de l'émulsion CSS-1H. Douze mélanges sont testés. Les résultats à interpréter sont divisés comme suit :
 - ISSA TB139 : essai de cohésion pour les mélanges G1 jusqu'à G12.
 - ISSA TB100 : essai d'abrasion pour les mélanges G1 jusqu'à G4.
 - ISSA TB147 : essai de déplacement latéral pour les mélanges G1 jusqu'à G4.
 - ISSA TB109 : essai du sable adhérent pour les mélanges G1 et G4.

- **Phase III (changement de type d'émulsion):** elle consiste à modifier le type d'émulsion utilisé lors de la phase I et II. L'objectif est d'étudier l'effet du changement de type d'émulsion sur les propriétés des mélanges. L'émulsion utilisée est EnviroColle à prise rapide, avec une formulation utilisant la granulométrie GM. Douze mélanges sont testés. Les résultats à interpréter sont divisés comme suit :
 - ISSA TB139 : essai de cohésion pour les mélanges M1 jusqu'à M12.
 - ISSA TB100 : essai d'abrasion pour les mélanges M1 jusqu'à M4.
 - ISSA TB147 : essai de déplacement latéral pour le mélange M1.
 - ISSA TB109 : essai du sable adhérent pour le mélange M1.

La composition de tous les mélanges testés et les essais réalisés durant les phases I à III sont présentés dans le Tableau 2-9.

- **Phase IV (incorporation des bardeaux):** elle consiste à sélectionner un mélange de référence et à incorporer les bardeaux d'asphalte. Le mélange choisi est le mélange M1 (voir Tableau 2-9) avec la granulométrie GM. Deux teneurs volumiques de bardeaux

ont été introduites (10 % et 20 %). L'objectif est d'étudier l'effet de l'incorporation des bardeaux sur les propriétés du mélange.

Il est à noter que les teneurs en RAS sont calculées à partir du volume total du squelette granulaire de façon que le volume total du mélange reste inchangeable. L'incorporation des bardeaux avec les granulats est faite comme suit :

- Le volume total du squelette granulaire est déterminé.
- Les volumes à substituer (10 et 20 % du volume total) sont déterminés. Puis, les masses à substituer sont déterminées.
- Les mêmes volumes substitués sont ajoutés, mais en RAS (la masse est déterminée à partir de la densité des bardeaux).

Deux mélanges sont testés. Les résultats à interpréter sont divisés comme suit :

- ISSA TB139 : essai de cohésion pour les mélanges M1, MS10 et MS20.
- ISSA TB100 : essai d'abrasion pour les mélanges M1, MS10 et MS20.
- ISSA TB147 : essai de déplacement latéral pour les mélanges M1, MS10 et MS20.

La composition de tous les mélanges testés et les essais réalisés durant la phase IV sont présentés dans le Tableau 2-10.

Tableau 2-9: Campagne expérimentale des phases I à III

	Mélange	Émulsion (%) CSS-1H (Phase I et II) EnviroColle (Phase III)	Eau (%)	Ciment (%)	Cohésion ISSA139		Abrasion ISSA100		Déplacement ISSA147		Sable adhérent ISSA109
					30 min (kg- cm)	60 min (kg- cm)	1-h (g/m2)	6-jour (g/m2)	Vertical (%)	Latéral (%)	Sable adhérent (g/m2)
Phase I et III	M1	12,5	9,0	0	X	X	X	X	X	X	X
	M2	15,0	9,0	0	X	X	X	X	X *	X*	
	M3	17,5	9,0	0	X	X	X	X	X*	X*	
	M4	12,5	5,0	0	X	X	X	X	X*	X*	X*
	M5	15,0	5,0	0	X	X					
	M6	17,5	5,0	0	X	X					
	M7	12,5	9,0	1,0	X	X					
	M8	15,0	9,0	1,0	X	X					
	M9	17,5	9,0	1,0	X	X					
	M10	12,5	5,0	1,0	X	X					
	M11	15,0	5,0	1,0	X	X					
	M12	17,5	5,0	1,0	X	X					
Phase II	G1	12,5	9,0	0	X	X	X	X	X	X	X
	G2	15,0	9,0	0	X	X	X	X	X	X	
	G3	17,5	9,0	0	X	X	X	X	X	X	
	G4	12,5	5,0	0	X	X	X	X	X	X	X
	G5	15,0	5,0	0	X	X					
	G6	17,5	5,0	0	X	X					
	G7	12,5	9,0	1,0	X	X					
	G8	15,0	9,0	1,0	X	X					
	G9	17,5	9,0	1,0	X	X					
	G10	12,5	5,0	1,0	X	X					
	G11	15,0	5,0	1,0	X	X					
	G12	17,5	5,0	1,0	X	X					

(*) réalisés durant la phase I seulement.

Tableau 2-10: Campagne expérimentale de la phase IV (incorporation des RAS)

Mélange	Granulats (%)	RAS (%)	Émulsion CSS (%)	Eau (%)	Cohésion ISSA 139		Abrasion ISSA 100		Déplacement ISSA 147	
					30 min (kg-cm)	60 min (kg-cm)	1-h (g/m ²)	6-jour (g/m ²)	Vertical (%)	Latéral (%)
M1	100	0	12,5	9,0	X	X	X	X	X	X
MS10	90	10,0	12,5	9,0	X	X	X	X	X	X
MS20	80	20,0	12,5	9,0	X	X	X	X	X	X

CHAPITRE 3

Résultats et analyse

3.1 Étude d'un mélange de référence

Le but est d'identifier un mélange de référence avec des teneurs optimales en émulsion et en eau. L'émulsion utilisée est CSS-1H dont les propriétés sont présentées dans la partie 2.5. Le squelette granulaire a la granulométrie GM qui correspond au milieu de fuseau granulaire recommandé par la méthode de formulation ISSA. La combinaison (CSS-1H, GM) regroupe les mélanges testés durant cette phase.

Le choix d'un mélange optimal dépend des critères suivants :

- Résistance à l'abrasion humide (ISSA TB100).
- Résistance aux déplacements latéral et vertical (ISSA TB147).
- Résistance au ressuage (ISSA TB109).

3.1.1 Essai de cohésion

Les compositions des mélanges testées et les valeurs de couple obtenues pour chaque mélange sont présentées dans le Tableau 3-1.

Douze mélanges sont préparés en utilisant trois teneurs en émulsion (12,5; 15,0 et 17,5 %) et deux teneurs en eau additionnelle (5 et 9 %). Les mélanges M7 à M12 sont composés avec 1 % de ciment. Le choix d'ajouter du ciment aux échantillons de l'essai de cohésion a été effectué à la suite des résultats obtenus à partir des mélanges sans ciment. L'objectif est d'accélérer la cohésion des ECF durant la première heure de formulation. Toutes les teneurs sont calculées en fonction de la masse du squelette granulaire.

Chaque essai consiste à préparer quatre échantillons identiques conformément à la méthode d'essai ISSA TB139 et de mesurer la valeur du couple pour chaque spécimen après 15, 30, 45 et 60 min de cure à une température ambiante et ceci pour les 12 mélanges préparés.

La Figure 3-1 présente une classification des mélanges en fonction de l'évolution de couple dans le temps.

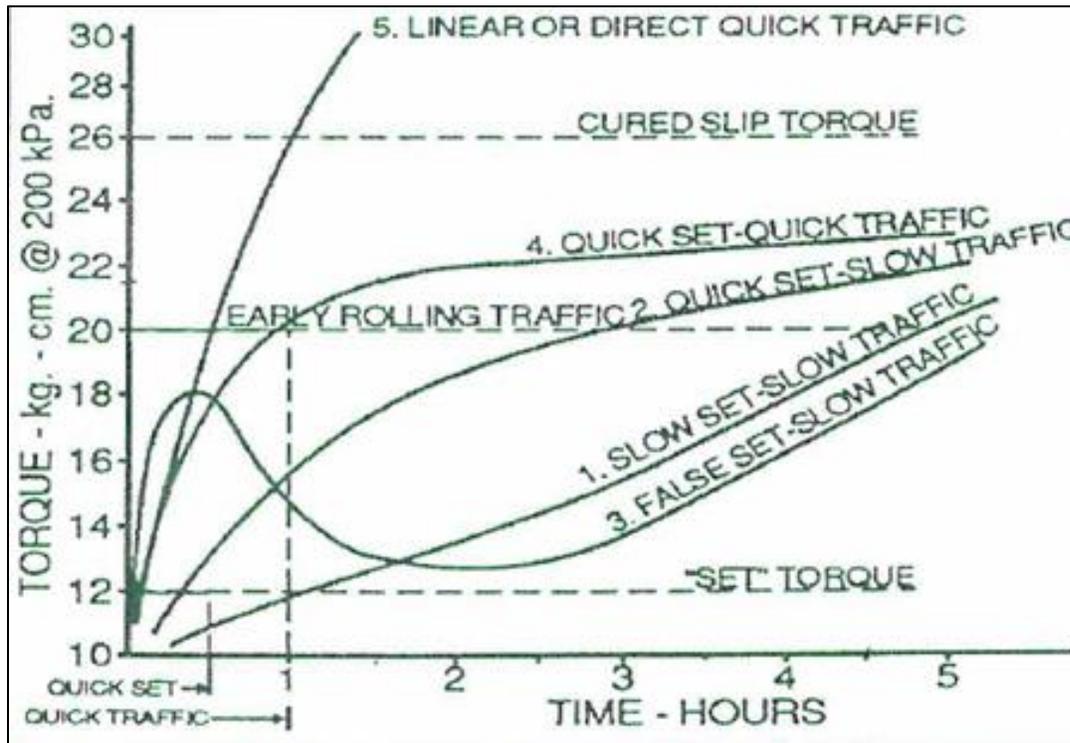


Figure 3-1: Classification des mélanges par l'essai de cohésion (ISSA 2017)

La méthode de formulation ISSA A143 recommande deux valeurs minimales de couple qui doit être obtenue (ISSA 2017) :

- Après 30 min : 12 kg-cm, pour un mélange à prise rapide (*quick set*).
- Après 60 min : 20 kg-cm, pour une réouverture rapide de la route (*quick traffic*). Ceci indique que l'ECF peut résister aux sollicitations d'un trafic roulant.

Les valeurs de couple obtenues pour tous les mélanges préparés sont sensiblement les mêmes. La gamme des valeurs varie entre 11,0 et 12,5 kg-cm après 30 min et entre 12,0 et 13,5 kg-cm après 60 min, la variation des teneurs en émulsion et en eau a eu une faible influence sur la vitesse de rupture des mélanges.

Les résultats montrent que tous les mélanges testés appartiennent à la classe « *slow set-slow traffic* » (voir Figure 3-1). Les mélanges de cette classe ne peuvent résister aux sollicitations du trafic qu'après une durée minimale de 5 heures. La réouverture rapide de la route au trafic roulant n'est pas possible.

Tableau 3-1: Composition des mélanges et valeurs de couple pour la combinaison (CSS-1H, GM)

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Ciment (%)	Cohésion ISSA 139 (CSS-1H, GM)	
				30 min (kg-cm)	60 min (kg-cm)
M1	12,5	9,0	0	12,0	13,0
M2	15,0	9,0	0	11,0	13,0
M3	17,5	9,0	0	12,5	13,5
M4	12,5	5,0	0	11,5	13,5
M5	15,0	5,0	0	11,0	12,0
M6	17,5	5,0	0	12,0	13,0
M7	12,5	9,0	1,0	12,0	12,5
M8	15,0	9,0	1,0	12,5	13,5
M9	17,5	9,0	1,0	11,5	12,0
M10	12,5	5,0	1,0	12,0	12,5
M11	15,0	5,0	1,0	12,5	13,0
M12	17,5	5,0	1,0	12,5	13,0

La comparaison des valeurs de couple après 30 et 60 min montre une augmentation faible de la cohésion. En se basant sur des études antérieures (Garfa 2018), une teneur de 1 % de ciment Portland a été incorporée dans les mélanges M7 à M12. L'objectif est d'accélérer la cohésion et atteindre les exigences de la méthode ISSA pour les mélanges « *quick set-quick traffic* ». Les valeurs du couple n'ont pas montré un effet significatif sur la cohésion des mélanges en comparant avec celles obtenues sans l'ajout du ciment. En effet, elles sont similaires et varient entre 11,5 et 13,5 kg-cm. La montée en cohésion, en passant de 30 à 60 min, est similaire à celle observée pour les mélanges sans ciment.

Le ciment est un accélérateur de rupture. Il réagit avec l'eau du mélange et favorise la cure de l'émulsion. Généralement, la teneur en ciment et la montée en cohésion sont corrélées (Garfa 2018). Les résultats obtenus ont montré que le ciment n'a pas eu un effet sur la vitesse de rupture. La quantité ajoutée a donc changé la granulométrie des mélanges en agissant comme filler (passant de 80 μm). Ceci peut causer un excès de filler et une rigidification prématurée qui freine la montée en cohésion. L'ajout du ciment peut également diminuer significativement la teneur en eau. Ceci peut empêcher l'enrobage total des particules.

La Figure 3-2 présente les résultats de l'essai de cohésion pour la combinaison (CSS-1-H, GM).

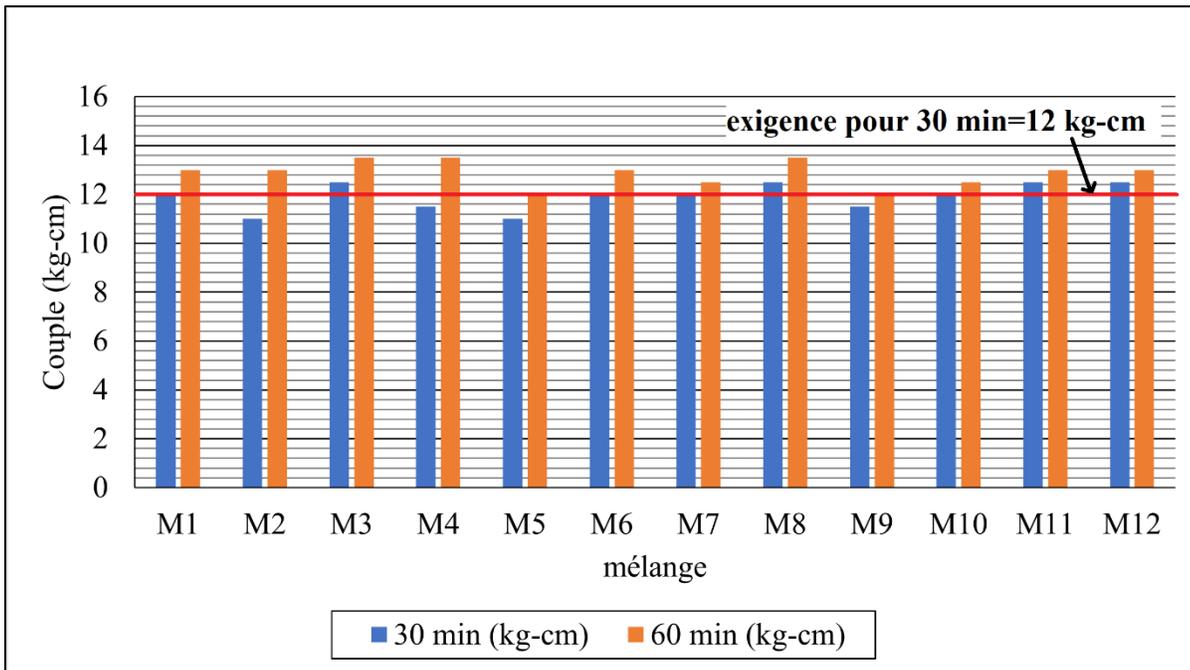


Figure 3-2: Résultats de l'essai de cohésion des mélanges à Granulométrie GM et émulsion CSS-1H

Ces résultats sont similaires à ceux d'une étude antérieure (Garfa 2018), dans laquelle il n'a pas été possible d'accélérer la montée en cohésion. Dans cette étude, la cohésion a été évaluée sur une plus longue durée. Deux mélanges sont formulés en utilisant deux types d'émulsion à prise lente, puis testés. L'exigence ISSA pour les mélanges « *quick set-quick traffic* » n'a été atteinte qu'après 33 heures de la formulation.

3.1.2 Essai d'abrasion humide

Les compositions des mélanges testées et la perte par abrasion pour chaque mélange sont présentées dans le Tableau 3-2.

Quatre mélanges ont été préparés avec trois teneurs en émulsion (12,5; 15,0 et 17,5 %) et deux teneurs en eau additionnelle (5 et 9 %). L'ajout du ciment n'a pas été envisagé pour l'essai d'abrasion humide. Toutes les teneurs sont calculées en fonction de la masse de squelettes granulaire. L'objectif de cet essai est de déterminer la teneur optimale en émulsion tout en évaluant la résistance à l'abrasion et la susceptibilité des mélanges formulés à l'humidité.

Chaque essai consiste à préparer deux échantillons identiques conformément à la méthode d'essai ISSA TB100. Après une cure accélérée de 24 heures dans une étuve à 60 °C, les deux spécimens sont testés respectivement après 1 heure et 6 jours d'imbibition dans l'eau et ceci pour les 4 mélanges préparés. La perte par unité de surface est déterminée en multipliant la masse perdue par un facteur de correction précisé dans le bulletin technique ISSA TB100. Ce facteur représente l'inverse de la surface abrasé. Il dépend du type du dispositif expérimental utilisé durant l'essai. Pour le cas étudié, le facteur de correction est 32,9 m².

La méthode de formulation ISSA A143 recommande deux valeurs maximales de perte par unité de surface selon la durée d'imbibition :

- Pour l'imbibition de 1 heure : un maximum de 538 g/m².
- Pour l'imbibition de 6 jours : un maximum de 807 g/m².

Tableau 3-2: Composition des mélanges et perte par unité de surface pour (CSS-1-H, GM)

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Perte par unité de surface de (CSS-1H, GM) (g/m ²)	
			1-Heure	6-Jours
M1	12,5	9,0	319,13	694,19
M2	15,0	9,0	259,91	407,96
M3	17,5	9,0	207,27	368,48
M4	12,5	5,0	450,73	681,03

Les valeurs obtenues pour tous les mélanges répondent aux exigences de la méthode ISSA. La perte par abrasion après 6 jours d'imbibition est largement plus grande que celle après 1 heure d'imbibition pour tous les mélanges. Une tendance des valeurs a été observée en variant les teneurs en émulsion et en eau. Cette tendance est maintenue même après 6 jours d'imbibition. La Figure 3-3 présente les pertes par abrasion obtenues pour tous les mélanges après 1 heure et 6 jours d'imbibition dans l'eau. Dans les mélanges M1, M2 et M3, la teneur en eau est maintenue constante à 9 % tandis que la teneur en émulsion est respectivement 12,5; 15,0 et 17,5 %. La perte par abrasion est inversement corrélée à la teneur en émulsion, les teneurs en émulsion plus élevées ont mené à la formulation d'un matériau plus résistant à l'abrasion et moins susceptible à l'humidité à long terme. Cela peut être attribué à la facilité d'enrober toutes les particules avec des quantités de résidu bitumineux plus importantes. Le film bitumineux

formé est donc continu et perméabilise la surface de l'échantillon. Ceci réduit considérablement la susceptibilité à l'humidité.

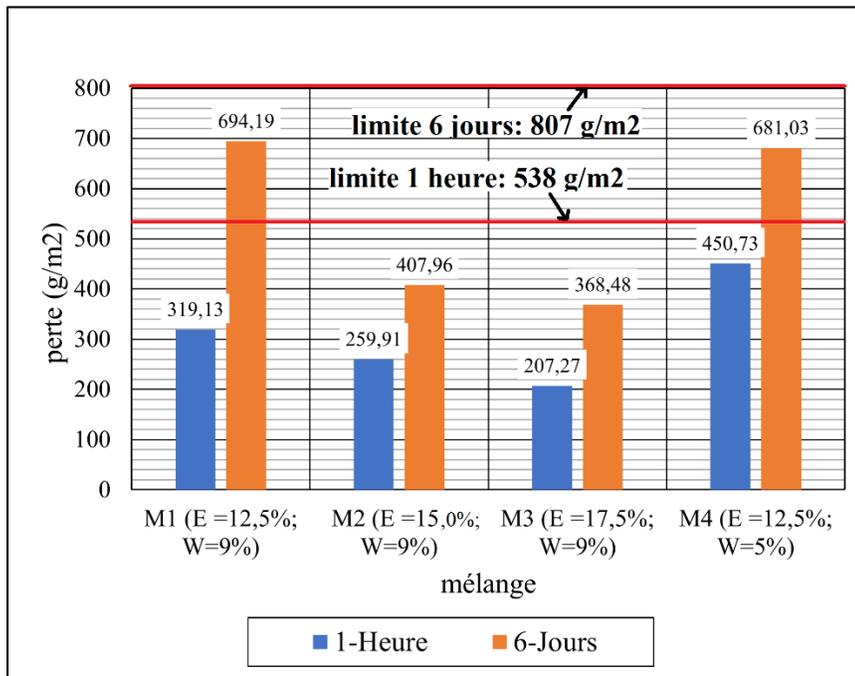


Figure 3-3: Perte par abrasion de la granulométrie GM avec CSS-1H (E : Émulsion, W : eau)

En variant la teneur en eau de 9 % à 5 % avec une teneur en émulsion de 12,5 % dans le cas des mélanges respectifs M1 et M4, la perte augmente légèrement. Cela implique que la perte par abrasion est corrélée à la teneur en eau du mélange. En effet, dans une formulation à froid, le rôle de l'eau est principalement de saturer les granulats. Ceci empêche l'absorption de l'eau d'émulsion, ce qui peut causer une rupture prématurée du mélange. Il sert aussi à « lubrifier » la surface des particules pour faciliter l'enrobage total du squelette granulaire. Une teneur insuffisante en eau peut limiter ces rôles et causer une résistance à l'abrasion moins élevée. La perte par abrasion du mélange M1, avec une teneur en émulsion de 12,5 % et en eau de 9 %, est inférieure aux limites exigées par la méthode de formulation. La teneur optimale en émulsion est donc fixée à 12,5 %.

Il est à noter que ces résultats sont obtenus à la suite d'un nombre des essais limité et que des études ultérieures ont montré la faible consistance de cette méthode pour la sélection d'une teneur minimale de liant.

3.1.3 Essai de déplacement latéral

Les compositions des mélanges testées et les déplacements latéraux et verticaux obtenus sont présentés dans le Tableau 3-3.

Quatre mélanges ont été préparés avec trois teneurs en émulsion (12,5; 15,0 et 17,5 %) et deux teneurs en eau additionnelle (5 et 9 %). Toutes les teneurs sont calculées en fonction de la masse de squelettes granulaire. L'objectif de cet essai est de sélectionner la teneur optimale en liant en évaluant la résistance aux déformations permanentes (orniérage).

Chaque essai consiste à préparer quatre échantillons conformément à la méthode d'essai ISSA TB147. Après une cure de 24 heures à une température ambiante, chaque échantillon subit une cure accélérée dans une étuve à 60 °C. L'objectif de cette durée de cure prolongée est de diminuer au maximum la teneur en eau de l'échantillon. En effet, la préparation du spécimen consiste à faire couler le mélange sur une plaque métallique en une épaisseur de 12,7 mm. Ceci peut retarder le processus d'évaporation de l'eau. Après la deuxième cure, l'échantillon est testé conformément à la méthode d'essai et les déplacements sont déterminés. La Figure 3-4 précise la direction des déplacements à considérer.

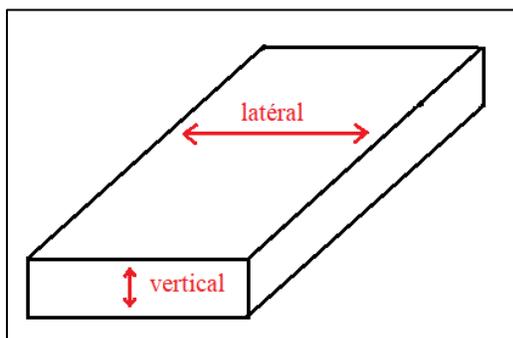


Figure 3-4: La direction de déplacement latéral et vertical à considérer

La méthode de formulation ISSA A143 recommande deux valeurs maximales de déplacements :

- Déplacement latéral maximal de 5 %
- Déplacement vertical maximal de 10 %.

Il est à noter que l'évaluation du déplacement vertical est facultative. En effet, la résistance à l'orniérage n'est pas une propriété visée pour les enrobés de microsurfaçage coulés à froid.

Tableau 3-3: Les valeurs de déplacement pour la granulométrie GM avec CSS-1H

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Déplacement latéral (%)	Déplacement vertical (%)
M1	12,5	9,0	16,5	27,7
M2	15,0	9,0	45,2	48,6
M3	17,5	9,0	65,3	47,8
M4	12,5	5,0	22,6	21,2

Tous les déplacements latéraux et verticaux obtenus sont largement supérieurs aux limites recommandées par la méthode ISSA. Tous les déplacements latéraux sont supérieurs à 16,5 % (mélange M1) et les déplacements verticaux sont supérieurs à 21,2 % (mélange M4). Les mélanges formulés ont une faible résistance à l'orniérage. Ces résultats peuvent être expliqués par l'incompatibilité des granulats avec l'émulsion CSS-1H utilisée pour la formulation. Les valeurs de déplacement latéral et vertical sont présentées dans la Figure 3-5.

Les mélanges M2 et M3 sont les moins résistants au compactage par la roue chargée. En effet, les spécimens ont eu une surface ondulée au niveau de la trajectoire de la roue après les 500 premiers cycles. Cela a engendré des sollicitations verticales supplémentaires et des valeurs de déplacements latéraux supérieures à 50 %.

Pour les mélanges M1, M2 et M3, les déplacements latéraux et verticaux sont corrélés à la teneur en émulsion. En effet, une teneur plus élevée en émulsion peut engendrer une épaisseur du film de bitume plus grande autour des particules. Cela favorise leur mobilité et diminue considérablement la résistance aux sollicitations mécaniques appliquées.

Le mélange M1 a été le plus résistant au déplacement latéral. La teneur optimale en émulsion est donc fixée à 12,5 %.

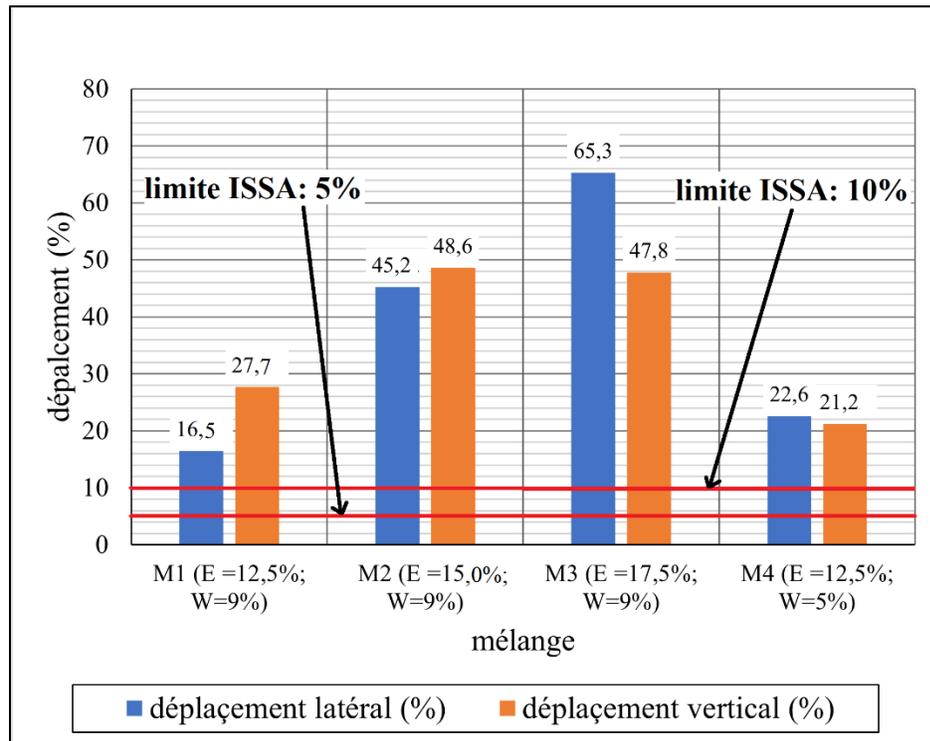


Figure 3-5: Les valeurs de déplacement latéral et vertical de GM avec CSS-1H (E : Émulsion, W : eau)

3.1.4 Essai du sable adhérent

Les compositions des mélanges testées et les masses du sable adhérent sont présentées dans le Tableau 3-4. Il est à noter que l'essai du sable adhérent est réalisé après l'essai de déplacement. Les mélanges M2 et M3 ont eu des valeurs de déplacement latéral et vertical relativement grandes. Ces déplacements ont causé des fissurations longitudinales et des arrachements du matériau. Ces mélanges ne peuvent pas être donc testés selon les procédures de l'essai du sable adhérent. Les mélanges testés ont une teneur en émulsion de 12,5 % et deux teneurs en eau (9 et 5 %). La formulation est faite principalement avec l'émulsion CSS-1H.

Après l'essai de déplacement, un cadre du sable est placé sur la surface ornierée de l'échantillon. Puis, une masse de 100 g du sable d'Ottawa, chauffé à 80 °C, est étalée au niveau de son ouverture. Ensuite, le sable est couvert par une plaque métallique. Enfin, l'échantillon subit 100 cycles de compactage par une roue chargée de 57,6 kg. La différence de la masse avant et après l'essai constitue la quantité du sable adhérent. Afin d'obtenir la valeur par unité de surface, la masse obtenue est divisée par la surface de l'ouverture du cadre du sable (1,3548

× 10⁻² m²). L'Objectif de l'essai est de déterminer la teneur optimale en émulsion pour éviter le ressuage. Il s'agit d'une quantification indirecte de l'excès de bitume dans le matériau. La méthode de formulation ISSA A143 exige une valeur maximale du sable adhérent de 538 g/m².

Tableau 3-4: Compositions et masse du sable adhérent pour la Granulométrie GM avec CSS-1H

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Sable adhérent (g/m ²)
M1	12,5	9,0	383,82
M4		5,0	332,15

Tous les mélanges testés répondent à l'exigence de la méthode ISSA. La quantité maximale du sable adhérent trouvé est 383,82 g/m² pour le mélange M1.

Le mélange M4 a une valeur du sable adhérent légèrement inférieure à celle du mélange M1. En effet, la diminution de la teneur en eau peut limiter l'enrobage des particules et donc limite le ressuage du liant au niveau de la surface.

3.1.5 Sommaire

Les résultats de l'essai de cohésion ont montré que la variation de la teneur en émulsion et en eau n'a pas eu un effet sur la vitesse de rupture des mélanges. L'incorporation du ciment dans les mélanges n'a pas aussi un effet sur la montée en cohésion. Les 12 mélanges testés appartiennent à la classe « *slow set-slow traffic* ». La réouverture rapide au trafic roulant n'est pas possible pour les mélanges de cette classe. La cohésion des mélanges doit être évaluée pour des durées plus longues. Les résultats de l'essai d'abrasion humide ont montré qu'il y a une corrélation entre la résistance à l'abrasion et la teneur en émulsion. Tous les mélanges préparés pour cet essai respectent l'exigence de la méthode ISSA. Les résultats de l'essai de déplacement sont largement supérieurs aux limites exigées et ils ont montré que le taux de déplacement est corrélé avec la teneur en émulsion. Les résultats de l'essai du sable adhérent ont montré qu'une teneur en émulsion de 12,5% n'engendre pas un ressuage excessif au niveau de la surface de l'enrobé. Le mélange M1, contenant 12,5% d'émulsion et 9% d'eau, est le mélange optimal parmi les douze mélanges testés.

Compte tenu des résultats insatisfaisantes, un changement de la granulométrie et de type de l'émulsion a été envisagée.

3.2 Impact de la granulométrie sur les mélanges sans bardeau

L'objectif est d'étudier l'effet de la variation de la granulométrie du squelette granulaire sur les propriétés des mélanges. Les mélanges testés ont la granulométrie GG. L'émulsion utilisée est CSS-1H. La composition des mélanges est présentée dans le Tableau 2-9. La combinaison (CSS-1H, GG) regroupe les mélanges testés durant cette phase.

Les résultats détaillés de cette phase sont regroupés à l'ANNEXE II. Les résultats présentés dans les parties suivantes se concentrent sur la comparaison des deux granulométries GG et GM. Les procédures des essais sont les mêmes que dans la phase I.

3.2.1 Essai de cohésion

La Figure 3-6 présente les valeurs du couple mesurées après 60 minutes pour chaque mélange de la combinaison (CSS-1H, GG) en comparaison avec la combinaison (CSS-1H, GM).

Les valeurs mesurées restent sensiblement les mêmes pour les deux durées de maturation. La variation de la teneur en émulsion et en eau ainsi que l'incorporation du ciment n'ont pas eu un effet sur la montée en cohésion des mélanges à granulométrie GG.

Cela implique une faible influence de la granulométrie sur la cohésion des mélanges. Habituellement, la teneur en fines (particules inférieures à 1,25 mm) influe sur l'augmentation de la cohésion des ECF. Des études antérieures ont montré que les mélanges préparés avec des granulométries grossières ont une vitesse de montée en cohésion plus faible que celle des mélanges préparés avec des granulométries plus fines (Robati 2012, Garfa 2018). Ceci peut être expliqué par la variation de la surface spécifique selon la granulométrie. En effet, une granulométrie plus fine a une surface spécifique plus grande. La surface à enrober est donc plus large que celle d'une granulométrie grossière. L'émulsion « doit » donc enrober les particules avec une couche plus mince. Cela favorise l'évaporation de l'eau et donc accélère la rupture du mélange et la montée en cohésion. De plus, une granulométrie grossière favorise l'agglomération de l'émulsion libre non absorbée par les particules granulaires. La prise du mélange est donc retardée.

Généralement, la teneur en fine et le taux de liant sont corrélés. Cependant, un excès en liant engendre une faible résistance mécanique. Un excès en fines peut causer une rupture prématurée et une rigidification des ECF. Les granulométries GG et GM peuvent engendrer respectivement un excès en liant et en fines. Ceci peut expliquer le manque de corrélation entre la variation de la montée en cohésion et la granulométrie des mélanges.

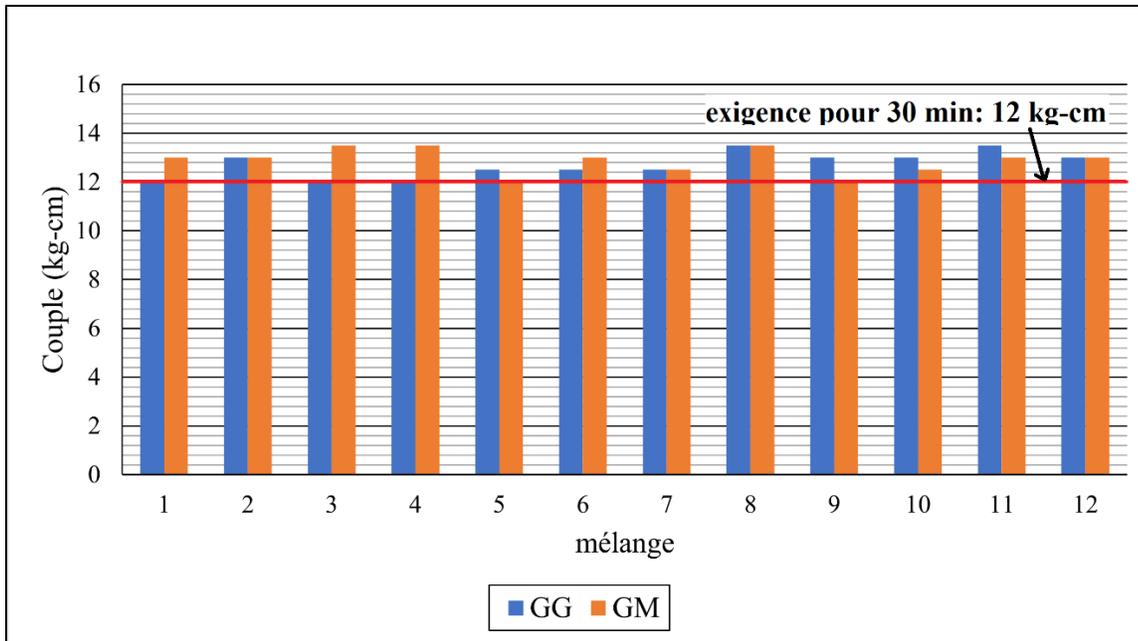


Figure 3-6: Comparaison des mesures de couple après 60 min des mélanges à Granulométrie GG et GM

3.2.2 Essai d'abrasion

La Figure 3-7 présente la perte par abrasion des mélanges à granulométrie GG en comparaison avec ceux à granulométrie GM après une heure d'imbibition. Tous les mélanges à granulométrie GG respectent les limites exigées par la méthode de formulation. L'influence de la variation de la teneur en eau et en émulsion est la même pour les deux granulométries.

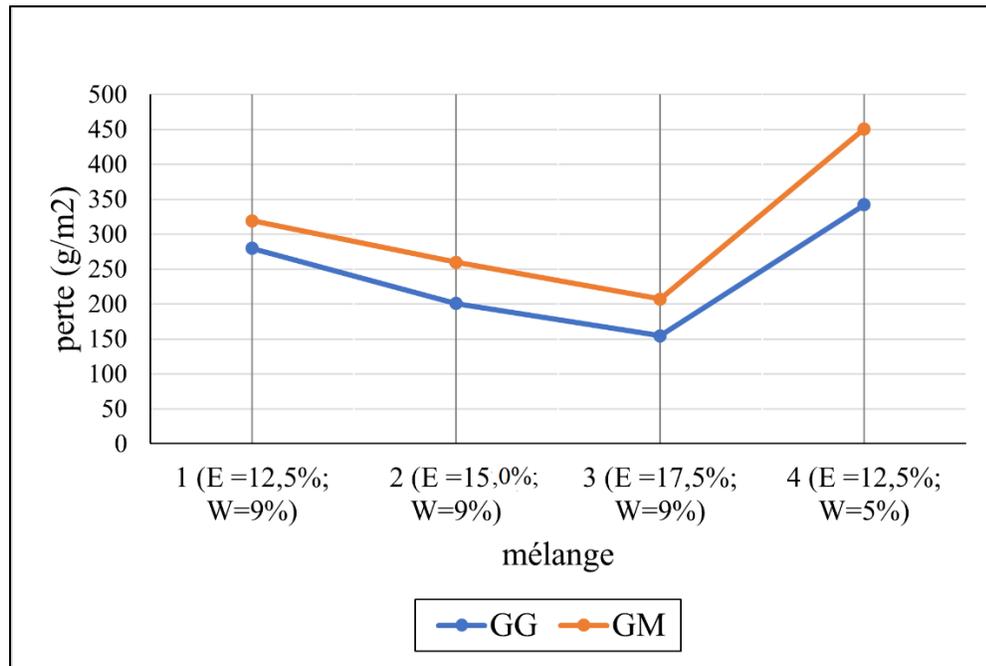


Figure 3-7: Perte par abrasion de GG vs GM avec CSS-1H après 1-h d'imbibition (E : Émulsion, W : eau)

Les quatre mélanges préparés avec la granulométrie GM ont eu une perte plus grande que celle des mélanges préparés avec la granulométrie GG. La surface spécifique du squelette granulaire est corrélée à la perte par abrasion. En effet, pour la même teneur en émulsion; les particules d'un mélange à granulométrie grossière sont plus enrobées que ceux d'un mélange plus fin et donc plus résistantes à l'abrasion. Habituellement, une granulométrie grossière est plus résistante à l'abrasion qu'une granulométrie plus fine. Ceci est bien confirmé dans le cas étudié.

Cependant, des études antérieures ont montré qu'une granulométrie plus grossière peut avoir des pertes par abrasion plus grande qu'une granulométrie relativement plus fine (Robati 2012). Ceci est dû à la teneur en vide plus élevé dans la granulométrie grossière. Ces vides favorisent l'agglomération de l'émulsion et donc retardent la prise du mélange. Ils engendrent un problème de cohésion totale des particules et donc augmente la susceptibilité du matériau formulé à l'abrasion.

3.2.3 Essai de déplacement latéral

Les figures 3-8 et 3-9 présentent respectivement les valeurs de déplacement latéral et vertical pour les mélanges à granulométrie GG en comparaison avec ceux de la granulométrie GM. Pour les mélanges 1 et 2, la granulométrie GG est légèrement plus résistante au déplacement que la granulométrie GM. Cette tendance n'a pas été maintenue pour les valeurs de déplacement qui dépassent 50 %. Habituellement, les granulométries plus grossières sont plus résistantes aux sollicitations mécaniques que les granulométries fines.

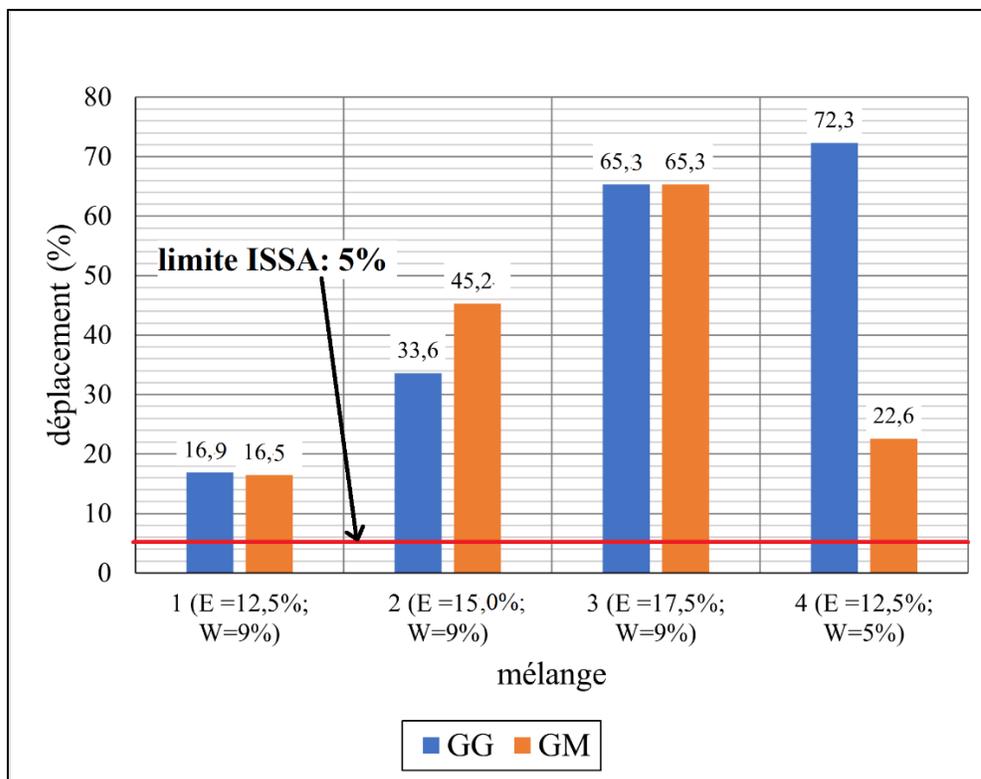


Figure 3-8: Valeurs de déplacement latéral de GG vs GM avec CSS-1H après 1000 cycles (E : Émulsion, W : eau)

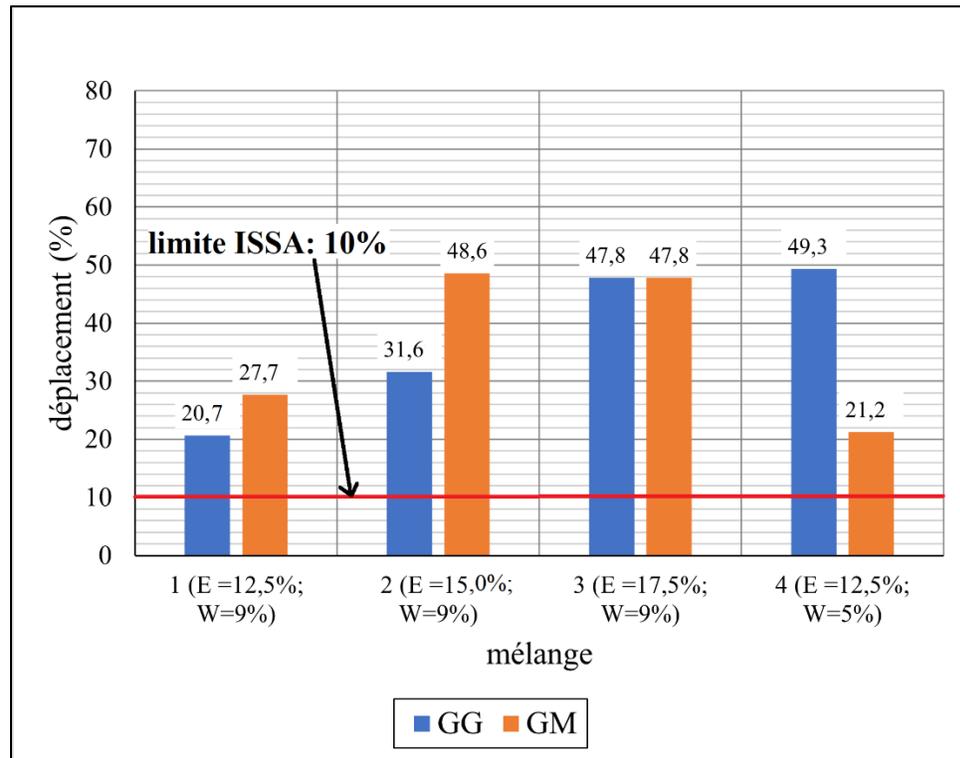


Figure 3-9: Valeurs de déplacement vertical de GG vs GM avec CSS-1H après 1000 cycles (E : Émulsion, W : eau)

3.2.4 Essai du sable adhérent

Compte tenu des résultats de l'essai de déplacement, l'essai du sable adhérent ne peut être réalisé que pour le mélange G1. Les déplacements latéral et vertical sont respectivement de 16,9 % et 20,7 %. Le Tableau 3-5 présente la composition et la masse du sable adhérent pour les mélanges G1 et M1.

Tableau 3-5: Composition et masse du sable adhérent de G1 et M1 formulé avec CSS-1H

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Sable adhérent (g/m ²)
G1	12,5	9,0	391,20
M1			383,82

Le mélange M1 a une valeur du sable adhérent légèrement inférieure à la valeur pour le mélange G1. La quantité du sable adhérent est donc inversement corrélée à la surface

spécifique du squelette granulaire. En effet, pour la même teneur en liant, l'épaisseur du film de bitume autour des particules est plus grande dans les mélanges à granulométrie GG que celui dans les granulométries GM. Ceci favorise la mobilité des granulats durant le compactage et la migration du liant vers la surface. De plus, la teneur en vides d'une granulométrie GG est supérieure à celle d'une granulométrie GM, l'excès en liant qui occupe ces vides migre vers la surface durant le compactage du matériau.

3.2.5 Sommaire

La modification de la granulométrie des mélanges de GM à GG n'a pas eu un effet sur les résultats de l'essai de cohésion. Tous les mélanges préparés appartiennent à la classe « *slow set-slow traffic* ». Les résultats de l'essai d'abrasion ont montré que la perte par abrasion est corrélée à la surface spécifique. Les valeurs des pertes pour la granulométrie GG sont légèrement inférieures à ceux de la granulométrie GM. La variation de la granulométrie n'a pas amélioré la résistance aux déformations des mélanges.

3.3 Impact de type d'émulsion sur les mélanges sans bardeau

L'objectif est d'étudier l'effet de la modification du type d'émulsion sur les propriétés des mélanges. L'émulsion utilisée pour la formulation est EnviroColle. Ses propriétés sont présentées dans la partie 2-5. Les mélanges testés ont la granulométrie GM. La composition des mélanges est présentée dans le Tableau 2-9. La combinaison (EnviroColle-GM) regroupe les mélanges testés durant cette phase.

Les essais réalisés sont principalement l'essai de cohésion et d'abrasion humide.

Les résultats détaillés de cette phase sont regroupés à l'ANNEXE III, les résultats présentés dans les parties suivantes se concentrent sur la comparaison de l'EnviroColle avec CSS-1H.

3.3.1 Essai de cohésion

La Figure 3-10 présente les valeurs de couple des mélanges préparés en utilisant EnviroColle en comparaison avec ceux préparés en utilisant CSS-1H. Tous les mélanges préparés avec l'EnviroColle, sauf M1 et M4, ont présenté une montée en cohésion plus significative que celle préparée avec l'émulsion CSS-1H. Cependant, les couples mesurés sont toujours inférieurs à l'exigence pour la réouverture rapide au trafic. Les mélanges avec l'EnviroColle appartiennent

à la classe « *slow set-slow traffic* » (voir Figure 3-1). Comme l'EnviroColle est une émulsion à prise rapide, la vitesse de rupture des mélanges préparés avec cette émulsion est supérieure à celle des mélanges préparés avec CSS-1H. En effet, la cohésion des mélanges à froid est une conséquence de la prise de l'émulsion. Cette rupture dépend largement de la nature des granulats et de l'émulsion utilisée. Une émulsion à prise rapide peut engendrer une rupture prématurée et une formation d'une agglomération de bitume. Ceci peut engendrer des valeurs de couple plus grandes en comparant avec une émulsion à prise lente. Comme le film de bitume formé n'enrobe pas toutes les particules. La cohésion des mélanges formés reste insuffisante pour satisfaire à l'exigence de réouverture rapide au trafic (20 kg-cm après 60 min).

La Figure 3-11 montre la différence entre deux mélanges préparés avec CSS-1H et EnviroColle.

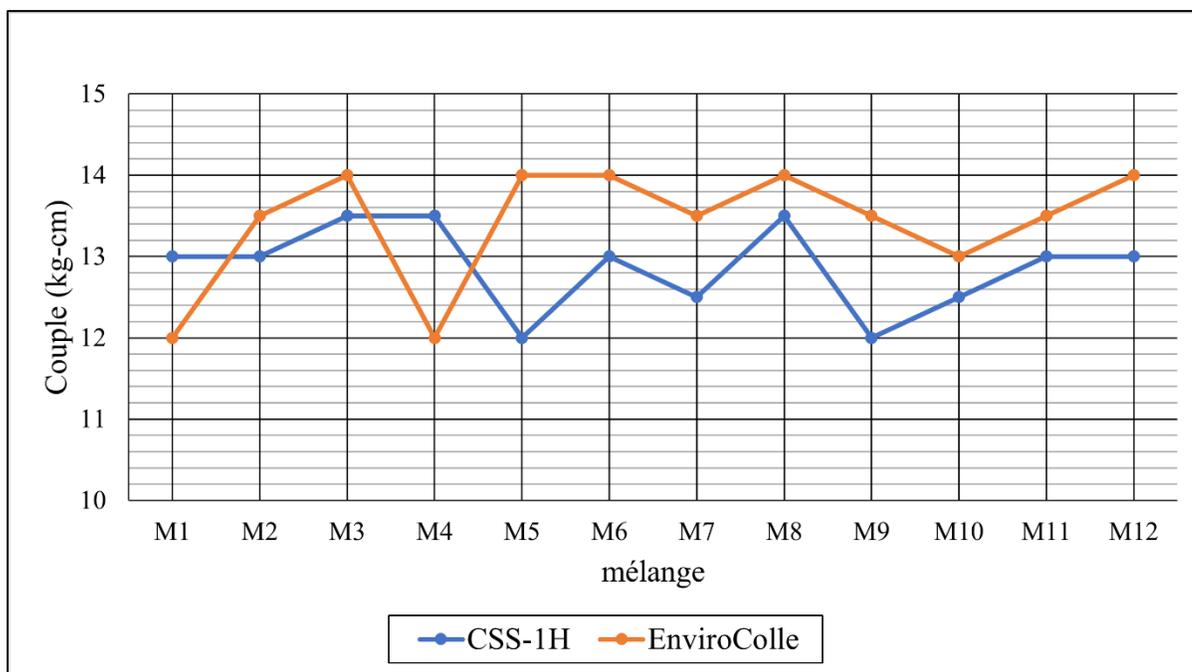


Figure 3-10: Cohésion de GM avec CSS-1H vs EnviroColle après 60 min



Figure 3-11: Différence entre un mélange préparé avec EnviroColle (à gauche) et CSS-1H (à droite)

3.3.2 Essai d'abrasion humide

La Figure 3-12 présente les pertes par abrasion des mélanges préparés en utilisant EnviroColle en comparaison avec ceux préparés en utilisant CSS-1H. L'effet de la variation de la teneur en eau et en émulsion est similaire à celui dans les mélanges préparés avec CSS-1H.

Les mélanges M1, M2 et M3 préparés avec l'EnviroColle ont eu une perte plus significative que les mélanges préparés avec CSS-1H. Cette différence des valeurs peut être attribuée au type d'émulsion utilisé. Comme l'EnviroColle est une émulsion à prise rapide, la rupture du mélange peut avoir lieu avant l'enrobage de toutes les particules. Ceci peut générer des particules semi-collées à lâche. Le matériau formé est donc plus susceptible à l'humidité et à la perte par abrasion.

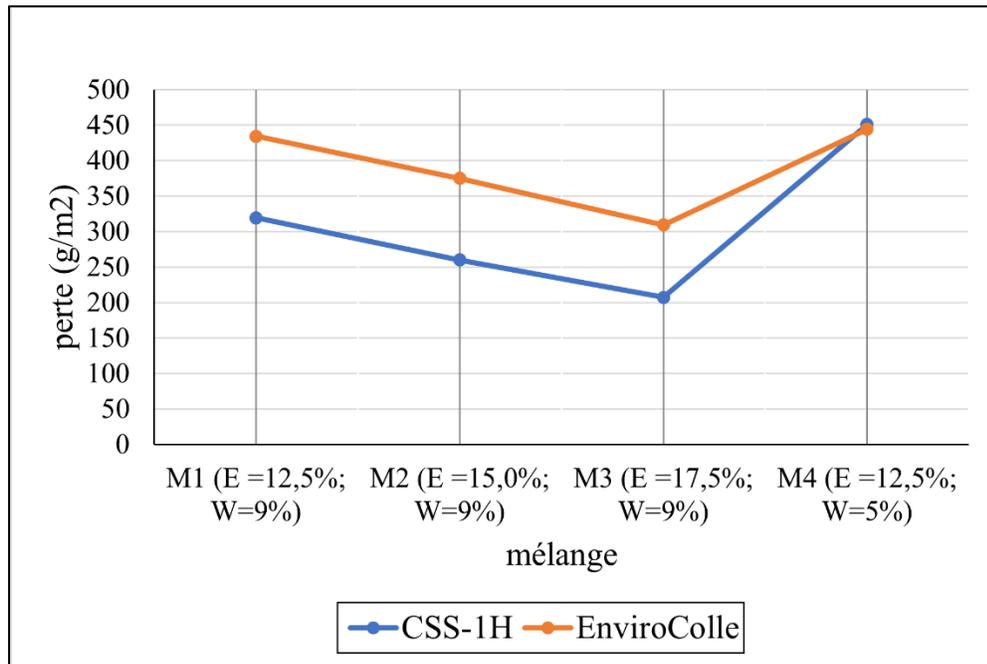


Figure 3-12: Perte par abrasion de GM avec CSS-1H vs EnviroColle après 1-h d'imbibition
(E : Émulsion, W : eau)

3.3.3 Essai de déplacement et du sable adhérent

- Essai de déplacement :

Pour évaluer l'effet de la variation du type d'émulsion, un mélange M1 (émulsion :12,5%, eau :9%) est préparé en utilisant l'émulsion EnviroColle et la Granulométrie GM. Puis, le spécimen a subi 1000 cycles de compactage par roue chargé de 57,6 kg. Le déplacement latéral obtenu a été 63,8 %. Il est largement supérieur au déplacement obtenu avec l'émulsion CSS-1H pour le même mélange. Les résultats peuvent être attribués à la vitesse de rupture élevée de l'EnviroColle. En effet, la rupture prématurée peut limiter l'enrobage total des particules et la résistance aux déformations. La Figure 3-13 montre la différence entre deux spécimens à granulométrie GM préparés avec la même teneur en émulsion EnviroColle et CSS-1H, la surface du spécimen préparé avec l'EnviroColle montre qu'une large surface des granulats est n'est pas enrobé.



Figure 3-13: Différence entre deux échantillons préparés avec CSS-1H et EnviroColle

- Essai du sable adhérent :

Afin d'évaluer l'effet de la variation du type d'émulsion sur la susceptibilité de ressuage du mélange. Le mélange M1 (émulsion :12,5%, eau :9%) est préparé avec l'EnviroColle. Puis, il est testé selon la procédure de l'essai du sable adhérent ISSA TB 109. Malgré les déformations majeures subites par l'échantillon, les fissurations ont été en dehors du cadre du sable. L'essai est donc envisageable. La valeur du sable adhérent pour le mélange M1 est 339,53 g/m². Elle est légèrement inférieure à la valeur trouvée pour le même mélange avec l'émulsion CSS-1H (383,82 g/m²). Ceci est attribué à l'enrobage limité des particules en utilisant l'EnviroColle. En effet, durant le compactage, l'excès en liant est mobilisé vers les surfaces non enrobées plutôt que vers la surface de compactage.

3.3.4 Sommaire

Les résultats de l'essai de cohésion ont montré que la modification du type d'émulsion n'a pas eu un effet sur la vitesse de rupture des mélanges. Tous les mélanges préparés appartiennent toujours à la classe « *slow set-slow traffic* ». La formulation d'un mélange « *quick set-quick traffic* » n'a pas été possible avec l'EnviroColle. La perte par abrasion des mélanges préparés avec l'EnviroColle est supérieure à celle des mélanges préparés avec CSS-1H. L'EnviroColle n'est pas adéquate pour la formulation à froid des enrobés puisqu'elle n'enrobe pas tous les granulats de mélange.

3.4 Effet de l'incorporation des bardeaux sur les performances du mélange optimal

3.4.1 Remarque préventive sur la pertinence des formules testées

La formulation d'un mélange de référence « *quick set-quick traffic* » qui répond aux exigences de la méthode ISSA relative à la résistance au déplacement et à la montée en cohésion n'a pas été possible. En effet, les propriétés des enrobés coulés à froid dépendent largement des interactions chimiques entre les granulats et l'émulsion utilisés. Ces interactions sont difficiles à étudier au sein du LCMB. Pour cela, la compatibilité de l'émulsion avec les granulats utilisés doit être vérifiée par le fournisseur de l'émulsion.

Malgré les résultats insatisfaisants, le mélange de référence M1 est sélectionné pour incorporer deux teneurs de bardeaux d'asphalte. L'objectif est d'évaluer le comportement du mélange et les modifications des propriétés après l'ajout des RAS.

3.4.2 Essai de cohésion (ISSA TB139) :

L'essai de cohésion est utilisé pour évaluer la capacité de rupture du mélange et la vitesse de montée en cohésion. D'après les recommandations de la méthode ISSA, le mélange peut résister aux sollicitations d'un trafic roulant si le couple mesuré est supérieur à 20 kg-cm.

Les valeurs de couple mesurées sont très similaires. L'incorporation des RAS semble être sans effet sur la vitesse de montée en cohésion du mélange M1. Les mesures sont pratiquement interchangeables après 30 et 60 min. Potentiellement, la cohésion des mélanges avec RAS atteint son maximum après les 30 premières minutes de formulation. La Figure 3-14 présente les résultats de l'essai de cohésion des mélanges contenant des RAS en comparaison avec les résultats obtenus avec le mélange de référence M1.

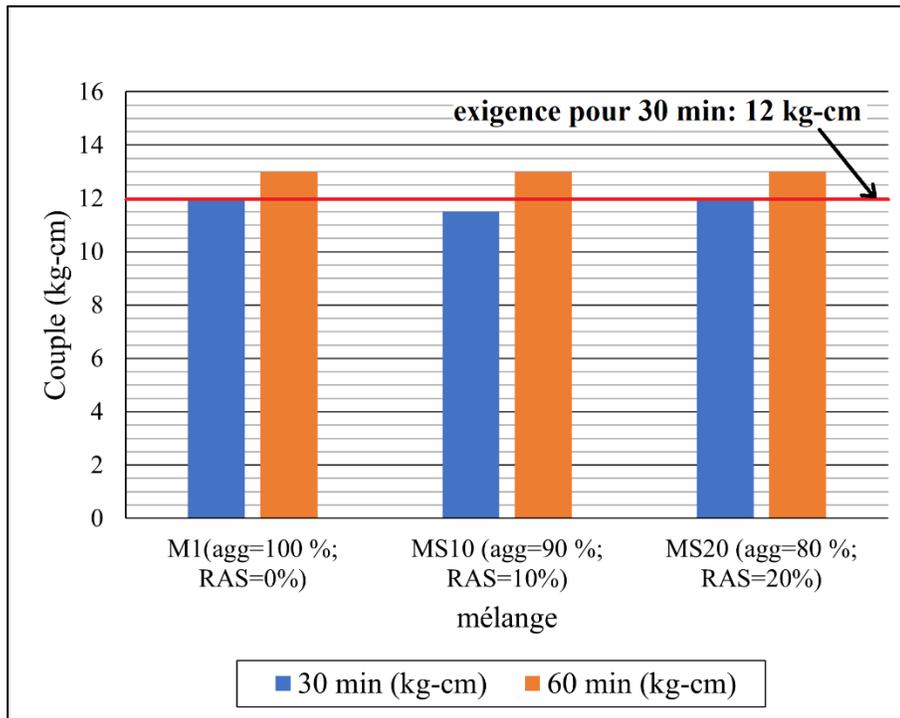


Figure 3-14: Résultats de l'essai de cohésion des mélanges avec RAS

La variation de la teneur en RAS n'a pas eu un effet sur la montée en cohésion du mélange. L'établissement d'une relation entre la montée en cohésion et la teneur en RAS n'est pas donc possible. Ces résultats sont principalement attribués aux propriétés du mélange M1 avec 100 % des granulats. Les mélanges avec RAS appartiennent à la classe « *slow set-slow traffic* ».

3.4.3 Essai d'abrasion humide (ISSA TB100) :

Cet essai est utilisé pour déterminer la teneur optimale en liant et pour évaluer la résistance à l'abrasion du mélange. La méthode ISSA exige une valeur maximale de 538 g/m² pour l'imbibition de 1 heure et 807 g/m² pour l'imbibition de 6 jours. Les valeurs obtenues avec les mélanges contenant des RAS répondent aux exigences ISSA. Les pertes obtenues après 6 jours d'imbibition sont largement supérieures aux valeurs obtenues après 1 heure. Il semble que l'incorporation des RAS n'a pas modifié la susceptibilité à l'humidité à long terme.

La perte par abrasion du mélange MS20 avec 20 % de RAS est plus grande que celle du mélange MS10 avec 10 % de RAS. L'augmentation de la teneur en bardeaux a diminué la résistance à l'abrasion de mélange. Une variation de la granulométrie du mélange peut être la cause de cette

diminution. En effet, la taille des particules des RAS est inférieure à la taille des granulats. L'incorporation d'une teneur élevée en bardeaux peut changer la granulométrie du mélange en une granulométrie plus fine. Les résultats présentés dans la partie 3.3 ont montré qu'une granulométrie plus fine est moins résistante à l'abrasion.

Le mélange MS10 a eu des pertes par abrasion inférieure à la perte du mélange M1 sans RAS. Cette variation peut être attribuée à l'immobilisation de bitume des bardeaux dans le mélange MS10. Ceci peut augmenter la teneur en liant du mélange. En effet, les résultats présentés dans la partie 3.3 ont montré qu'une teneur élevée en liant peut augmenter la résistance à l'abrasion du mélange.

La Figure 3-15 présente les résultats de l'essai d'abrasion humide en comparaison avec les résultats obtenus avec le mélange M1.

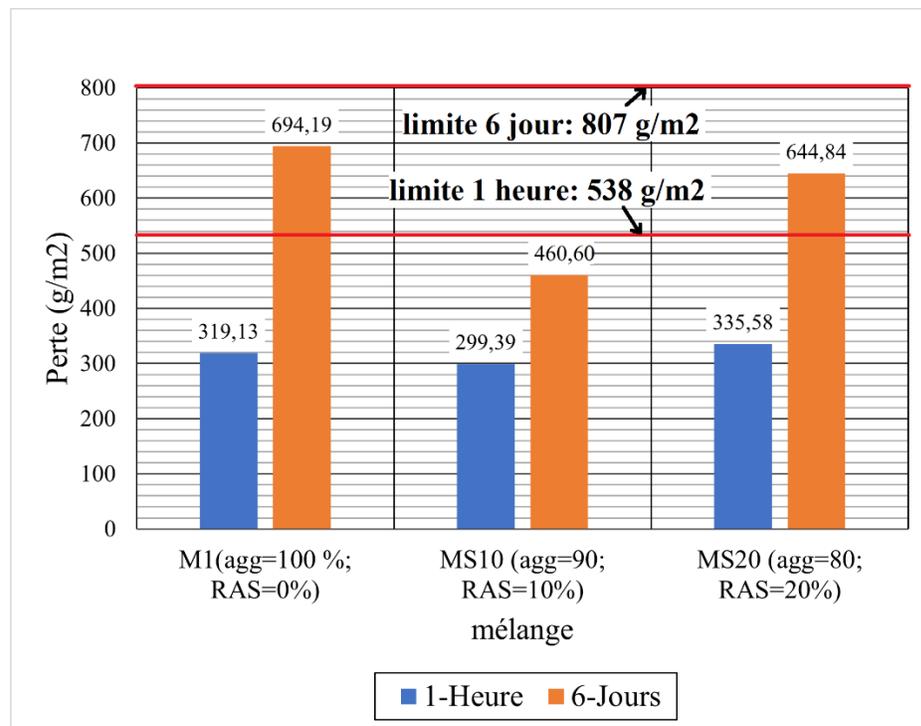


Figure 3-15: Résultats de l'essai d'abrasion des mélanges avec RAS

Il est à noter que les résultats sont obtenus avec un nombre limité des essais et que des études antérieures ont montré la faible représentativité de l'essai d'abrasion.

3.4.4 Essai de déplacement latéral et vertical (ISSA TB147)

Cet essai est utilisé pour déterminer la teneur optimale en liant et pour évaluer la résistance du mélange aux déformations induites par les sollicitations du trafic. La méthode ISSA exige un maximum de 5 % pour le déplacement latéral et 10 % pour le déplacement vertical (orniérage). Les valeurs de déplacements pour les deux mélanges avec RAS sont toujours supérieures aux limites recommandées par la méthode de formulation. L'incorporation des RAS a diminué largement la résistance aux déformations du mélange. En effet, les déplacements latéraux respectifs du mélange M10 et M1 sont 41,6 % et 16,5 %. Cette variation peut être attribuée à la modification de la granulométrie du mélange en une granulométrie plus fine. Elle peut également être attribuée à la mobilisation d'une partie de bitume des RAS et l'augmentation de la teneur en liant.

La variation de la teneur en RAS de 10 à 20 % dans les mélanges respectifs M10 et M20 induit des valeurs de déplacement légèrement supérieures. Il semble que l'effet de l'incorporation des RAS dans le mélange a un effet plus significatif sur la résistance aux déformations que la variation de la teneur en RAS. La Figure 3-16 présente les résultats de l'essai de déplacement des mélanges avec des RAS en comparaison avec les résultats obtenus pour le mélange M1.

Il est à noter que ces résultats sont obtenus à la suite d'un nombre limité des essais.

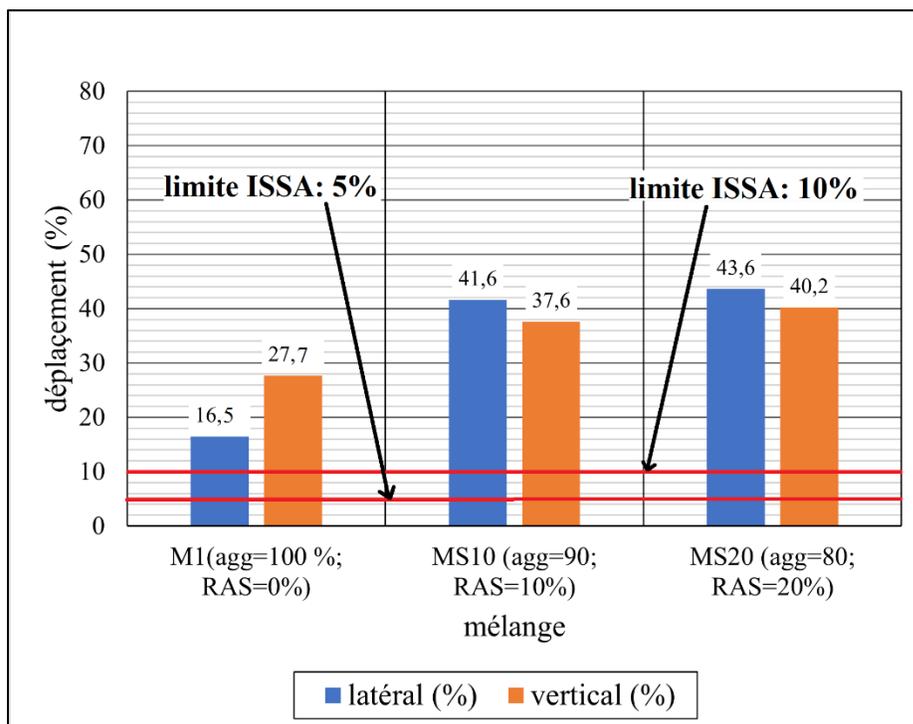


Figure 3-16: Résultats de l'essai de déplacement des mélanges avec des RAS

CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet est de valoriser les bardeaux d'asphalte postconsommation dans les enrobés de microsurfaçage coulés à froid destinés pour les chaussées non revêtues de la région de Gaspé. La méthode de formulation adoptée est celle développée par ISSA. Cette méthode propose un ensemble d'essais de formulation pour déterminer les teneurs des différents constituants des mélanges à froid; l'essai de cohésion modifié (ISSA TB139) sert à déterminer la teneur maximale en eau. L'essai d'abrasion humide (ISSA TB100) sert à déterminer la teneur minimale en émulsion et évalue la résistance à l'abrasion du matériau formulé. Enfin, l'essai de déplacement latéral et du sable adhérent (ISSA TB147 et 109) sert à déterminer la teneur maximale en liant et évalue la résistance aux déformations dues aux sollicitations du trafic.

Une campagne expérimentale a été menée pour valider une formule de référence à prise rapide et qui permet une réouverture rapide au trafic roulant. Cependant, la sélection d'un mélange qui répond à toutes les exigences de la méthode de formulation a été impossible. En effet, les propriétés des ECF dépendent largement des interactions chimiques entre les différents constituants du mélange. L'évaluation de ces interactions est difficile au sein du LCMB. La compatibilité de l'émulsion avec les granulats doit être vérifiée auprès de fournisseurs de l'émulsion.

La variation des teneurs en émulsion et en eau ainsi que la variation de la granulométrie du mélange ont eu un faible effet sur la vitesse de montée en cohésion. L'exigence de la méthode ISSA pour la réouverture au trafic roulant n'a pas été atteinte après 60 minutes. Tous les mélanges formulés appartiennent donc à la classe « *slow set-slow traffic* ». La réouverture rapide au trafic roulant n'est pas donc possible.

Les résultats de l'essai d'abrasion humide ont montré que la perte par abrasion est inversement corrélée à la teneur en émulsion. Cependant, elle est corrélée à la surface spécifique du squelette granulaire. Il a été conclu qu'une teneur élevée en liant assure l'enrobage total des particules et imperméabilise la surface abrasée. Ceci diminue la susceptibilité à l'humidité et augmente la résistance à l'abrasion. De plus, les mélanges à granulométrie grossière sont plus résistants à l'abrasion.

Les résultats de l'essai de déplacement latéral ont largement dépassé les limites supérieures de la méthode ISSA. L'analyse a montré que la résistance aux déformations est inversement corrélée à la teneur en liant et à la surface spécifique du squelette granulaire. En effet la teneur élevée en liant forme un film de bitume plus épais autour des particules. Ceci favorise leur mobilité. De plus, les granulométries plus fines sont généralement moins résistantes aux sollicitations mécaniques du trafic.

Les résultats de l'essai du sable adhérent répondent aux exigences supérieures de la méthode ISSA. La masse du sable adhérent est corrélée à la teneur en liant. Cependant, elle est inversement corrélée à la surface spécifique. En effet, un excès en liant favorise la mobilité des particules durant les cycles de compactage. Il favorise donc le ressuage du bitume à la surface. La teneur en vides est plus élevée pour les granulométries grossières que les fines. Ces vides sont occupés par la quantité du liant qui ne participe pas à l'enrobage des particules. Après compactage du matériau, la teneur en vides diminue et le liant en excès migre vers la surface. À la suite des essais avec des mélanges de références, un mélange optimal, avec 12,5 % d'émulsion et 9 % d'eau d'apport, a été sélectionné. Puis deux teneurs volumiques en bardeaux ont été incorporées (10 et 20 %). L'objectif est d'étudier l'effet de l'ajout des bardeaux sur les propriétés du mélange. Les essais à évaluer sont l'essai de cohésion modifié, l'essai d'abrasion humide et l'essai de déplacement latéral. Toutes les déductions et les interprétations sont basées sur un nombre limité des essais.

L'incorporation des bardeaux ainsi que la variation de leur teneur n'ont pas eu un effet sur la montée en cohésion des mélanges. Les mélanges avec bardeau appartiennent également à la classe « *slow set-slow traffic* ».

Les résultats de l'essai d'abrasion humide ont montré que la perte par abrasion est corrélée à la teneur en bardeaux. L'incorporation d'une teneur élevée en RAS peut changer la granulométrie du squelette granulaire en une granulométrie plus fine.

Les résultats de l'essai de déplacement ont montré que la résistance aux déformations est inversement corrélée à la teneur en bardeaux. En effet, l'incorporation des RAS peut modifier la granulométrie du mélange en une granulométrie plus fine. Ceci peut diminuer la résistance aux déformations permanentes.

Généralement, l'essai de cohésion permet de classer les mélanges à froid en fonction de l'évolution du couple dans le temps. Les mélanges de la classe « *slow set-slow traffic* » nécessitent une évaluation de cohésion pour des durées plus longues que 60 minutes. Ceci permet de mieux comprendre l'effet de la variation des différentes variables (émulsion, eau, ciment, granulométrie).

L'essai d'abrasion humide et du sable adhérent peuvent être utilisés pour déterminer la teneur optimale en émulsion des mélanges « *slow set-slow traffic* ». Cependant, ces mélanges ne peuvent pas être testés selon la procédure de l'essai de déplacement latéral. En effet, cette classe n'est pas adéquate pour la caractérisation des mélanges avec bardeaux.

La compatibilité des granulats avec l'émulsion doit être vérifiée auprès de fournisseurs d'émulsion avant de mener la campagne expérimentale.

RECOMMANDATIONS

- 1- Prolonger la durée d'évaluation de la cohésion des mélanges « *slow set-slow traffic* » afin d'obtenir une meilleure compréhension des effets de la variation des différentes variables à long terme.
- 2- Vérifier la compatibilité de l'émulsion disponible avec des granulats provenant d'autres sources que la carrière Saint-Philippe, en vue de vérifier sa compatibilité pour une utilisation dans des contextes différents.
- 3- Examiner la compatibilité des granulats provenant de la carrière Saint-Philippe avec une émulsion à prise rapide de type CQS-1H, spécifiquement destinée à la formulation et au recyclage à froid. Évaluer les performances de cette combinaison pour garantir une utilisation optimale.
- 4- Mettre en place une planche d'essai en utilisant le mélange de référence « *slow set-slow traffic* » formulé durant cette étude. L'objectif est d'évaluer de manière concrète ses performances dans des conditions climatiques et de trafic réelles.
- 5- Étant donné les incertitudes liées aux essais de cohésion et d'abrasion humide, il est recommandé de réaliser des répétitions de ces essais pour évaluer la reproductibilité des résultats.
- 6- Procéder à une caractérisation détaillée des RAS destinés pour la formulation des enrobés. Cette caractérisation devrait inclure essentiellement la teneur et le grade de bitume et la teneur en fibres. Ceci permet de mieux comprendre les propriétés de ces matériaux et d'optimiser leur utilisation dans les mélanges à froid.

ANNEXE I

Essais complémentaires de caractérisation

I.1 Essai de pénétrabilité

Vu le manque de données concernant la pénétrabilité et la teneur en résidu de bitume des émulsions fournies par McAsphalt, des essais complémentaires de caractérisation ont été nécessaires pour valider la conformité des émulsions avec les exigences de la méthode ISSA. La détermination du résidu de bitume par évaporation est réalisée selon la norme ASTM D6934. La méthode consiste à chauffer un échantillon d'émulsion à une température de 163 °C pour une durée totale de 3 heures. Après refroidissement du spécimen, le taux de résidu est défini par le rapport entre la masse du résidu après le chauffage et la masse de l'échantillon initiale. L'essai d'évaporation a été fait seulement pour l'émulsion CSS-1H vu l'incertitude de sa teneur en résidu. Cependant, le résidu de l'émulsion EnviroColle est également récupéré selon la même méthode pour l'essai de pénétrabilité.

Les résultats sont présentés dans le Tableau A-I-1. La teneur en résidu d'évaporation pour l'émulsion CSS-1H est la moyenne des trois résultats obtenus (63,36 %). Cette teneur est similaire à la teneur en résidu de l'émulsion EnviroColle (63,40 %). Les deux émulsions respectent l'exigence minimale de la méthode de formulation ISSA relative aux taux de résidu fixé à 62%.

Tableau A-I- 1: La teneur en résidu d'évaporation de l'émulsion CSS-1H

Masse initiale (g)	50,20	50,03	50,02
Masse de résidu (g)	31,80	31,69	31,71
Teneur de résidu d'évaporation (%)	63,35	63,34	63,39

Les résidus récupérés peuvent être utilisés pour déterminer la pénétrabilité de bitume constituant les émulsions (Figure A-I-1).



Figure A-I- 1: Echantillons de résidu préparé pour l'essai de pénétrabilité

L'essai de pénétrabilité est l'un des premiers essais de caractérisation des matériaux bitumineux. Il permet de déterminer la consistance du liant à une température spécifique.

La procédure de l'essai est normalisée par la norme ASTM D5/D5M. Elle consiste à couler un échantillon de bitume dans un récipient et à le ramener à 25 °C en le plaçant dans un bain marin pendant une heure. Puis, le récipient est placé sous une aiguille chargée de 100 g. Elle doit être en contact avec la surface du bitume. Enfin, elle pénètre le bitume en chute libre pendant 5 secondes. La pénétration de l'aiguille dans l'échantillon est notée en 0,1 mm. Chaque échantillon est testé quatre fois. La différence entre les valeurs doit être inférieure à $4 \times 0,1$ mm (ASTM 2020). La Figure A-I- 2 présente le dispositif expérimental de l'essai de pénétrabilité. Le Tableau A-I- 2 présente les résultats obtenus pour les résidus récupérés des deux émulsions (EnviroColle et CSS-1H). Les valeurs de pénétrabilité à retenir sont les moyens des quatre mesures obtenues pour chaque résidu.

Le rapport des résultats doit contenir la température de l'essai, la charge de l'aiguille, la durée et la valeur de pénétration.



Figure A-I- 2: Dispositif expérimental de l'essai de pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s

Tableau A-I- 2: Résultats de l'essai de pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s

Type d'émulsion testée	EnviroColle	CSS-1H
Mesure 1 (0,1 mm)	55	96
Mesure 2 (0,1 mm)	55	100
Mesure 3 (0,1 mm)	56	98
Mesure 4 (0,1 mm)	59	98
Pénétrabilité moyenne (0,1 mm)	56	98
Exigence de la méthode ISSA (0,1 mm)	40 - 90	40 - 90

La pénétrabilité du résidu de l'émulsion EnviroColle est inférieure à celle de l'émulsion CSS-1H. Ceci implique que le bitume utilisé pour la fabrication de CSS-1H à un grade inférieur (bitume plus mou) à celui utilisé pour la fabrication de l'EnviroColle.

L'émulsion EnviroColle répond aux exigences de la méthode ISSA relative à la pénétrabilité du résidu contrairement à l'émulsion CSS-1H.

I.2 Essai DSR (Dynamic Shear Rheometer)

Pour mieux caractériser le bitume issu de l'émulsion CSS-1H, l'essai DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) a été réalisé.

L'essai consiste à déterminer le module de cisaillement dynamique (G^*) et l'angle de phase (δ) du liant en utilisant une géométrie d'essai à plaques parallèles. Il permet de déterminer les propriétés de bitume pour des fins de classification. Cependant, il n'est pas conçu comme une procédure complète pour la caractérisation du comportement viscoélastique.

La classification de bitume suit la règle suivante : Pour un bitume (PG Hn-L) le paramètre ($G^*/\sin(\delta)$) doit être supérieure à (1 kPa) à la température H.

L'essai peut être réalisé pour un résidu d'émulsion récupéré sur une plaque de granit conformément à la méthode LC 25-012. La procédure consiste à étaler un échantillon de l'émulsion sur une plaque de granit. Après 2 heures de murissement à une température ambiante, l'épaisseur du film de bitume obtenue doit être entre 150 et 250 μm . Ensuite, un échantillon de 1 g de résidu est récupéré et placé entre les plaques métalliques du DSR (Figure A-I-3). Enfin, une torsion est appliquée sur le spécimen à des températures différentes.

Le Tableau A-I- 3 présente les résultats de l'essai DSR.



Figure A-I- 3: Essai DSR sur le résidu récupéré sur une plaque de granit

Tableau A-I- 3: Résultats de l'essai DSR pour le résidu de l'émulsion CSS-1H

Température (°C)	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	Module de cisaillement dynamique (kPa)	Angle de phase (°)	Couple (Nm)
64	0,428	0,427	87,090	1,58E-04
58	0,852	0,850	85,960	3,13E-04
52	1,773	1,764	84,380	6,50E-04

Les résultats montrent que ; $G^*/\sin\delta$ (58°C) est inférieure à 1kPa et $G^*/\sin\delta$ (52°C) est supérieure à 1 kPa. Donc le bitume utilisé pour la formulation de l'émulsion CSS-1H est d'un grade intermédiaire entre PG 58 et PG 52. Cependant, le bitume de l'émulsion EnviroColle est d'un grade PG 64 (confirmé par la valeur de $G^*/\sin\delta$ (64°C) = 1 kPa dans le Tableau 2-3). Ceci confirme les résultats de l'essai de pénétrabilité.

I.2 Potentiel Zeta de filler des granulats

Le potentiel zêta d'une particule est une mesure de la charge électrique résultante des ions qui l'entourent. Il est utilisé pour évaluer l'intensité des forces d'attraction ou de répulsion électrostatiques entre les particules. Il est donc un indicateur important pour comprendre les mécanismes responsables de la dispersion, de l'agrégation ou de la floculation des particules. En effet, il permet d'analyser les raisons pour lesquelles les particules se dispersent, s'agglutinent ou se regroupent (Hamoni, 2013).

Pour déterminer ce potentiel, une suspension est préparée en dispersant une quantité du fond des granulats (passant du 80 μm) dans l'eau. Puis, elle est introduite dans la cellule rectangulaire d'un zettamètre équipé de deux ports anode (+) et cathode (-) comme présenter dans la Figure A-I- 4. Enfin, les particules sont mises en mouvement en appliquant un champ électrique au niveau de la cellule. Le potentiel zêta est déterminé visuellement comme suit :

- Mouvement vers l'anode : potentiel zêta négatif (anionique)
- Mouvement vers la cathode : potentiel zêta positif (cationique)

La Figure A-I- 5 montre les résultats de l'essai de potentiel zêta. Les particules de fond en suspension se déplacent vers la cathode. Ceci implique que le potentiel de filler des granulats est positif (cationique).

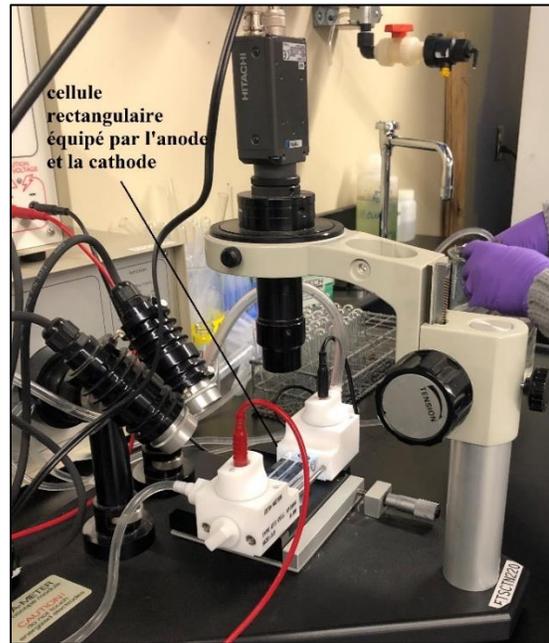


Figure A-I- 4: Dispositif expérimental de l'essai de potentiel zêta

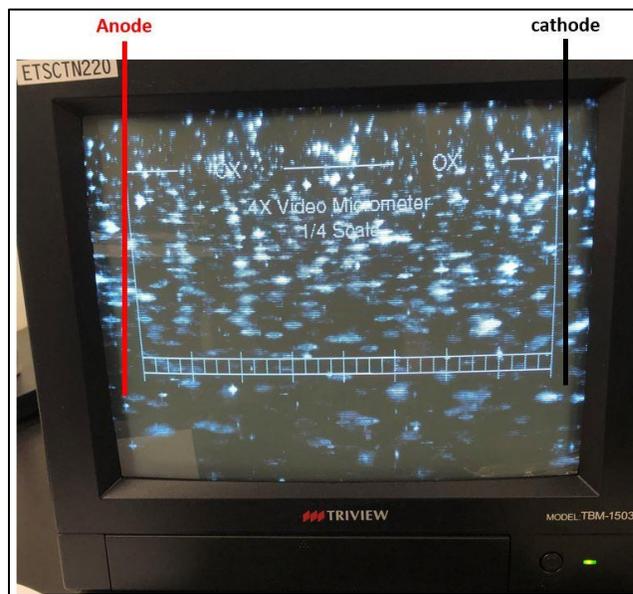


Figure A-I- 5: Résultats visuels de l'essai de potentiel zêta

ANNEXE II

Résultats des essais de la phase II (changement de granulométrie)

Tableau A-II- 1: Composition des mélanges et valeurs de couple pour la combinaison (CSS-1H, GG)

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Ciment (%)	Cohésion ISSA 139 (CSS-1H, GG)	
				30 min (kg-cm)	60 min (kg-cm)
G1	12,5	9,0	0	11,5	12,0
G2	15,0	9,0	0	12,0	13,0
G3	17,5	9,0	0	12,0	12,0
G4	12,5	5,0	0	11,0	12,0
G5	15,0	5,0	0	12,0	12,5
G6	17,5	5,0	0	12,0	12,5
G7	12,5	9,0	1,0	12,0	12,5
G8	15,0	9,0	1,0	12,5	13,5
G9	17,5	9,0	1,0	12,5	13,0
G10	12,5	5,0	1,0	12,0	13,0
G11	15,0	5,0	1,0	12,0	13,5
G12	17,5	5,0	1,0	11,5	13,0

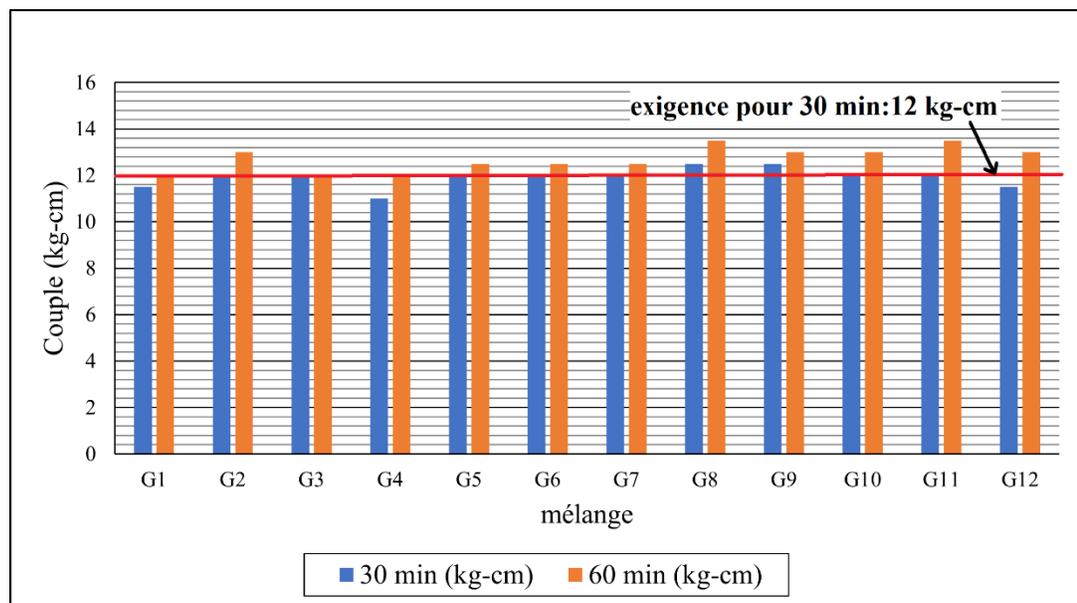


Figure A-II- 1: Résultats de l'essai de cohésion des mélanges à granulométrie GG et émulsion CSS-1H

Tableau A-II- 2: Composition des mélanges et perte par unité de surface pour (CSS-1H, GG)

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Perte par unité de surface de (CSS-1H, GG) (g/m ²)	
			1-Heure	6-Jours
G1	12,5	9,0	279,65	562,59
G2	15,0	9,0	200,69	401,38
G3	17,5	9,0	154,63	332,29
G4	12,5	5,0	342,16	618,52

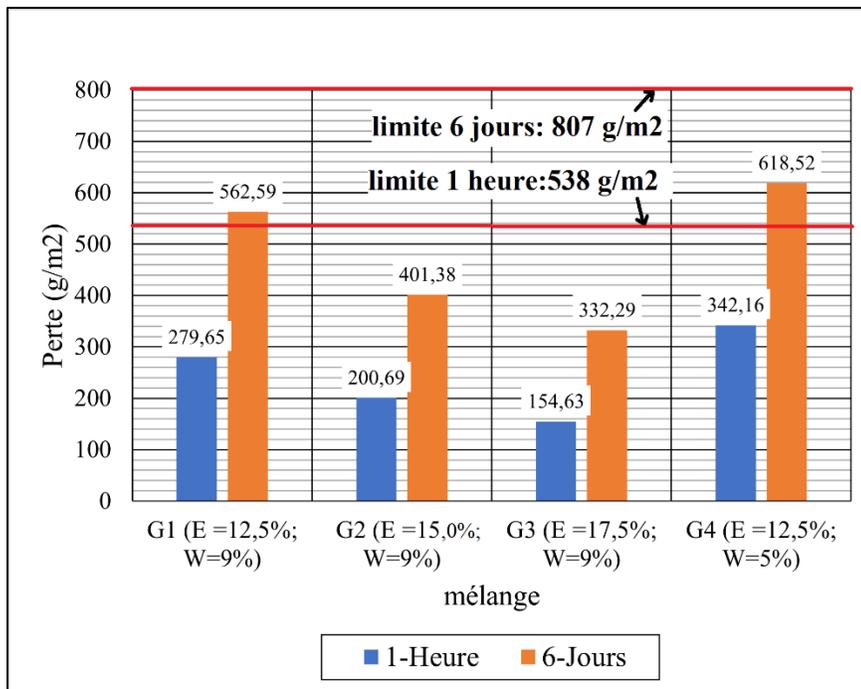


Figure A-II- 2: Perte par abrasion de la granulométrie GG avec CSS-1H (E : Émulsion, W : eau)

Tableau A-II- 3: Les valeurs de déplacement pour la granulométrie GG avec CSS-1H

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Déplacement latéral (%)	Déplacement vertical (%)
G1	12,5	9,0	16,9	20,7
G2	15,0	9,0	33,6	31,6
G3	17,5	9,0	65,3	47,8
G4	12,5	5,0	72,3	49,3

ANNEXE III

Résultats des essais de la phase III (changement de type d'émulsion)

Tableau A-III- 1: Composition des mélanges et valeurs de couple pour la combinaison (EnviroColle-GM)

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Ciment (%)	Cohésion ISSA 139 (EnviroColle-GM)	
				30 min (kg-cm)	60 min (kg-cm)
M1	12,5	9,0	0	11,0	12,0
M2	15,0	9,0	0	12,0	13,5
M3	17,5	9,0	0	13,0	14,0
M4	12,5	5,0	0	12,0	12,0
M5	15,0	5,0	0	13,0	14,0
M6	17,5	5,0	0	13,0	14,0
M7	12,5	9,0	1,0	12,0	13,5
M8	15,0	9,0	1,0	12,5	14,0
M9	17,5	9,0	1,0	12,5	13,5
M10	12,5	5,0	1,0	12,0	13,0
M11	15,0	5,0	1,0	12,0	13,5
M12	17,5	5,0	1,0	12,0	14,0

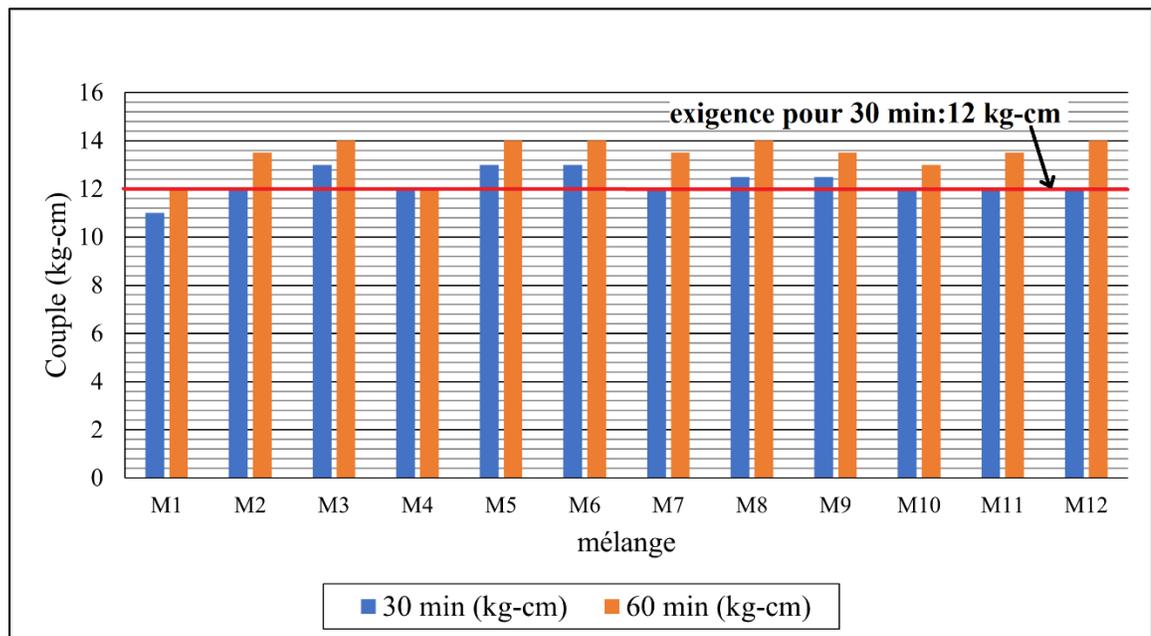


Figure A-III- 1: Résultats de l'essai de cohésion des mélanges à Granulométrie GM et émulsion EnviroColle

Tableau A-III- 2: Composition des mélanges et perte par unité de surface pour (EnviroColle-GM)

Mélange	Émulsion (%)	Eau (%)	Perte par unité de surface de (EnviroColle, GM) (g/m ²)	
			1-Heure	6-Jours
M1	12,5	9,0	434,28	582,33
M2	15,0	9,0	375,06	513,24
M3	17,5	9,0	309,26	411,25
M4	12,5	5,0	444,15	625,10

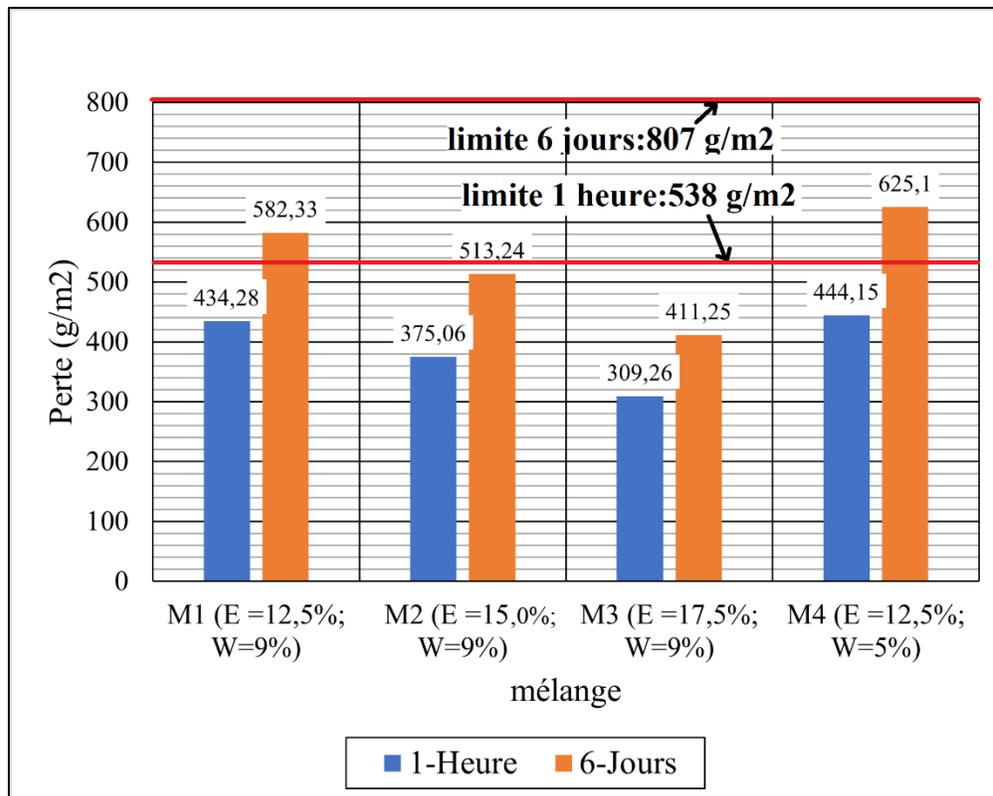


Figure A-III- 2: Perte par abrasion de la Granulométrie GM avec EnviroColle (E : Émulsion, W : eau)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alzubaidi, H. (1999). "Operation and maintenance of gravel roads: a literature study."
- Alzubaidi, H. and R. Magnusson (2002). "Deterioration and rating of gravel roads: state of the art." Road Materials and Pavement Design **3**(3): 235-260.
- Arnold, J. (2014). "Quantitative evaluation of low-temperature performance of sustainable asphalt mixtures and binders containing recycled asphalt shingles (RAS) and rejuvenators."
- ASTM (2015). "Standard practice for design, testing, and construction of microsurfacing." American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2020). "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials." (D5/D5M).
- Autret, P. (1997). "Etudes des routes non revetues VIZIRET. Systeme de gestion de l'entretien d'un reseau routier." BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES: 3-22.
- Autret, P. and J.-L. Brousse (1998). "VIZIRET-Qualification et quantification des dégradations d'une route non revêtue pour la programmation et le suivi des travaux d'entretien." Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées(213): 17-31.
- Baklouti, O. (2022). Effet de cycles de chargements sur les propriétés thermomécaniques des mélanges traités au ciment-bitume, École de technologie supérieure.
- BILODEAU, C. L. (2011). "Identification de scénarios de valorisation des matières résiduelles critiques aux Îles-de-la-Madeleine."
- Corté, J.-F. and H. Di Benedetto (2004). Matériaux routiers bitumineux: description et propriétés des constituants, Lavoisier.
- Ddamba, S. J. (2011). Evaluation of the effect of recycled asphalt shingles on ontario hot mix pavement, University of Waterloo.
- Edvardsson, K. (2009). "Gravel roads and dust suppression." Road Materials and Pavement Design **10**(3): 439-469.
- Garfa, A. (2018). Évaluation de l'évolution des performances et du comportement des enrobés coulés à froid notamment avec matériaux recyclés, École de technologie supérieure.
- Hunter, R. N., et al. (2015). The shell bitumen handbook, Shell Bitumen London, UK:.

IDRRIM, i. d. r., des rues et des infrastructures de mobilité (2017). Guide technique matériaux bitumineux coulés à froid.

ISSA (2017). "Test Method for Determining Mix Time for Slurry Surfacing Systems." INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION, TECHNICAL BULLETIN No 113.

ISSA (2017). "Test Method to Determine Set and Cure Development of Slurry Surfacing Systems by Cohesion Tester." INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION, TECHNICAL BULLETIN No 139

ISSA (2018). "Laboratory Test Method for Wet Track Abrasion of Slurry Surfacing Systems." INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION, TECHNICAL BULLETIN No 100.

ISSA (2019). "Test Method for Classification of Slurry Surfacing Materials Compatibility by Schulze-Breuer and Ruck Procedures." INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION, TECHNICAL BULLETIN No 144.

ISSA (2020). "Recommended Performance Guidelines for Microsurfacing A143 (revised may 2020)." International Slurry Surfacing Association, Annapolis, MD.

ISSA (2022). "Test Method for Measurement of Excess Asphalt in Slurry Surfacing Systems by Use of a Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion." INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION, TECHNICAL BULLETIN No 109.

ISSA (2022). "Test Method for Measurement of Lateral and Vertical Displacement of Micro Surfacing Systems." INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION, TECHNICAL BULLETIN No 147.

Le Vern, M. (2016). Conception mécaniste-empirique des chaussées non revêtues, Université Laval.

Lo, S. and E. Ndiaye (2009). "Élaboration d'un catalogue des dégradations des chaussées au Sénégal." Génie Civil: 125.

Malo, J.-M. (2013). Incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux, École de technologie supérieure.

Noël, F., et al. (2006). Incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux, Université du Québec, École de technologie supérieure.

Ong, G. P. R., et al. (2010). "Indiana pavement preservation program."

Robati, M. (2012). Evaluation of a modification of current micro-surfacing mix design procedures, École de technologie supérieure.

SETRA (2005). "Enduits superficiels d'Usure (ESU), Enrobés coulés à froid (ECF), Actualisation des connaissances sur le revêtements superficiels." service d'étude technique des routes et autoroutes.

TTI (1996). "micro-surfacing Guidelines for use and quality assurance."

Williams, B. A., et al. (2019). Guidelines for the Use of Reclaimed Asphalt Shingles in Asphalt Pavements, National Asphalt Pavement Association.

Yaacob, H., et al. (2013). "Bitumen emulsion in malaysia-a conspectus." Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering) **65**(3): 97-104.