Évaluation de l'évolution des performances et du comportement des enrobés coulés à froid notamment avec matériaux recyclés

par

Arbia GARFA

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

MONTRÉAL, LE 02 MAI 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Arbia Garfa, 2018



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

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

Mme Anne Dony, codirecteur de thèse
Département de génie civil à l'École Spéciale des Travaux Publics

M. Patrice Seers, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Claudiane Ouellet-Plamondon, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Sabine Le Bec, membre externe indépendant
Ingénieur-Direction technique chez Eurovia Management

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

14 MARS 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Avant d'introduire le sujet qui a motivé mes journées durant ces trois dernières années, je me dois de faire savoir la gratitude que j'ai auprès de nombreuses personnes qui ont été un soutien dans les moments de doute. Cette thèse est le résultat, certes de longues recherches, mais surtout de l'appui d'un entourage exceptionnel.

Tout d'abord, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Alan Carter, de l'école de technologie supérieure et Anne Dony de l'école spéciale des travaux publics, pour m'avoir orienter, conseiller et inspirer à travers mes travaux. Leurs bienveillances et leurs critiques avisées me permettent aujourd'hui de soutenir fièrement cette thèse, qui je l'espère sera à la hauteur de leurs enseignement.

Sans oublier les collaborateurs de notre partenaire industriel, Probinord; Valérie Charton, responsable de recherche et Walid Zaouli ingénieur recherche. Je les remercie de m'avoir orientés et sensibiliser aux enjeux du secteur, d'avoir apporté cette dimension opérationnelle à mon étude.

Je remercie Layella Ziyani, Enseignante chercheur à l'école spéciale des travaux publics, pour sa présence à mes côtés, son soutien et ses nombreux conseils qui m'ont toujours aiguillée. Je remercie nos stagiaires, Oscar Sanou, Ilef Bourgel, Salah Labouize, Marie Quinoc, Cyril-Florent Lineard et Maxime Langlais qui durant ces trois années ont fait preuve d'une rigueur et d'un sérieux exemplaire. Qui malgré les moments de grandes activités ont su conserver l'optimisme et la bonne humeur au sein de l'équipe. Je leur souhaite à tous la réussite qu'ils méritent.

Je remercie, Francis Bilodeau et Sylvain Bibeau, techniciens de l'école de technologie supérieure ainsi que Margareta Walferdein, technicienne de l'école spéciale des travaux publics, pour leur disponibilité, amabilité et leur volonté de m'aider tout au long de mes recherches.

Aussi, je souhaite avoir un mot particulier, pour mes amis, certains rencontrés durant le travail autour de cette thèse. Des amis qui ont su dédramatiser ces grands moments de stress et qui ont toujours eu les mots afin de me pousser à donner le meilleur de moi-même : Prakash Tirunampalli Mohammed Yassine Abdelaziz, Mountadar Layassami, Nouha Karabibene, Apparao Gandi, Amel Ferjani, Mouhamed Lamine Aidara, Mouhamed Mounir Boussabnia et Theophile Kappo, à toutes ces personnes généreuses et aimantes que j'ai à mes côtés.

Enfin, cette thèse je la dédie à mes parents. Mon père, Mohamed-Ali Garfa, qui aura été ma plus grande source de joie, d'amour et de bonheur. Celui qui m'a appris à ne pas avoir peur et à me fixer des objectifs toujours plus grands, toujours plus hauts. À ma mère, qui par son amour, sa tendresse et sa bonté m'a donné la force et la volonté de réussir. Des remerciements qui ne sauraient démontrer toute la gratitude que j'ai envers ces personnes si chères à mon cœur.

Je remercie mes sœurs Afef Garfa et Amira Garfa, d'avoir su me rappeler mes priorités, m'écouter et me conseiller toutes ces années. Je les remercie de s'être souciées de mon bien être, d'avoir toujours été à mes côtés même quand je me trouvais à des milliers de kilomètres. À celle qui me fait rire quand je n'ai plus l'énergie, un grand merci.

À mon frère Mouhamed Chaker Garfa, qui veille sur moi et sur ceux qui nous son proche, de qui je puise mon courage et ma détermination à réussir. Je le remercie. *À ma famille, mon exutoire, ma force et ma seule vraie raison de réussir.*

Je remercie mes tantes et mes oncles, Hasna, Sihem, Fetiha, Nana et Ezzedine pour leur soutien, leur amour et leur écoute, ainsi que Sarah, Ines, Sarra, Arbia, Malak, Chayma, Mohamed Ali et Fares, des cousins qui ont su être là dans les moments forts tout au long de ces années.

Pour tous ceux qui m'ont soutenu et cru en moi.

ÉVALUATION DE L'ÉVOLUTION DES PERFORMANCES ET DU COMPORTEMENT DES ENROBÉS COULÉS À FROID NOTAMMENT AVEC MATÉRIAUX RECYCLÉS

Arbia GARFA

RÉSUMÉ

La dégradation des infrastructures routières est étroitement liée aux aléas climatiques, au trafic et à la composition de la structure des chaussées même. Le manque d'entretien accélère l'évolution des dégradations, ce qui peut imposer parfois le recours à des techniques de réhabilitation coûteuses pour restaurer les propriétés et les performances initiales de la chaussée. Il est donc important de maintenir un réseau routier sécuritaire avec un bon service pour les usagers. Plusieurs techniques d'entretien existent partout dans le monde. Les enrobés coulés à froid, connus sous le nom d'ECF font partie de ces techniques utilisées. Les ECF sont des matériaux bitumineux minces à froid pour couche de surface destinée à apporter de l'adhérence et à imperméabiliser les supports qui répondent aux exigences du développement durable.

Cependant, bien que l'ECF soit considéré comme une solution pour les entretiens routiers, certains aspects concernant ses performances et son évolution dans le temps restent peu maitrisés. La recherche sur les formulations des ECF avec des granulats bitumineux recyclés (GBR) est au cœur de l'actualité. La variabilité de ses composants ainsi que la possibilité d'intégrer des GBR constituent dans leur ensemble une complexité dans la compréhension du comportement des ECF. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette thèse qui a pour objectif d'étudier et évaluer le comportement des ECF vierges et recyclés vis-à-vis des sollicitations mécaniques et thermiques.

Cette thèse a été orientée selon trois principaux axes. La première partie concerne l'amélioration de la formulation des ECF vierges et recyclés. La deuxième partie a été consacrée à l'étude, en laboratoire et in situ, de l'évolution dans le temps du comportement mécanique et comportement thermique des ECF sans et avec GBR. Le troisième volet a permis la réalisation d'une étude environnementale de la technique des ECF.

Les travaux présentés ici ont démontré la possibilité de fabriquer des ECF avec GBR, mais avec la nécessité d'adapter formulation, surtout pour obtenir une bonne cohésion. Il est également démontré que le vieillissement thermique affecte les ECF et change leur rigidité et leur résistance à l'orniérage, ce qui a un effet sur leur apport structurel lors d'un dimensionnement de chaussée. L'avantage environnemental des ECF a également été confirmé au cours de cette thèse. Enfin, ce travail a abouti à la réalisation d'un chantier expérimental avec des ECF recyclés qui a répondu à toutes les exigences attendues.

Mots clés : enrobés coulés à froid, granulats bitumineux recyclés, dégradation des chaussées, vieillissement, comportement mécanique, analyse cycle de vie

ÉVALUATION DE L'ÉVOLUTION DES PERFORMANCES ET DU COMPORTEMENT DES ENROBÉS COULÉS À FROID NOTAMMENT AVEC MATÉRIAUX RECYCLÉS

Arbia GARFA

ABSTRACT

The harsh climatic condition, the high level of vehicular traffic and the composition of the pavement structure itself is closely linked to the pavement degradation. The lack of proper maintenance can results in the need to use costly rehabilitated technique to bring back the pavements to their initial properties. Hence the importance to maintain the road network to a proper level of service.

There are several maintenance techniques available such as microsurfacing, crack sealing, slurry sealing, fog sealing, etc. The microsurfacing is the application of very thin layer of cold mix asphaltic materials which is environmental friendly.

Although the microsurfacing is considered as one of the best methods for pavement preservation, many aspects of their performance, such as their rutting resistance, mix and binder aging and stiffness, are not yet well understood. Also, the possibility of incorporating recycled asphalt pavement (RAP) into the microsurfacing mix design is one of the other challenges which the researcher are faced in the evaluation of microsurfacing materials.

The main objective of this thesis is to evaluate the rutting resistance, aging and stiffness of the microsurfacing mixes with and without RAP. This also included the evaluation of the extracted binder from both the microsurfacing mixes with and without RAP.This thesis was oriented along three main axis. The first part covers the mix design of microsurfacing with and without RAP. The second part covers the evolution of the mechanical performance thru time. of microsurfacing with and without RAP. The third section shows a life cycle analysis that was performed to evaluate the benefits of using RAP in microsurfacing.

The results have shown that it's possible to make microsurfacing with RAP if the mix design is adapted. It is also shown that thermal ageing affects the microsurfacing rigidity and rutting resistance, which has an impact on their benefit from a pavement design standpoint. The environmental aspects of microsurfacing mixes are evaluated in this thesis as well. Finally, the field performance of microsurfacing mixes with RAP is evaluated in this Ph.D. thesis.

Keywords: microsurfacing, reclaimed asphalt pavement, pavement preservation, aging, stiffness, environmental aspects

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHEHRCHES ET OBJECTIFS 5
1.1 Introduction.....5
1.2 Problématique 6
1.3 Questions de la recherche 10
1.4 Objectifs.....11
1.4.1 Principaux objectifs 11
1.4.2 Les objectifs spécifiques..... 12
1.4.2.1 Le rôle du liant d'apport et le rôle des granulats bitumineux recyclés (GBR)..... 12
1.4.2.2 Les sollicitations climatiques..... 14
1.4.2.3 Comportement des ECF vis-à-vis des sollicitations mécaniques 17
1.4.2.4 Quantification des impacts environnementaux..... 17

CHAPITRE 2 ÉTUDE BILIOGRAPHIQUE.....21
2.1 Introduction.....21
2.2 Entretien et préservation des chaussées 22
2.2.1 Dégradation de la chaussée..... 22
2.2.2 L'entretien des chaussées..... 29
2.3 Généralités sur les ECF.....31
2.3.1 Composition des ECF 32
2.3.2 Méthodologie de formulation et validation des ECF..... 37
2.3.2.1 Comparaison des approches canadiennes et françaises 37
2.3.2.2 Formulation des ECF 40
2.3.2.3 Essai de la validation de la formulation..... 40
2.3.3 Fabrication et mise en œuvre des ECF 44
2.3.4 Avantages et domaines d'emploi des ECF 45
2.3.5 Comparaison des différentes techniques d'entretien à froid des chaussées 46
2.4 Recyclage des GBR dans les techniques routieres 47
2.4.1 Généralités sur le recyclage 47
2.4.2 Notion de GBR 50
2.4.3 Domaine de réutilisation des GBR 51
2.4.4 Caractérisation des GBR..... 52
2.4.5 Rôle des liants présents dans une technique de recyclage 54
2.5 Conclusion 56

CHAPITRE 3 MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA FORMULATION DES ECF 57
3.1 Introduction.....57

3.2 Matériaux employés pour les essais effectués au Canada 57
3.3 Matériaux employés pour les essais en France 59
3.4 La fabrication des ECF en laboratoire 61
3.4.1 Correction de la granulométrie pour recycler 62
3.4.2 Essais réalisés sur les ECF 67
3.5 Conclusion 67

CHAPITRE 4 FORMULATION DES ECF AVEC 100 % DE GBR 69
4.1 Introduction 69
4.2 Objectifs 70
4.3 Méthodologie 70
4.3.1 Choix des matériaux et composition des ECF 71
4.3.2 Démarche expérimentale 71
4.3.3 Essais réalisés pour la validation des formulations des ECF avec GBR-C ..... **Erreur ! Signet non défini.**
4.4 Interprétation des résultats 75
4.4.1 Validation de la formulation ECF vierge 75
4.4.2 Résultats des essais des ECF avec GBR-C 76
4.4.2.1 Analyse de tous les mélanges (ECF +GBR-C) 76
4.4.2.2 Analyse complémentaire sur le mélange DG 9 87
4.5 Conclusion 91

CHAPITRE 5 ÉTUDE DU VIELLISSEMENT THERMIQUE ET PHOTOCHIMIQUE SUR LES ECF VIERGES ET ECF AVEC GBR 93
5.1 Introduction 93
5.2 Problématique du vieillissement des ECF 94
5.3 Organisation de l'étude 96
5.4 Phénomène de vieillissement d'un enrobé bitumineux 97
5.4.1 Notion de vieillissement 97
5.4.2 Evolution des enrobés bitumineux dans le temps 98
5.4.2.1 Phénomène du vieillissement thermique du liant hydrocarboné 98
5.4.2.2 Le vieillissement photochimique 99
5.4.2.3 Mécanisme du vieillissement thermique et photochimique d'un liant bitumineux 100
5.4.2.4 Comparaison entre le vieillissement thermique et photochimique 102
5.4.3 Méthodologies de vieillissement accélérées en laboratoire 103
5.5 Démarche expérimentale adoptée pour la simulation du vieillissement thermique et photochimique 105
5.5.1 Méthode de vieillissement thermique et UV accélérée en laboratoire adoptée 105
5.5.2 Organisation de l'étude pour la simulation du vieillissement thermique et le vieillissement photochimique 107
5.5.2.1 Procédure expérimentale du vieillissement thermique 107

5.5.2.2 Procédure expérimentale du vieillissement photochimique 109
5.5.3 Matériaux et matériels utilisés pour la procédure du vieillissement thermique et photochimique 110
5.5.3.1 Matériaux de base 110
5.5.3.2 Formules étudiées 111
5.5.3.3 Matériels retenus pour la caractérisation des essais de vieillissement thermique et photochimique 111
5.6 Résultats et discussion 112
5.6.1 Caractérisation des matériaux de formulation en vue de l'étude thermique et photochimique 112
5.6.1.1 Analyse de la granulométrie des granulats vierges et GBR..... 112
5.6.1.2 Caractérisation du liant d'apport et du bitume d'enrobage des GBR..... 113
5.6.2 Étude du vieillissement thermique des ECF vierges et des ECF avec GBR..... 118
5.6.2.1 Évaluation des performances du liant..... 119
5.6.2.2 Extraction séquencée des ECF recyclés après le vieillissement thermique..... 127
5.6.2.3 Conclusion des résultats du vieillissement thermique des ECF vierges et de ECF avec des GBR 128
5.6.3 Étude des résultats du vieillissement photochimique 130
5.6.3.1 Interprétation des résultats du vieillissement photochimique sur les matériaux ..... **Erreur ! Signet non défini.**
5.7 Étude complémentaire sur l'impact des constituants des ECF sur le vieillissement photochimique ..... **Erreur ! Signet non défini.**
5.7.1 Procédure expérimentale établie pour l'étude complémentaire..... **Erreur ! Signet non défini.**
5.7.1.1 Identification des différents paramètres de l'étude..... **Erreur ! Signet non défini.**
5.7.1.2 Préparation des échantillons ..... **Erreur ! Signet non défini.**
5.7.2 Résultats des essais de l'étude complémentaire..... **Erreur ! Signet non défini.**
5.8 Conclusion 147

CHAPITRE 6 VALORISATION DES GBR DANS LES ECF- INCIDENCE DES CYCLES GEL-DÉGEL SUR LES PERFORMANCES DES ECF 151
6.1 Introduction.....151
6.2 Étude bibliographique sur le phénomène du gel-dégel.....152
6.2.1 Prise en compte du gel dans le dimensionnement des chaussées 152
6.2.1.1 Méthode empiriques..... 152
6.2.1.2 Méthode mécaniste empirique..... 153
6.2.2 Analyse du phénomène gel-dégel..... 153
6.2.2.1 Effet de la période du gel..... 153
6.2.2.2 Effet de la période de dégel 155
6.2.2.3 Cycle de gel dégel..... 157

6.2.3 Démarche expérimentale pour l'étude du phénomène gel-dégel 158
6.2.3.1 Méthodologie adoptée 158
6.2.3.2 Formulation, préparation et conditionnement des différents ECF 159
6.2.3.3 Fabrication des supports enrobés 160
6.2.4 Essai de gel-dégel 161
6.2.5 Moyens de caractérisation 163
6.2.5.1 Au niveau des granulats vierges et GBR 163
6.2.5.2 Au niveau du liant bitumineux 164
6.2.5.3 Au niveau des ECF 165
6.2.5.4 Au niveau des complexes enrobés à chaud+ ECF 165
6.3 Résultats expérimentaux et discussion 165
6.3.1 Observation visuelle des granulats vierges et GBR 165
6.3.2 Analyse des liants après cycle gel-dégel (CGD) 167
6.3.2.1 Au niveau du bitume pur et bitume additivé 167
6.3.2.2 Au niveau du liant de l'émulsion et des GBR 168
6.3.2.3 Au niveau des liants extraits des galettes d'ECF 171
6.3.3 Caractérisation au niveau des ECF 175
6.3.3.1 Essai d'abrasion 175
6.3.3.2 Orniérage 177
6.4 Conclusion 182

CHAPITRE 7 IMPACT DU VIELLISSEMENT THERMIQUE SUR LA RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE D'ENROBÉS À CHAUD ORNIÉRÉS ET RHÉABILITÉS À L'ECF 185
7.1 Introduction 185
7.2 Orniérage des ECF 186
7.3 Procédure expérimentale de mesure de l'orniérage des plaques d'enrobés à chaud revêtues à l'ECF 190
7.3.1 Matériaux et formulation 191
7.3.2 Fabrication des plaques d'enrobés ornières et réhabilités à l'orniérage 191
7.3.3 Déroulement de l'essai de l'orniérage 193
7.4 Discussion des résultats 195
7.4.1 Résultats des essais d'orniérage sur les plaques d'enrobés à chaud 195
7.4.2 Résultats des essais de l'orniérage des couples enrobé à chaud+ ECF 196
7.5 Prédiction de l'orniérage du couple enrobé à chaud + ECF 204
7.5.1 Développement du modèle 204
7.6 Conclusion 208

CHAPITRE 8 ÉTUDE DE LA RHÉOLOGIE DES ECF- APPLICATION AU DIMENSIONNEMNT RATIONNEL FRANCAIS 211
8.1 Introduction 211
8.2 Comportement mécanique des matériaux viscoélastiques 212
8.2.1 Mesure du module de rigidité 215

8.3 Méthodologie adoptée pour l'étude 215
8.3.1 Formulation et confection des éprouvettes 216
8.3.2 Procédure de fabrication des éprouvettes 216
8.3.3 L'essai de traction indirecte 217
8.4 Analyse et interprétations des résultats du module élastique en fonction de la température et la fréquence 219
8.4.1 Mesure de la composante visqueuse de l'ECF 222
8.4.1.1 Analyse rhéologique (courbe de black et courbe maitresse) ... 223
8.5 Mesure de l'impact de l'ECF sur le dimensionnement des structures des chaussées selon la méthode rationnelle française (Alizée-LCPC) 228
8.5.1 Analyse des résultats de la simulation 231
8.6 Conclusion 232

CHAPITRE 9 RÉALISATION D'UN CHANTIER EXPÉRIMENTAL D'ECF AVEC GBR-VALIDATION DES ESSAIS DE LABORATOIRES 234
9.1 Introduction 234
9.2 Descriptif de la planche d'essai et du chantier expérimental 235
9.2.1 Formulation des ECF avec 50 % GBR pour la réalisation de la planche test et du chantier 236
9.2.2 Mise en œuvre de la planche d'essai et du chantier 237
9.3 Interprétation des résultats 238
9.4 Conclusion 241

CHAPITRE 10 ANALYSE DES CYCLES DE VIE DES ECF SANS ET AVEC GBR-COMPARASION AVEC DES TECHNIQUES CONCURRENTIELLES 242
10.1 Introduction 242
10.2 Contexte et objectifs 243
10.2.1 Probinord, l'entreprise et son ECF 243
10.2.2 Les objectifs de l'étude 244
10.3 Présentation des principaux outils et paramètres 245
10.3.1 Béton bitumineux très mince (BBTM) 245
10.3.2 Analyse de cycle de vie (ACV) 245
10.3.2.1 Définition du champ de l'étude 246
10.3.2.2 Inventaire des flux 247
10.3.2.3 Évaluation des impacts 248
10.3.3 Le logiciel SEVE (Système d'Évaluation de Variantes Environnementales) 248
10.4 Comparaison environnementales des ECF et autres techniques 250
10.5 Démarche de travail 252
10.5.1 Données de calcul 252
10.5.2 Les différentes étapes de la réalisation d'ECF 254
10.5.3 Hypothèses choisies 255
10.5.3.1 Données nécessaires pour SEVE 255
10.5.3.2 Hypothèses à paramètres fixes ECF 255

10.5.3.3 Hypothèses à paramètres variables ECF 257
10.5.3.4 Hypothèses pour les BBTM 259
10.6 Méthode d'analyse des résultats obtenus par le logiciel SEVE 260
10.6.1 Évaluation de l'impact du transport des matériaux dans les différents cas de chantier des ECF 262
10.6.1.1 Influence du transport des matériaux sur l'impact environnemental 263
10.6.2 Comparaison des ECF avec les BBTM 266
10.6.2.1 Comparaison ECF avec les BBTM classiques: interprétation des résultats 267
10.6.2.2 Comparaison des ECF avec BBTM tièdes : analyse des résultats 269
10.6.3 Synthèse de l'analyse basée sur les données de l'outil SEVE 271
10.7 Etude basée sur les données Probinord 272
10.7.1 Actualisation des données 273
10.7.1.1 Introduction des données de la machine ECF de Probinord 273
10.7.1.2 Changement de la carrière pour le chantier de Magescq 274
10.7.2 Interprétation des résultats avec les données actualisées 275
10.8 Introduction des GBR dans les ECF 278
10.8.1 Analyse des résultats 278
10.9 Conclusion 280

CONCLUSION 283

RECOMMENDATIONS 295

ANNEXE I FICHE TECHNIQUE DES MATÉRIAUX DE FORMULATION 293

ANNEXE II RÉSULTATS 299

ANNEXE III FICHES TECHNIQUES DES ENROBÉS À CHAUD POUR GEL-DÉGEL 313

BIBLIOGRAPHIE 323

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1	Classes de performances usuelles pour les caractéristiques des matériaux bitumineux coulés à froid et leurs constituants identifiées dans l'article 5 de la norme 12273 (2008)	38
Tableau 2.2	Classes de performances d'Evaluation Visuelle de défauts suivant la méthode d'essai NF EN 12274-8 (2006)	39
Tableau 2.3	Aide au choix des ESU et des ECF	47
Tableau 3.1	Matériaux utilisés pour formuler l'ECF pour les essais realisés au Québec - Canada	58
Tableau 3.2	Matériaux utilisés pour formuler l'ECF pour les essais réalisés en France	60
Tableau 4.1	Granulométrie et masses utilisées pour les mélanges Dense-Dense, dense-grossière, dense-fine	73
Tableau 4.2	Pourcentages massiques des différentes formulations d'ECF recyclés	74
Tableau 4.3	Résultats des essais de caractérisation des ECF vierges	75
Tableau 4.4	Les numéros des différents mélanges selon la granulométrie (DD, DG et DF) et la teneur en émulsion	76
Tableau 4.5	Moyenne des essais cohésion à 30 min, gamme de répétabilité et écart type	79
Tableau 4.6	Moyenne des essais cohésion à 60 min, gamme de répétabilité et écart type	80
Tableau 4.7	Moyenne des essais d'abrasion, gamme de répétabilité et écart type	83
Tableau 4.8	Moyenne des essais déplacement latéral, gamme de répétabilité et écart type	85
Tableau 4.9	Moyenne des essais déplacement vertical, gamme de répétabilité et écart type	86
Tableau 4.10	Résultats des essais HCT pour ECF avec 100% GBR-C	90
Tableau 5.1	Les deux processus de vieillissement des liants bitumineux	102

Tableau 5.2	Indices d'oxydation du bitume pur et du bitume des GBR	117
Tableau 5.3	Indices d'oxydation des bitumes ECF avec 20 % GBR	126
Tableau 5.4	Indices d'oxydation des bitumes ECF avec 50 % GBR	126
Tableau 5.5	Évolution des classes des liants au cours des différents stades de vieillissement	129
Tableau 5.6	Évolution de l'indice carbonyle des liants résiduels des émulsions vieillies UV et thermique (épaisseur 3mm)	134
Tableau 5.7	Comparaison entre les résultats théoriques (loi des mélanges) et expérimentaux (en laboratoire) des caractéristiques du mélange recyclé liant neuf +liant GBR	139
Tableau 5.8	Contribution du vieillissement photochimique par rapport au vieillissement thermique dans les ECF vierges et recyclés	140
Tableau 5.9	Température seuil de déformation	143
Tableau 5.10	Pourcentages de désenrobage des ECF recyclés après des extractions séquencées	144
Tableau 5.11	TBA des liants extrait des ECF recyclés après des extractions séquencées	145
Tableau 5.12	Indices d'oxydation des liants extraits des ECF recyclés après des extractions séquencées	145
Tableau 5.13	Caractérisation des carottes d'ECF	146
Tableau 5.14	Rappel des caractéristiques des liants extraits d'ECF vieillis en laboratoire à 85°C (vieillissement thermique étudié dans la partie 1 du chapitre)	147
Tableau 6.1	Synthèse des différents essais réalisés sur nos matériaux	163
Tableau 6.2	Essai de l'abrasion sur les galettes d'ECF sans et avec GBR	176
Tableau 7.1	Les types de structures testés d'orniérage	193
Tableau 7.2	Évolution de la profondeur d'ornière des enrobés à chaud en fonction des conditions de vieillissement	195
Tableau 7.3	Évolution de la profondeur d'ornière des couples enrobés à chaud + ECF vierge en fonction des conditions de vieillissement	198

Tableau 7.4	Matrice de corrélation du modèle de prédiction de l'orniérage des enrobé à chaud/ ECF	206
Tableau 7.5	Analyse de la variance des variables de prédiction du modèle	208
Tableau 8.1	Résultats des essais de modules lors de l'essai de traction indirecte et de calculs des angles de retard par la méthode graphique	225
Tableau 8.2	Données d'entrées des simulations	229
Tableau 8.3	Résultats d'analyse comparative des structures étudiées	232
Tableau 9.1	Formulation des ECF 50 % GBR pour les chantiers expérimentaux	236
Tableau 9.2	Tableau des mesures de PMT pour la planche d'essai	239
Tableau 9.3	Tableau des mesures de PMT pour le chantier ECF 50% GBR	240
Tableau 9.4	Tableau des mesures de PMT pour le chantier ECF vierge	240
Tableau 10.1	Récapitulatif des quantités de matières premières nécessaires pour 455 tonnes d'ECF	257
Tableau 10.2	Tableau récapitulatif des distances	259
Tableau 10.3	Récapitulatif des distances parcourues	260
Tableau 10.4	Consommation comparée en énergie de procédé dans les 3 cas de chantier pour l'ECF (en MJ) selon SEVE	263
Tableau 10.5	Émissions totales de GES dans les 3 cas de chantier pour l'ECF (en t.CO2) selon SEVE	263
Tableau 10.6	Tonnes kilomètres (t.km) dans les 3 cas de chantier selon SEVE	263
Tableau 10.7	Comparaison quantificative de l'impact du transport de l'émulsion par rapport à celui des granulats	266
Tableau 10.8	Table avec les consommations de la machine ECF de SEVE et la machine ECF de Probinord	273
Tableau 10.9	Consommation comparée en énergie procédé de plusieurs ECF avec différentes quantités de GBR et d'un BBTM classique dans le cas de Magescq (en MJ)	278

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1	Graphique représentant l'Indice de l'état des chaussées PCI (*Pavement Condition Index*) en fonction de la durée de vie de la chaussée	6
Figure 1.2	Logigramme présentant le déroulement des études en fonction de l'objectif principal et des objectifs spécifiques de cette thèse	12
Figure 1.3	Représentation du phénomène de mélange des liants d'un enrobé recyclé	14
Figure 1.4	Structure de la thèse	19
Figure 2.1	Exemples orniérage à grand rayon (a) Ornière à niveau de sévérité faible; (b) ornière à niveau de sévérité majeur (fluage)	25
Figure 2.2	Nids de poule (a) nids de poule à niveau faible ; (b) nids de poule à niveau majeur	26
Figure 2.3	Fissures (a) Fissure longitudinale ; (b) Fissure transversale	28
Figure 2.4	Ressuages (a) Ressuage à gravité faible ; (b) Ressuage à gravité majeure	29
Figure 2.5	ECF sur route départementale	32
Figure 2.6	Essai de cohésion	41
Figure 2.7	Essai d'abrasion humide	42
Figure 2.8	Essai d'orniérage	43
Figure 2.9	*Hilt Cohesion Test*- Mesure du temps de rupture d'une galette d'ECF	44
Figure 2.10	Application de l'ECF et composante d'une machine traditionnelle	45
Figure 2.11	Schéma explicatif des différents procédés de recyclage des enrobés.	49
Figure 2.12	Granulats bitumineux recyclés GBR	51
Figure 3.1	Récapitulatif des matériaux utilisés pour les essais	61
Figure 3.2	Courbes granulométriques pour les ECF- pourcentage de passant	63

Figure 3.3 Courbes granulométriques des GBR –C (0-5mm).....64

Figure 3.4 Courbes granulométriques des granulats vierges.....64

Figure 3.5 Courbes granulométrique pour ECF avec 20% de GBR, ainsi que les courbes pour le granulat vierge et le GBR 65

Figure 3.6 Courbes granulométrique pour ECF avec 50% de GBR, ainsi que les courbes pour le granulat vierge et le GBR 66

Figure 3.7 Courbes granulométrique pour ECF composé de 100% de GBR, ainsi que les courbes pour le granulat vierge et le GBR.....66

Figure 4.1 Courbes granulométriques des mélanges dense, fine et grossière dans le fuseau de l'ISSA 73

Figure 4.2 Résultats des essais de cohésion des mélanges ECF en fonction de la teneur en émulsion 78

Figure 4.3 Résultats des essais d'abrasion des mélanges ECF en fonction de la teneur en émulsion 82

Figure 4.4 Évolution de la cohésion d'un ECF en fonction du temps et du type d'émulsion de bitume.....88

Figure 4.5 Évolution de la montée en cohésion en fonction du temps de cure et du dosage en ciment (DG9, émulsion C60) 89

Figure 5.1 Comparaison du vieillissement du bitume à 60°C avec et sans exposition aux UV 100

Figure 5.2 Formation des sulfoxydes 101

Figure 5.3 Mécanismes radicalaires de formation des carbonyles.....101

Figure 5.4 Plan d'essais de l'ECF de référence.....108

Figure 5.5 Plan d'essais ECF avec GBR.....108

Figure 5.6 Le logigramme des différentes étapes mûrissement /Vieillissement (thermique et UV) sur émulsion, ECF vierge et ECF recyclé 110

Figure 5.7 Granulats vierges 0/6 continus- GBR 0/6 continus.....113

Figure 5.8 Résultats des essais TBA et pénétrabilité pour le bitume pur et le bitume des GBR 114

Figure 5.9 Spectres Infrarouge du bitume pur et du bitume GBR après zoom ...115

Figure 5.10 Spectre classique d'un bitume obtenu par IRTF T 116

Figure 5.11 Courbes module complexe (G*) en fonction de la fréquence (F(f)) à 20°C en PP8 118

Figure 5.12 Échantillons d'ECF de référence après formulation et coulage dans les gamelles - Échantillons d'émulsion coulés dans les gamelles pour mûrissement/vieillissement -Échantillon d'ECF de référence retiré de l'étuve après 1 jour de vieillissement accéléré 119

Figure 5.13 Évolution de TBA pour le bitume d'ECF vierge et le bitume d'émulsion pour chaque jour de mûrissement/vieillissement 120

Figure 5.14 Évolution de pénétrabilité pour le bitume d'ECF et le bitume d'émulsion pour chaque jour de mûrissement/vieillissement 121

Figure 5.15 Évolution de la TBA pour le bitume d'ECF avec recyclé et d'ECF de référence pour chaque jour de mûrissement/vieillissement 121

Figure 5.16 Évolution de la pénétrabilité pour le bitume d'ECF avec recyclé et d'ECF de référence pour chaque jour de mûrissement/vieillissement.....122

Figure 5.17 Exemple de spectres du bitume de l'ECF de référence vieilli 124

Figure 5.18 Courbes des indices d'oxydation du bitume pour ECF de référence et pour émulsion.....125

Figure 5.19 Évolution de TBA des liants résiduels des émulsions 3 et 1,5 mm vieillies dans l'enceinte UV.....131

Figure 5.20 Évolution de l'indice d'oxydation des émulsions vieillies UV 3 et 1,5mm 132

Figure 5.21 Évolution de la pénétrabilité et la TBA des liants résiduels de deux émulsions UV et thermique vieillies de 3mm.....133

Figure 5.22 Spectres IR des liants résiduels des émulsions UV et thermique vieillies, 3mm d'épaisseur (partie du spectre de 900 à 1900 cm^{-1}) ...134

Figure 5.23 Superposition des courbes maîtresses des liants résiduels des émulsions vieillies UV et thermique J14 (épaisseur 3mm) 136

Figure 5.24 Évolution de la TBA des liants extraits des ECF vierges et recyclés (thermique et UV).....137

Figure 5.25 Évolution de la pénétrabilité des liants extraits des ECF vierges et recyclés (thermique et UV) 138

Figure 5.26 Superposition des courbes maîtresses des ECF vierges : thermique et UV avant et après 21 jours de vieillissement à 44 °C 141

Figure 5.27 Critère de traction SHRP 143

Figure 5.28 Échantillons d'ECF extraits d'un chantier de Probinord 146

Figure 6.1 Soulèvement de la chaussée sous l'effet du gel 155

Figure 6.2 Effet de dégel sur la chaussée 156

Figure 6.3 Moules utilisés pour la fabrication des ECF, A) pour l'essai de l'abrasion, B) pour l'essai de l'orniérage 159

Figure 6.4 Échantillons fabriqués : à droite) complexes ECF + enrobé à chaud, à gauche) galettes d'ECF vierge 160

Figure 6.5 Description des cycles pour la réalisation des essais de gel-dégel 162

Figure 6.6 Granulats vierge : A) avant CGD m1= 988g B) après CGD m2= 992 g 166

Figure 6.7 Évolution de la TBA et pénétrabilité sur le bitume pur et bitume additivé après et avant CGD 167

Figure 6.8 Résultats de TBA et de pénétrabilité sur le liant résiduel de l'émulsion et sur le liant de GBR 170

Figure 6.9 Résultats de module complexe de l'émulsion avant et après cycle gel dégel 170

Figure 6.10 Essais de de module complexe des GBR avant et après cycle gel dégel 171

Figure 6.11 TBA sur ECF vierge après 10 CGD 172

Figure 6.12 TBA sur ECF+GBR après 10 CGD 172

Figure 6.13 Courbe maitresse ECF Vierge et avec GBR avant et après CGD 173

Figure 6.14 Courbe maitresse ECF+GBR 174

Figure 6.15 Comparaison du comportement rhéologique des liants des ECF vierge et ECF avec GBR 175

Figure 6.16 Essai de l'orniérage à 60°C sur les plaques d'enrobés à chaud (HMA) à 10% de vides avant et après CGD.....178

Figure 6.17 Évolution de l'orniérage à 60°C sur les complexes HMA à 10% vides (pré-ornièrés) + ECF vierge après CGD.....179

Figure 6.18 Évolution de l'orniérage à 60°C sur les complexes HMA à10% vides (pré-ornièrés) + ECF + GBR après CGD 180

Figure 6.19 Évolution de l'orniérage à 60°C sur les HMA sans ECF à 15% de vide avant et après CGD et sur complexe avec ECF après CGD (eau + sel).....181

Figure 7.1 Différentes sollicitations induites par le trafic 187

Figure 7.2 Résultats des essais d'orniérage sur différentes granularités d'ECF .189

Figure 7.3 Essai d'orniérage à l'orniéreur MLPC 193

Figure 7.4 Photo de plaques d'enrobé ornières et réhabilitées à l'ECF avant à l'essai d'orniérage à 30 000 cycles 194

Figure 7.5 Plaques d'enrobé ornières et réhabilitées à l'ECF après à l'essai d'orniérage à 30000 cycles. (a) Plaque d'enrobés à chaud avant orniérage; (b) Plaque d'enrobés à chaud avant orniérage; (c) Plaque d'enrobés à chaud après 10 000 cycles d'orniérage et (d) Plaque d'enrobés à chaud après 30 000 cycles d'orniérage.....194

Figure 7.6 Impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage 196

Figure 7.7 Impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des couples enrobé à chaud /ECF vierges.....201

Figure 7.8 Impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des couples enrobé à chaud / ECF recyclés 202

Figure 7.9 Impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des couples enrobé à chaud /ECF vierges et des couples enrobé à chaud/ECF recyclé 203

Figure 7.10 Valeurs d'orniérage prédites Vs valeurs d'orniérage mesurées.....207

Figure 8.1 Représentation du module complexe 213

Figure 8.2 Méthodologie de confection d'éprouvette d'ECF pour essai 217

Figure 8.3 Montage d'éprouvette d'ECF pour l'essai de traction indirecte a) photo du montage b) schéma de la crête de la charge et le temps de montée 218

Figure 8.4 Évolution de la force au cours du temps lors de l'essai lors de l'essai de module de rigidité élastique sur les ECF formulés avec des GBR à 0°C 219

Figure 8.5 Courbes isothermes à-10°C, 0°C et 10°C pour les modules de rigidité mesurés en traction indirecte 221

Figure 8.6 Courbes d'évolution des contraintes et des déformations en fonction du temps lors de l'essai de traction indirecte 223

Figure 8.7 Courbes de modules dans l'espace de Black 225

Figure 8.8 Courbe maitresse de l'ECF vierge et modélisation 2S2P1D 227

Figure 8.9 Courbe maitresse de l'ECF recyclé 50% GBR et modélisation 2S2P1D 227

Figure 8.10 Donnée de chargement et orientation de l'entraxe 230

Figure 8.11 Principaux critères de dimensionnement en mode grille-séca (LCPC) 231

Figure 9.1 Courbe granulométrie de l'ECF pour les chantiers expérimentaux 237

Figure 9.2 Les photos chantier expérimental réalisé par Probinord (Essonne –France) 238

Figure 10.1 Usine de liant Probinord située à Méréville –France 244

Figure 10.2 Schéma d'interprétation de l'ACV 246

Figure 10.3 Schéma des flux. 248

Figure 10.4 Indicateurs SEVE 249

Figure 10.5 ACV partielle d'un chantier routier (frontière du système) 250

Figure 10.6 Comparaison d'énergie consommée selon différentes techniques 251

Figure 10.7 Impact environnemental d'une solution ECF par rapport à une solution BBTM 252

Figure 10.8 Cheminement d'un ECF 254

Figure 10.9	Localisation des 3 cas de chantiers	258
Figure 10.10	Consommations comparées en énergie de procédé (en MJ) d'ECF dans les 3 cas de chantier selon SEVE	264
Figure 10.11	Émissions de GES comparées selon SEVE	265
Figure 10.12	Tonnes kilomètres (t.km) selon SEVE	265
Figure 10.13	Consommation comparée en énergie de procédé (MJ) pour un ECF et un BBTM classique dans les 3 cas de chantier	267
Figure 10.14	Émissions totales de GES pour un ECF et un BBTM classiques dans les 3 cas de chantier	268
Figure 10.15	Tonne kilomètre pour l'ECF et le BBTM dans les 3 cas de chantiers selon SEVE	268
Figure 10.16	Consommation comparée en énergie de procédé pour l'ECF, un BBTM classique et un BBTM tiède dans le cas de Falaise selon SEVE	270
Figure 10.17	Émissions totales de GES pour l'ECF, un BBTM classique et un BBTM tiède dans le cas de Falaise selon SEVE	270
Figure 10.18	Consommation comparée d'énergie de procédé de l'ECF et d'un BBTM	275
Figure 10.19	Émissions totales comparées de l'ECF et d'un BBTM classique dans les trois cas de chantier	276
Figure 10.20	Consommation comparée en énergie procédé de l'ECF et d'un BBTM classique dans le cas de Magescq (en MJ) selon SEVE	277
Figure 10.21	Consommation comparée en énergie procédé de plusieurs ECF avec différentes quantités de GBR et d'un BBTM classique dans le cas de Magescq (en MJ) selon SEVE	279

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse de Cycle de Vie
AE	Agrégats d'Enrobés
ASTM	American Section for Testing Materials
BBSG	Béton Bitumineux Semi Grenu
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
$CaCl_2$	Chlorure de Calcium
CGD	Cycle Gel-Dégel
CO	Carbonyle
CQS-1HP	*Cationic Quick Set-hard bitumen with polymer*
DD	Dense-Dense
DF	Dense-Fine
DG	Dense-Grossière
DSR	*Dynamic Shear Rheometer*
ECF	Enrobé Coulé à Froid
ESG	Enrobé Semi-Grenu
ESU	Enduit Superficiel d'Usure
GBR	Granulats Bitumineux Recyclés
GES	Gaz à Effet de Serre
HCT	*Hilt Cohesion Test*
HMA	*Hot Mix Asphalt*
IDRRIM	Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité

IR	Infrarouge
ISSA	International Slurry Surfacing Association
KBr	Bromure de Potassium
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LVDT	*Linear Variable Differential Transformers*
MDE	Micro Deval en Présence d'Eau
MPLC	Matériels des Laboratoires des Ponts et Chaussées
NaCl	Chlorure de Sodium
PAV	*Pressure Aging Vessel*
PMT	Profondeur moyenne de texture
PG	*Performance Grade*
PSV	*Polished Stone Value*
RAP	*Reclaimed Asphalt Pavement*
RAS	*Reclaimed Asphalt Shingle*
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
RTFOT	*Rolling Thin Film Oven Test*
SBS	Styrène-Butadiène-Styrène
SEVE	Système d'Évaluation des Variantes Environnementales
SHRP	Strategic Highway Research Program
SO	Sulfoxide
SS-1	*Slow Setting*
TBA	Température Bille Anneaux

UV	Ultraviolet
WTAT	*Wet Track Abrasion Tester*
2S2P1D	*2 Springs / 2 Parabolic / 1 Dashpot*

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

X	Taille de l'échantillon
K	Nombre de variables indépendantes dans le modèle
Y	Valeurs testées
$\hat{Y}$	Valeurs prédites
R^2	Coefficient de détermination
S_e	Erreur standard
S_y	Déviation Standard
E*	Module complexe (MPa)
|E*|	Norme du module complexe (MPa)
ϕ	Argument du module complexe (rad)
E_1	Partie réelle du module complexe (MPa)
E_2	Partie imaginaire du module complexe (MPa)
i	Le nombre complexe défini par $i^2 = -1$
E	Module de rigidité mesuré (MPa)
F	Valeur crête de la charge verticale appliquée (N)
Z	Amplitude de la déformation horizontale (mm)
H	Épaisseur moyenne de l'éprouvette (30 mm à 75 mm)
ν	Coefficient de Poisson
E '	Module de rigidité (MPa), corrigé par un facteur de surface de charge de 0,60
K	Facteur de surface de charge mesuré
E	Module de rigidité (MPa) à un facteur de charge *k*

ω	2π*fréquence est la pulsation
k, h	Exposants tels que $0 < k < h < 1$
E0	Module statique le module lorsque $\omega\eta \rightarrow 0$
$E\infty$	Module vitreux le module lorsque $\omega\eta \rightarrow \infty$
η	Temps caractéristique
β	Constante sans dimension
ε	Viscosité Newtonienne

INTRODUCTION

L'agressivité du trafic routier et du climat ainsi que les déficits budgétaires ont un impact important sur les infrastructures routières et sur leur politique de gestion. Ces facteurs touchent les performances des matériaux de la chaussée. Selon les zones climatiques, les chaussées subissent d'importantes variations d'amplitudes thermiques pouvant entrainer des risques de fissurations à basses températures ou d'orniérage par ramollissement du bitume à température élevée Nguyen (2006). La négligence ou l'absence d'entretien peuvent engendrer des risques d'évolution des dégradations qui, si elles dépassent un certain seuil obligent à recourir à des techniques de réhabilitation coûteuses pour redonner à la chaussée ses propriétés et ses performances initiales (Chabot et al., 2010).

Ainsi, il est important pour maintenir un réseau routier avec un bon niveau de service pour les usagers, de toujours prévoir un programme d'entretien adéquat tant au niveau de la méthode choisie que des exigences liées au respect et à la protection de l'environnement. En effet, l'urgence au niveau planétaire est la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Cet enjeu fut le sujet principal de la COP21 (21ème Conférence des Parties, Paris, 2015) pendant laquelle un accord international applicable à tous les pays membres a été validé avec comme objectif la limitation du réchauffement mondial entre 1,5°C et 2°C d'ici 2100. Cet accord permet de faire le lien entre la croissance économique et la protection environnementale et planifie les jalons du développement durable dans la société. Plusieurs techniques d'entretien des structures de chaussées sont utilisées de nos jours dans le monde entier, et parmi elles les enrobés coulés à froid, connus sous le nom d'ECF. Les ECF sont des enrobés pour couches de surface destinés à apporter une bonne adhérence et selon le cas à imperméabiliser les supports. La fabrication des ECF consiste à mélanger des granulats de bonne qualité avec une émulsion de bitume (généralement cationique) à rupture contrôlée, à base de bitume souvent modifié. Ils permettent de satisfaire tout un éventail de besoins en construction routière (Lebec, 2014). Bien que la technique des ECF présente une alternative dans l'entretien des chaussées bitumineuses, plusieurs questions se posent sur leurs performances et évolutions tout au long de leur durée

de vie. Cependant, l'acquisition d'expérience et le perfectionnement de la conception du savoir-faire restent encore des facteurs déterminants pour le succès de ces mélanges.

Cette thèse est menée dans le cadre d'une collaboration entre l'École de technologie supérieure (ÉTS) au Canada et l'École Spéciale des Travaux Publics (ESTP) en France. Les expérimentations ont été effectuées au sein du Laboratoire sur les Chaussées et les Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'ÉTS et de l'Institut de Recherche en Constructibilité (IRC) de l'ESTP en partenariat avec l'entreprise française Probinord, spécialisée dans les techniques de construction routières.

La recherche concernant la formulation des ECF avec des matériaux granulaires recyclés est plus que d'actualité et demeure un thème actif à cause de sa complexité. La grande variabilité des constituants de ces mélanges ainsi que l'interaction entre eux et la possibilité de l'incorporation des matériaux recyclés contribuent à cette complexité dans la compréhension du comportement et les performances des enrobés coulés à froid. De plus, avec la prise de conscience des problématiques environnementales durant cette dernière décennie, l'importance des connaissances techniques de l'environnement d'un chantier, dans le cas de cette thèse l'utilisation des granulats bitumeux recyclés (GBR), dans les mélanges d'ECF peut prendre toute sa dimension en chiffrant l'empreinte environnementale.

Ainsi, selon les travaux de Robati (2014b), l'incorporation du GBR dans les ECF donne de bons résultats avec les essais de l'ISSA. Cependant, il demeure important de connaitre son impact sur sa durabilité sur site au cours du temps (résistance aux dégradations), vu que le liant des GBR a déjà subi un vieillissement (étude du vieillissement thermique et photochimique). Les résultats obtenus devront être comparés à l'évolution d'un ECF vierge (formulés sans recyclés). Il est à noter aussi que les essais de caractérisation des ECF selon les normes en vigueur (ISSA, ASTM) s'effectuent tous à jeune âge. Ainsi, il est important d'effectuer ces essais après vieillissement pour suivre l'évolution des performances de ces matériaux dans le temps. D'autre part, la littérature présente les ECF comme des matériaux n'intervenant que sur l'adhérence et l'imperméabilisation de la chaussée à cause de leur faible épaisseur de mise en

œuvre. Ceci sous-entend qu'il n'a aucun impact sur la distribution des contraintes et des déformations dans la structure de chaussée soumise aux sollicitations. Il est ainsi nécessaire de mesurer cet impact à travers des essais rhéologiques et des simulations sur un logiciel de dimensionnement pour comprendre si et comment la durée de vie des chaussées bitumeuses revêtues d'ECF peut être prolongée. En effet, ceci peut être dû au ralentissement des dégradations de la chaussée du essentiellement à la pénétration d'eau ou à un apport structural de l'ECF (résistance).

Il est important de mentionner que les GBR sont également connus sous le nom des agrégats d'enrobés (AE) ou encore «*Reclaimed asphalt pavement»* (RAP), mais par des soucis de constance, seule l'abréviation GBR est employée dans cette thèse de doctorat.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de cette thèse qui vise à améliorer la compréhension des ECF et à introduire de nouveaux aspects dans leur formulation. Les avantages de cette thèse résident dans les interactions techniques entre les laboratoires de deux pays situés dans deux continents différents avec des exigences normatives et des matériaux d'étude variés afin d'apporter des réponses techniques communes.

Au cours de cette thèse, les travaux effectués sont présentés en onze chapitres. Après l'introduction, le premier chapitre de cette thèse est consacré à la problématique liée à l'évaluation des performances des ECF classiques et des ECF recyclés (formulés avec du GBR). Le deuxième chapitre présente une revue de connaissances qui vise à expliquer la difficulté de la formulation des ECF avec des matériaux recyclés ainsi que les méthodes d'analyse de leurs performances.

Avant les épreuves de formulation des ECF recyclés au chapitre 4, une présentation des matériaux utilisés au cours de cette thèse est effectuée au chapitre 3. Ensuite, le chapitre cinq traite de l'étude de l'évolution des ECF dans le temps et plus précisément le vieillissement thermique et photochimique avec notamment le développement d'un protocole expérimental.

Le chapitre 6 présente l'étude de l'impact du phénomène gel dégel sur une chaussée support réhabilitée à l'ECF.

Le chapitre 7 est dédié à la caractérisation mécanique et physicochimique des formules d'ECF recyclés. Cette caractérisation mécanique avait comme objectif d'évaluer, dans un premier temps, la résistance à l'orniérage, suivie de la mesure de la rigidité élastique des ECF vierges et des ECF recyclés.

Suite à la caractérisation des propriétés mécaniques et physicochimiques des ECF, la mesure de l'impact structurel des ECF sur le dimensionnement des chaussées est montrée au chapitre 8.

Pour leurs validations, les travaux expérimentaux effectués en laboratoire ont nécessité la mise en œuvre d'une planche d'essai expérimentale (chaussée revêtue d'ECF recyclé) réalisée par l'entreprise Probinord. Cette partie est présentée au chapitre 9.

Le chapitre 10, quant à lui, porte sur la quantification de l'impact environnemental des ECF vierges et des ECF recyclés.

Notons que cette thèse a été rédigée malgré l'absence de normes de référence pour la validation des travaux effectués sur les ECF recyclés et la nécessité de mettre en place des méthodologies dans l'évaluation de l'évolution dans le temps des ECF. Ainsi, les résultats obtenus à travers les essais réalisés sur les ECF vierges nous ont servi de référence.

La conclusion étaye succinctement les méthodes utilisées au cours de ces travaux, la contribution scientifique et ses retombées potentielles, tout en mettant en relief les principaux résultats obtenus, et en proposant les futurs travaux qui devraient être effectués sur les ECF.

CHAPITRE 1

PROLÉMATIQUE DE RECHERCHE ET OBJECTIFS

1.1 Introduction

L'emploi des granulats bitumineux recyclés, connu sous le nom de GBR, dans les ECF constitue un des piliers du développement durable des chaussées à travers la maitrise de l'impact environnemental et la préservation des ressources naturelles. L'ECF est un matériau complexe de par sa composition, car il est composé de matériau élastique (squelette granulaire), de liant bitumineux (émulsion), de liant hydraulique (ciment), de fibres, d'eau et d'adjuvant. Ceci lui confère un comportement tout aussi complexe qui doit s'adapter au support, aux conditions climatiques et au trafic pour une remise en circulation rapide et une durabilité dans le temps.

Dans cette thèse, la difficulté dans la compréhension du comportement et des performances des ECF est accentuée par l'introduction des GBR dans les mélanges. Peu d'études ont été effectuées sur l'interaction entre l'émulsion de bitume et les granulats bitumineux recyclés. En effet, lors de la formulation d'ECF aves des GBR, il est souhaitable que le mélange effectué (soit mélange parfait ou une adhésion) entre le liant d'ajout et le liant vieilli des GBR soit maitrisé. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail de cette thèse qui vise à améliorer la compréhension des ECF formulés avec des GBR.

Dans ce chapitre, dans un premier temps, la problématique de recherche a été identifiée à travers les questionnements que posent l'utilisation des GBR dans les ECF à savoir adhésivité, performance et vieillissement. Ces points sont détaillés dans la partie question de recherche de ce chapitre. Ensuite, les objectifs ont été présentés à travers des objectifs principaux et des objectifs spécifiques.

1.2 Problématique

La circulation sur une chaussée en mauvais état peut amplifier les dégradations de la chaussée, menacer la sécurité de ses usagers, augmenter le temps de transport et entrainer des frais élevés pour l'entretien des véhicules (consommation supplémentaire du carburant, usures des pneus…). L'accélération des dégradations est due entre autres aux conditions climatiques particulièrement rigoureuses dans certaines régions ainsi qu'au manque de suivi et d'entretien. Les conséquences d'une mauvaise qualité d'un réseau routier ne sont donc pas négligeables (LCPC, 1994b).

Il est indispensable de trouver une solution pour limiter la dégradation du réseau et assurer une maintenance de celui-ci à un coût plus faible. Une des solutions est l'entretien; il présente de nombreux avantages notamment sur le point économique qui est le facteur déterminant et permet de rallonger la durée de vie des chaussées s'il est effectué au bon moment (Infraguide, 2003).

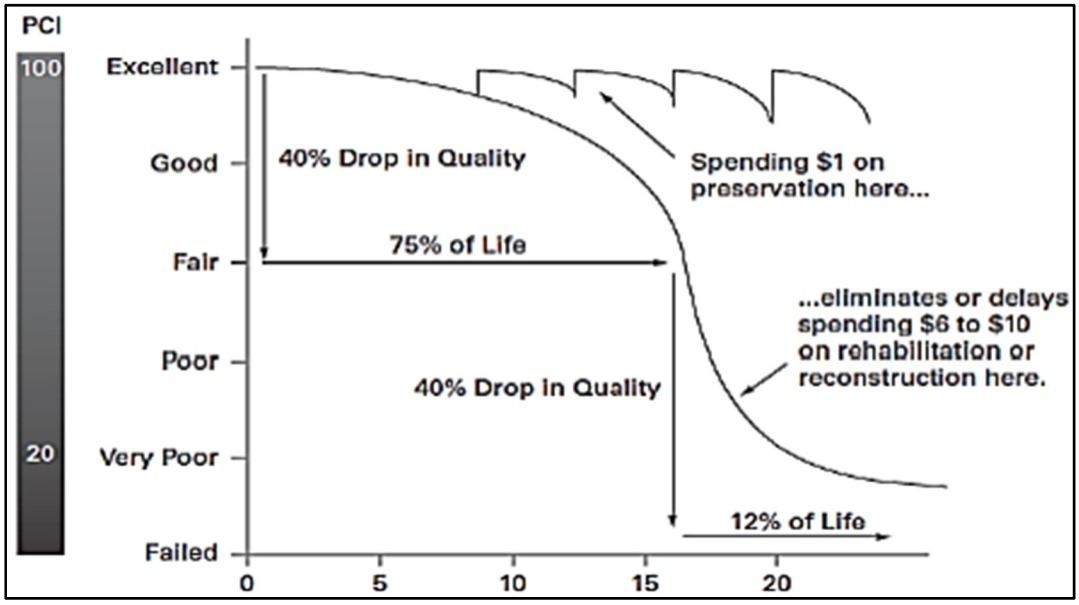


Figure 1.1 Graphique représentant l'Indice de l'état des chaussées PCI (*Pavement Condition Index*) en fonction de la durée de vie de la chaussée
Tirée de Bitume Québec (2014)

La figure 1.1 représente l'évolution d'une chaussée sur une durée de vie d'environ 20 ans. Si un entretien préventif de la chaussée est appliqué à temps, il devrait régénérer les capacités initiales de la route et allonger sa durée de vie. Dans ce cas, le coût du traitement de prévention est de 1$ CAN/ m² (soit environ 0,84€/m²). Cependant, si le traitement est retardé, il devrait appliquer un traitement de réhabilitation, ce qui coûte généralement de 6 à 10 fois plus (6$ à 10$/m² soit environ de 5 à 8,4€/m²) que le coût du traitement de la chaussée. Si la route est trop abimée, elle devra même être reconstruite. La maintenance préventive est donc une solution viable (Bony, 2000).

La technique des ECF semble apporter des solutions pour ces problèmes. En effet, cette technique prolonge la durée de vie utile des chaussées de 5 à 7 ans en ralentissant la dégradation (orniérage à faible rayon et début de fissuration…) et permet de conserver de bonnes propriétés d'adhérence dans le temps. La popularité des ECF s'est construite à travers ses performances telles que l'adhérence, le confort acoustique moyen (77.3 dB(A) et l'étanchéité (Lebec, 2014). La formulation des enrobés coulés à froid est un art qui relève directement du savoir-faire des concepteurs spécialisés dans ce type de mélange.

Les critères recherchés, lors de la mise en œuvre de cette technique, sont (Garfa, 2016; Lebec, 2014; Robati, 2014b):

- un délai court de remise sous circulation;
- une tenue au trafic et aux contraintes climatiques;
- une durabilité de l'adhérence;
- une capacité à redonner un bon profil à une chaussée (remplissage des ornières, colmatage des fissures, etc.);
- une économie d'énergie et une réduction des coûts.

De plus, l'accroissement des contraintes lié à l'application du management du développement durable permet aux ECF de s'imposer techniquement et économiquement en valorisant plusieurs de leurs exigences comme la maîtrise des coûts et de l'impact environnemental.

Néanmoins, les performances et le comportement des ECF ne sont pas encore totalement maitrisés, malgré l'état de connaissance des matériaux bitumineux, notamment des matériaux de formulation (GBR, granulats vierges, émulsion de bitume, etc.).

La fabrication des ECF consiste en un mélange proportionné de granulats (vierges et GBR), d'émulsion de bitume, de ciment et d'eau principalement. Étant donné que l'ECF est une technique à froid, l'interaction entre les GBR et l'émulsion de bitume est délicate, car les GBR, déjà enrobés d'un liant vieilli, se mélangent difficilement avec le liant d'apport neuf (température ambiante n'aide pas le processus). De plus, le bitume est un matériau viscoélastique sensible à la température et à la fréquence du chargement (Carter, 2002; Corté et Di Benedetto, 2004a). Il joue un rôle important dans l'interaction des matériaux de formulation. L'utilisation des GBR dans les ECF n'est pas encore bien maitrisée. Peu d'études scientifiques sur la formulation d'ECF avec du GBR ont été effectuées sur ce thème (Robati, 2014b). La technologie de formulation des ECF classiques est promue au sein de *l'International Slurry Surfacing Association* (ISSA) sous l'appellation de *Microsurfacing*. Les normes d'Amérique du Nord ISSA et ASTM sont les plus pratiquées dans le monde. L'ISSA a élaboré la spécification A143 pour la fabrication des mélanges d'ECF. Tandis que l'ASTM a développé un guide pratique D6372 pour la conception des *Mix Design* d'ECF (ASTM, 1999). En Europe, malgré l'utilisation des ECF depuis 20 ans, la profession manque de méthodologies normalisées de caractérisation et de formulation. Les entreprises spécialisées dans le domaine s'appuyaient sur les essais développés et publiés par l'ISSA. Elles ont développé des critères ou des méthodologies plus spécifiquement adaptées à leurs besoins (Cuelho, Mokwa et Akin, 2006) .

En France, la norme de référence sur les ECF est la NF EN 12273 (01-10-2008). Il s'agit d'une norme de spécification qui précise les exigences de performance sur les matériaux de formulation des ECF ainsi que les procédures de contrôle relatives à la mise en œuvre des ECF. Un guide pratique sur les matériaux bitumineux coulés à froid est récemment apparu en France en septembre 2017, basé sur la version provisoire réalisée en 10/01/2013) (Brosseaud et al., 2013).

Les travaux de Robati (2014b) sur la formulation des ECF destinés à résoudre les problèmes de dégradation engendrés par l'orniérage des couches supérieures de la chaussée ont démontré que les ECF répondent aux besoins des utilisateurs et permettent une résistance aux différentes déformations permanentes. Il a été également prouvé que les ECF fabriqués avec des matériaux recyclés peuvent être formulés tout en respectant les critères de l'*International Slurry Surfacing Association* (ISSA).

Cependant, en continuité de ces travaux, plusieurs autres défis restent à relever, à savoir comprendre l'interaction entre les GBR et l'émulsion du bitume (même si la fabrication des ECF recyclés est réalisable), suivre l'évolution des enrobés coulés à froid dans le temps (hautes et basses températures), évaluer le comportement mécanique des ECF et chiffrer l'impact environnemental de cette technique de revêtement.

L'ECF est un matériau hétérogène, complexe et contient beaucoup de phases (ISSA, 2005e; Robati, 2014b) : une matrice viscoélastique composée d'un mélange de bitume et de filler, un squelette granulaire rigide et un faible pourcentage de vide non considéré dans les propriétés des ECF. La prédiction du comportement d'un tel mélange nécessite donc une maitrise de la microstructure et du comportement mécanique des différentes phases. Un des premiers aspects à maitriser dans le comportement des ECF est le caractère évolutif du liant du bitume (vieillissement dans le temps). La faible épaisseur des ECF peut faire en sorte que son comportement vis-à-vis du vieillissement thermique et à l'UV, et du gel-dégel soit différent du comportement des enrobés standard.

De plus, son apport structurel est peu probable, vu sa faible épaisseur. Cependant une vérification de l'impact structural peut être effectuée par des essais de module d'élasticité et des simulations sur Alizé-LCPC. L'ajout des GBR, dans la formulation des ECF, peut influencer le comportement du liant bitumineux du mélange, vu les caractéristiques altérées du bitume issu de ces derniers.

Il est nécessaire de déterminer les propriétés de l'ECF et les proportions optimales des différents composants pour obtenir les meilleurs résultats du point de vue mécanique (améliorer l'adhérence, durée de vie de la chaussée et meilleur comportement face aux déformations), économique (une solution d'entretien pas chère) et environnemental (une technique à froid donc économie d'énergie).

1.3 Questions de la recherche

De par sa position en couche de roulement de la chaussée et son épaisseur, la mince couche d'ECF subit directement l'agressivité du trafic routier et le climat (fluctuations de la température, rayons UV du soleil, pluie...). Plusieurs questions se posent concernant leur impact sur le comportement de la chaussée entretenue et l'évolution de ses performances dans le temps (au jeune âge et après un vieillissement donné).

L'autre volet important, dans cette thèse, est le recyclage des matériaux bitumineux qui représente une réponse logique aux défis environnementaux, permettant ainsi de réduire la consommation de matières premières non renouvelables à savoir les granulats et le liant bitumineux dans le cas d'un recyclage à chaud. Le recyclage à froid permet également une réduction de 10% des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour une fabrication d'un enrobé avec 50% de GBR (EAPA, 2008). Le recyclage des GBR dans la formulation des ECF conduit alors à d'autres interrogations. Ainsi, à la lumière de ces remarques, un grand nombre d'interrogations sont retenues à savoir :

Concernant la formulation de l'ECF avec les GBR :

- quel est le rôle du liant issu des GBR dans l'ECF? Participe-t-il en tant que liant bitumineux en se mélangeant avec le liant de l'émulsion ou est-il juste une interface entre le granulat du GBR et l'émulsion de bitume (notion de black rock) ?
- l'émulsion d'ajout doit-elle se faire avec un liant bitumineux spécifique ou nécessite une formulation spécifique?
- quelles méthodes d'évaluations de l'ECF recyclé peuvent être adoptées?

Des questions traitant de la performance des ECF vierges et recyclés sont également suscitées à savoir :

- quels sont les mécanismes d'évolution des performances des ECF vierges et des ECF recyclés le temps ?
- comment simuler ces évolutions dans le temps ? Quel est l'impact du vieillissement thermique, du vieillissement UV, du gel dégel et du trafic sur le comportement des ECF ?
- comment contribuer à quantifier l'empreinte environnementale de la technique des ECF ?

D'autre part, du fait que les ECF sont appliqués en faibles épaisseurs, il est nécessaire de savoir s'ils ont un impact structural sur la chaussée, ou s'il joue seulement un rôle d'imperméabilisant et de revêtement. Afin de mesurer cet impact, une étude de dimensionnement d'une chaussée revêtue d'ECF a été menée, ce qui passe par une détermination du comportement rhéologique de l'ECF.

1.4 Objectifs

1.4.1 Principaux objectifs

Le but principal de cette thèse est de mesurer la durabilité des ECF formulés avec du GBR par des simulations de la mise en service. Cette durabilité regroupe un ensemble d'objectifs spécifiques qui conduisent à une réflexion méthodologique dans l'étude des ECF formulés avec du GBR, car les spécifications de l'ISSA sont insuffisantes pour simuler/ évaluer cette durabilité. Les objectifs spécifiques sont :

- étudier le rôle du liant d'apport et du liant des GBR;
- étudier l'évolution des ECF en fonction des sollicitations climatiques (vieillissement thermique, et photochimique et cycles de gel-dégel);
- étudier le comportement des ECF vis-à-vis des sollicitations mécaniques ;
- quantifier les impacts environnementaux et évaluation des techniques.

Ces objectifs ont été détaillés ci-dessous (Figure 1.2).

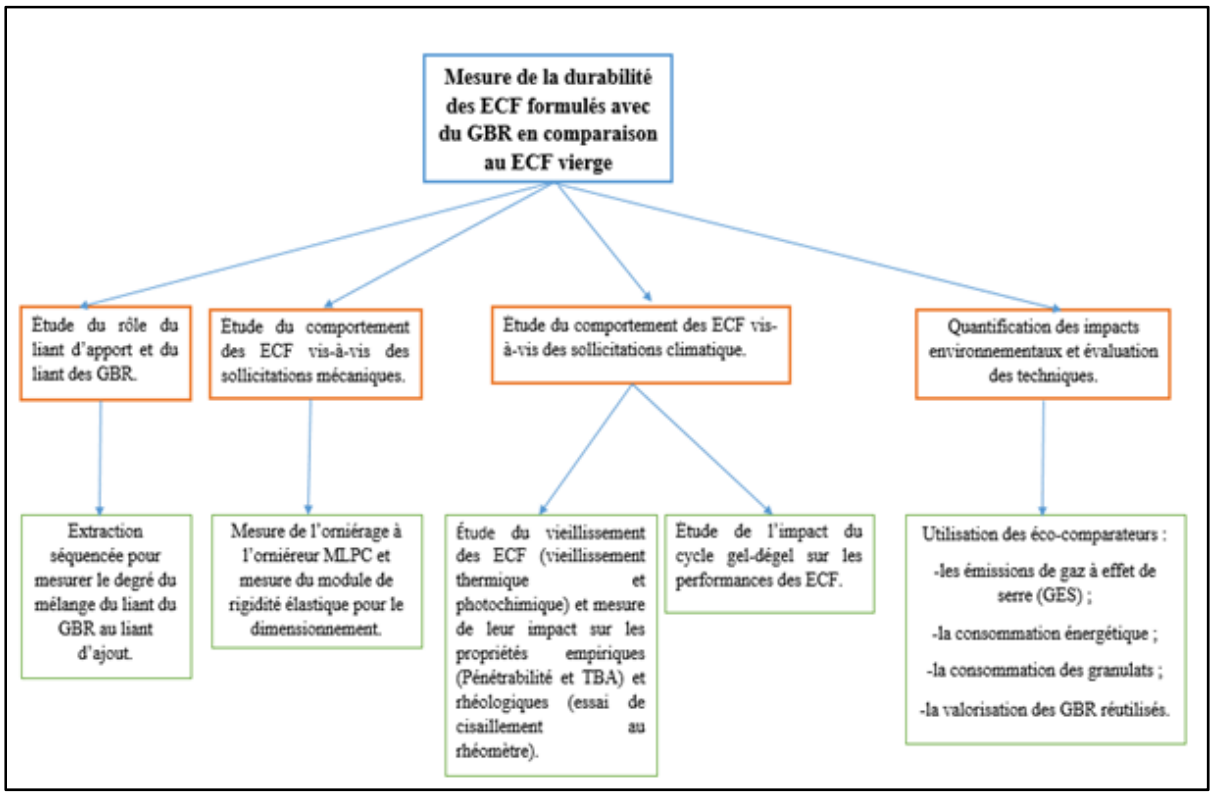


Figure 1.2 Logigramme présentant le déroulement des études en fonction de l'objectif principal et des objectifs spécifiques de cette thèse

1.4.2 Les objectifs spécifiques

Face à la diversité des matériaux utilisés (granulats vierges, GBR et émulsion de bitume) et aux différentes évolutions dues à leurs interactions, de nombreuses questions émergent et nécessitent d'être développées et étudiées. Les objectifs spécifiques de cette thèse sont détaillés dans les parties qui suivent.

1.4.2.1 Le rôle du liant d'apport et le rôle des granulats bitumineux recyclés (GBR)

Une problématique importante qui se pose au niveau du recyclage des matériaux bitumineux est de connaitre le degré de participation du liant provenant des GBR. Dans le cas des enrobés

formulés à chaud, le mélange entre le liant neuf et le liant recyclé est évident, même s'il a fait l'objet de nombreuses études et questionnements selon les températures et temps de mélanges (Navaro, 2011). Ceci est beaucoup moins évident pour des mélanges fabriqués à froid comme les ECF. En effet, initialement, lors du mélange entre émulsion et GBR, on peut supposer qu'une simple liaison entre les GBR recouverte d'une couche du liant vieilli et le liant neuf se crée (le liant de l'émulsion recouvre simplement le liant des GBR sans se mélanger). À long terme, sous l'effet des sollicitations, notamment thermiques, mais aussi mécaniques, un mélange entre les deux liants est-il possible ? Si ce mélange intime entre l'émulsion neuve d'ajout et le liant vieilli du GBR s'effectuait dans le temps, on pourrait envisager une réduction de la teneur en liant d'ajout, et ceci aura un impact sur la maitrise des coûts lors de la formulation des ECF recyclés. Dans une perspective d'étudier ces phénomènes, la méthode à utiliser consiste à identifier le liant d'apport et le liant vieilli et à analyser les différentes couches de liants bitumineux composant le liant présent dans le mélange. La méthode d'analyse envisagée est la réalisation d'extractions sur un même échantillon, de sorte que chaque liant obtenu par extraction représente une épaisseur donnée du bitume d'enrobage (Navaro, 2011). Cette méthode n'a jamais été appliquée sur les ECF, et une phase de calage est indispensable afin de définir les paramètres adaptés à l'étude.

Connaissant les caractéristiques du bitume d'apport, et après caractérisation des bitumes récupérés par séquences, la comparaison des résultats permet de savoir si le bitume du GBR se mélange ou pas. Dans le cas où le bitume du GBR se mélange avec le liant d'apport, le bitume du mélange sera homogène, donc tous les liants extraits ont les mêmes caractéristiques (voir Figure 1.3). Cependant, il demeure indispensable, si on essaye de connaitre l'évolution des mélanges dans le temps, de s'interroger sur la différence entre l'évolution du liant vieilli des GBR et l'évolution du liant de l'émulsion à long terme.

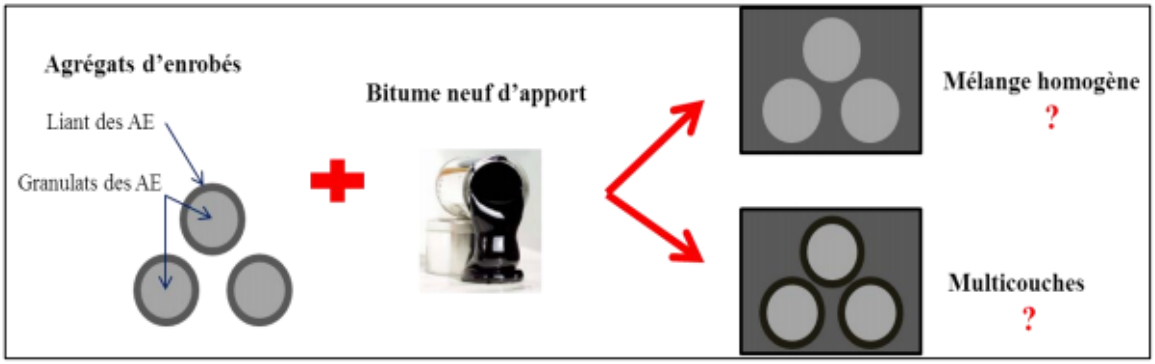


Figure 1.3 Représentation du phénomène de mélange des liants d'un enrobé recyclé

1.4.2.2 Les sollicitations climatiques

La chaussée est soumise à des phénomènes complexes dus aux agressions climatiques. Ces agressions comprennent l'ensemble des phénomènes métrologiques. Ainsi, on y observe température, vent, ensoleillement, pression d'air, pluie et précipitations (Lamothe, 2014).

Ces principaux facteurs qui engendrent la dégradation de la chaussée sont :

- le vieillissement du bitume (rigidité);
- la (succession) des cycles gel-dégel, pluie (infiltration d'eau, fissuration, désenrobage, nid de poule);
- l'apparition des contraintes et déformations au sein de la structure sollicitée dues aux dilatations-contractions engendrant la propagation des fissures (Corté et Di Benedetto, 2004a).

Le vieillissement des ECF (Vieillissement thermique et vieillissement photochimique)

Dans l'évolution des ECF, le mûrissement est une première étape qui consiste en un ensemble de processus physico-chimiques qui permettent l'évolution de l'émulsion et aboutissent jusqu'à la formation d'un film de liant autour des granulats. Le vieillissement est une deuxième étape et résulte d'une oxydation du liant bitumineux et d'une perte de matière volatile (Poirier,

Carbonneau et Henrat, 2002). Le mûrissement ainsi que le vieillissement caractérisent l'évolution d'un ECF.

Cette évolution qui est due au liant hydrocarboné, introduit pendant la phase de fabrication sous forme d'émulsion de bitume, peut être résumée à travers les différentes phases qui caractérisent son évolution (rupture de l'émulsion, montée en cohésion, stabilisation, mûrissement et vieillissement (Chen et al., 2016).

Le mûrissement est défini en trois étapes : une adsorption du liant à la surface des granulats suivie d'une coalescence des gouttes de bitume liée à l'évaporation d'eau et la formation enfin d'un film de liant (Ziyani, 2013b). Comme définit précédemment, le vieillissement, quant à lui, est lié au degré de modification de la structure chimique du bitume due à l'évaporation des fractions volatiles présentes dans le liant et à l'oxydation.

Il est à noter que toutes ces différentes étapes sont difficiles à prédire à cause de la complexité des phénomènes mis en cause (identification et isolation des différentes phases) et des techniques à l'échelle microscopique à utiliser, et jusque-là aucune information précise n'existe sur la durée de chaque stade de l'évolution de l'ECF (Bourrel et Verzaro, 1996; Lesueur et Potti, 2004).

Cette partie vise à évaluer les performances du liant extrait d'un ECF vierge et notamment formulé avec des GBR à différents stades de mûrissement, comparativement à celles du liant d'un ECF classique de référence.

Les essais sont réalisés suivant deux échelles :

- les ECF vierges qui ont servi de référence (phase de calage de la méthodologie d'essai);
- les ECF formulés avec des GBR.

La simulation du vieillissement thermique au laboratoire a permis de décrire les phénomènes d'altération réalisés sur site. Il est également incontournable d'étudier l'effet des rayons UV

sur le vieillissement chimique des ECF de par sa position en couche mince sur la surface des chaussées bitumineuses (Lebec, 2014). En effet, il a été démontré que les rayons UV ont un effet très prononcé sur la production de carbonyles (indicateur de vieillissement du liant bitumineux) et donc un accroissement de la vitesse d'oxydation (Mouillet et al., 2014; Mouillet et Dumas, 2008).

Les différents essais de simulation du vieillissement thermique et photochimique peuvent permettre en comparaison avec des vieillissements naturels sur site (carottes prélevées du chantier de Probinord), de développer un modèle de prédiction de l'évolution dans le temps des ECF en fonction du gain de module G*.

Étude du cycle gel dégel

L'étude de l'impact des cycles gel dégel est un volet important dans cette thèse, car elle concerne deux pays avec des hivers plus ou moins rudes. Sous l'effet du froid, la pénétration du gel s'effectue graduellement dans les sols en partant du haut vers le bas. Ce gel endommage la structure. Dans certaines conditions défavorables, l'eau contenue dans les sols non gelés peut être aspirée vers la zone de gel. Ce pompage de l'eau de la nappe phréatique engendre alors la formation de lentilles de glace qui se traduit par un soulèvement de la chaussée. Ainsi l'enrobé durcit, se fragilise et se contracte sous l'effet du froid. En rétrécissant sur de grandes longueurs, le revêtement est alors soumis à des efforts de tension produisant des fissures transversales (CCLEAR, 2015; Mauduit, Vulcano-Greullet et Coulon, 2007).

Afin d'étudier l'impact des cycles gel-dégel sur les chaussées revêtues d'ECF, des essais ont été effectués au laboratoire à l'échelle de :

- l'ECF vierge pris comme élément de comparaison pour la suite des essais ;
- l'ECF recyclé, et;
- les plaques d'enrobés à chaud revêtues d'ECF vierge et d'ECF recyclé.

L'étude de l'influence des cycles gel-dégel sur les couches de roulement protégées par l'ECF vise à évaluer le rôle protecteur ou non des couches d'ECF coulés sur la surface des chaussées.

1.4.2.3 Comportement des ECF vis-à-vis des sollicitations mécaniques

L'incorporation des GBR dans les ECF ne doit pas conduire à une moindre durabilité des chaussées revêtues dans le temps. L'évaluation de cette durabilité a été effectuée, à travers des essais d'orniérage sur des plaques d'enrobés à chaud revêtues d'ECF vierges et des ECF recyclés et des essais de module de rigidité élastiques, notamment sur les ECF vierges et ECF recyclés. La connaissance des modules de rigidité élastiques des ECF a permis d'étudier l'impact de celui-ci sur le dimensionnement des chaussées. En effet, si malgré sa faible épaisseur, l'ECF constituait un apport structurel sur la chaussée en plus de son rôle superficiel d'imperméabilisant, il peut avoir indirectement un impact sur la politique de gestion de la chaussée neuve. Les chaussées à faible trafic sont souvent dimensionnées avec un risque de calcul élevé et une durée de vie faible. Dans le cas où le maitre d'ouvrage planifiera l'entretien de sa chaussée avec de l'ECF, il pourra relever son risque de calcul. Selon la définition du guide du dimensionnement du LCPC de 1994, le risque de calcul de X% sur une période de p année pris par le dimensionnement de la chaussée c'est la probabilité qu'apparaissent au cours de ces p années des désordres qui impliqueraient des travaux de renforcement assimilables à une reconstruction de la chaussée, en l'absence de toute intervention d'entretien structurel dans l'intervalle. Ceci entrainerait une diminution des épaisseurs lors de la construction de la chaussée neuve.

1.4.2.4 Quantification des impacts environnementaux

Les plans de gestion des émissions et des déchets intègrent de plus en plus des orientations environnementales (CEV, 2009). L'évaluation des impacts environnementaux des différentes solutions techniques routières (ECF, enduits superficiels) contribue à la réalisation de projets d'infrastructures plus respectueux de l'environnement (Marmier, 2012).

Des comparaisons entre différentes techniques d'entretien à savoir l'ECF, le béton bitumineux très mince (BBTM) et le béton bitumineux mince (BBM) effectuées par des entreprises françaises ont permis de montrer qu'à priori l'ECF est beaucoup moins impactant que les enrobés bitumineux considérés, en l'occurrence le BBM et le BBTM (Vinci Autoroutes, 2016) (Vinci Autoroutes, 2016) . Cependant, la formulation d'ECF exige des matériaux de bonne qualité avec des granulométries bien ciblées, non systématiquement disponibles près du chantier et qui selon le cas de chantier (distance centrale-chantier), doivent être transportés. Ceci peut impacter le bilan énergétique des ECF.

Les Éco-comparateurs sont des outils qui permettent de quantifier, d'un point de vue environnemental des solutions techniquement équivalentes Ils ne permettent pas de calculer les impacts environnementaux d'un chantier de manière absolue. La comparaison du produit se fait par l'analyse de notamment quatre critères environnementaux retenus dans le cadre de la convention d'engagement volontaire signée avec le Ministère en charge de l'environnement en France et qui sont : les émissions de gaz à effet de serre (GES), la consommation énergétique, la consommation des granulats naturels ainsi que la valorisation des GBR (Cerema, 2016). L'outil utilisé s'appelle SEVE, Système d'Évaluation des Variantes Environnementales, développé en France et commun à la profession routière (bases de données harmonisées). Dans cette thèse, l'utilisation des GBR dans les mélanges d'ECF peut prendre toute sa dimension en chiffrant l'empreinte environnementale. En effet, l'utilisation des granulats recyclés contribue à une économie de matières premières et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre pendant la production des matériaux des nouvelles chaussées. Il a été confirmé que l'ajout de 20% de granulats recyclés dans la couche de liaison (technique à chaud) pour les routes canadiennes à fort trafic diminue les dépenses totales d'énergie primaire de 3,5 à 5% pour les chaussées rigides et de 5 à 7,5% pour les chaussées souples selon les estimations (MTQ, 2001).

Il apparait comme indispensable de travailler dans le sens de l'amélioration continue des conditions de construction des chaussées actuelles avec une réelle sensibilité des enjeux auxquels sont soumises les entreprises. La préoccupation et la prise en compte de l'environnement sont devenues la problématique au cœur de tous les sujets et de tous les

marchés. Cette thèse ne pourrait pas être envisagée sans confronter nos résultats obtenus aux normes légales dans un premier temps, puis de challenger nos analyses en envisageant ce qui serait idéal pour le marché. En plus de quoi, nous étions soumis à des normes et obligations parfois divergentes d'un pays à l'autre. Ainsi, l'intégration des impacts environnementaux dans cette thèse constitue une innovation tant par son aspect méconnu dans l'industrie routière que par le peu de littérature référence dans ce domaine. Ceci a permis d'optimiser la technique d'ECF au regard des indicateurs «émissions de gaz à effet de serre» et «consommation énergétique», ce qui s'inscrit dans le cadre du développement durable.

1.5 Organisation de la thèse

Cette thèse a été organisée selon trois principaux axes (Figure 1.4) :

- le premier volet a été dédié à l'étude thermique qui a permis d'évaluer le comportement des ECF vierges et avec GBR vis-à-vis du vieillissement thermique et photochimique ainsi que les cycles des gel-dégel ;
- le deuxième volet a été consacré à l'évaluation du comportement mécanique des ECF vierges et avec GBR à travers l'étude du phénomène d'orniérage et du module de rigidité ;
- le troisième volet a consisté en une étude environnementale des ECF vierges et avec GBR afin de quantifier l'impact de la technique sur l'environnement.

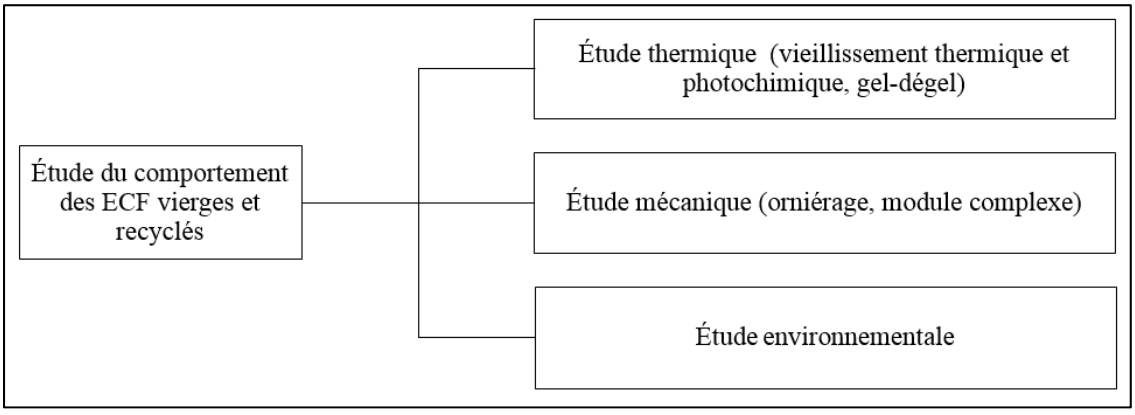


Figure 1.4 Structure de la thèse

Afin de valider ces différents travaux, un chantier expérimental avec des ECF 50% GBR a été réalisé en France et a permis de valider les résultats obtenus pendant la thèse.

CHAPITRE 2

ÉTUDE BILIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

La gestion d'un réseau routier permet de piloter les étapes indispensables pour son maintien à savoir le dimensionnement, l'entretien et la réhabilitation des chaussées. L'instauration d'une politique de gestion des chaussées nécessite une hiérarchisation du réseau routier qui permet une classification des routes en sous-ensembles homogènes des différents types d'allées (national, départemental, autoroute, communale, etc.). Ce classement prend son ampleur des analyses socio-économiques montrant l'important impact lié à chaque type de route. Les résultats obtenus suite à ces analyses socio-économiques permettent de définir les objectifs (exprimés selon les catégories de routes) compatibles aux besoins des usagers et aux contraintes imposées par l'environnement. Ces objectifs sont définis en termes de niveau de service. Ce dernier varie en fonction du temps. En effet, le niveau de service est fortement impacté par la dégradation de la route (baisse avec l'usure de la chaussée). Il est important également de souligner que le choix de la nature de chaussée à construire dépend des techniques d'entretien envisagées pour garantir le niveau de service visé au départ. Ceci conduit à définir une stratégie globale d'investissement et d'entretien ; la sélection de cette stratégie vise généralement à déterminer un optimum économique sous contrainte budgétaire (Meeddat, 2009).

Il existe plusieurs techniques d'entretien des chaussées. Dans ce chapitre, après avoir présenté les différents types de dégradation des chaussées ainsi que l'importance de leur entretien, nous développerons les techniques d'entretien préventif et plus précisément la technique des enrobés coulés à froid (ECF).

L'entretien d'une chaussée consiste en une succession de deux types d'interventions : une intervention réfléchie et définie à l'avance dite entretien préventif et une intervention

d'urgence sur une partie de l'ouvrage brutalement défectueuse et devenant dangereuse dite entretien courant (Paquin, 2009).

L'entretien des chaussées a pour objectif de maintenir leur capacité de répartition des charges supportées (aspect structure), mais aussi de permettre aux usagers de circuler sur une route sûre et confortable (aspect sécurité confort).

Pour que les objectifs de l'entretien des chaussées soient atteints, il faut qu'on ait des interventions d'urgences très rares, car celles-ci symbolisent l'échec de l'entretien préventif (Kicak et Ménard, 2009).

2.2 Entretien et préservation des chaussées

2.2.1 Dégradation de la chaussée

Les besoins de déplacement de l'homme jouent un rôle important sur l'évolution de l'état de la chaussée. Il existe alors les terrains naturels pour les déplacements à pied, les pistes revêtues destinées pour les passages fréquents de véhicules à vitesse relativement élevée, les chaussées souples revêtues pour les passages fréquents de véhicules à vitesse élevée et enfin les chaussées à structures traitées pour les trafics importants de véhicules légers, mais surtout les poids lourds devant circuler en toute saison, en tous lieux et en toute sécurité. C'est pourquoi la connaissance des causes probables de l'apparition d'une dégradation permet un meilleur diagnostic et un choix d'une solution plus adaptée à la situation.

En effet, ces différents types de structures de chaussées sont soumis à des phénomènes complexes tels que des phénomènes mécaniques, thermiques, physiques et chimiques qui apparaissent souvent de manière couplée. Une chaussée est dite dégradée, quand elle présente des défauts de diverses natures observables sur sa couche de surface, et qui empêchent la chaussée de répondre à l'usage pour laquelle elle a été construite. D'après les guides existants (LCPC, 1991; 1998), les dégradations les plus couramment rencontrées dans les chaussées à revêtement bitumineux se classent en dégradation structurelle et en dégradation superficielle.

Les dégradations structurelles sont généralement dues à un sol support défectueux (faible portance) et médiocrement protégé par la couche de la chaussée. Par ailleurs, les dégradations superficielles sont dues à des problèmes de formulation (excès de bitume), mauvaise exécution de joints lors de la construction ou encore polissage et arrachement des gravillons. Elles peuvent également apparaitre sous l'effet d'un trafic lourd ou le vieillissement du liant bitumineux.

En outre, ces dégradations sont réparties en quatre groupes ou familles (Egis, 2009; LCPC, 1998) qui sont :

- les déformations, qui sont des dépressions ou ondulations de la route qui prennent généralement naissance dans le corps de chaussée ou dans le sol support et qui se manifestent sur la couche de roulement. On les différencie suivant leur forme et leur localisation. Dans ce type de dégradations, on distingue : les affaissements, les ornières et les bourrelets;
- les arrachements, qui sont des phénomènes de rupture d'adhésion entre éléments ou parties de la route suivis généralement de leur disparition. Ce type de dégradations n'affecte que la couche de roulement au début de son apparition, mais peut s'aggraver en affectant les couches sous-jacentes au revêtement. On distingue les désordres suivants : le désenrobage, le plumage, le peignage, la pelade, l'indentation et le glaçage, les nids de poule, et les dentelles de rives;
- les fissurations, qui sont des fentes de degré plus ou moins important de la route qui affectent la couche de roulement et/ou même tout le corps de chaussée. On distinguera les fissures longitudinales, les fissures transversales et les faïençages (Fissuration en peau de crocodile);
- les mouvements des matériaux, ces dégradations sont caractérisées par la remontée du liant à la surface de la chaussée, par l'enfoncement de gravillons dans l'enrobé, les remontées des éléments fins à la surface, ou par l'éjection de l'eau à la surface lors du passage des véhicules lourds dû à l'existence de cavités sous la couche de surface. On y trouve le ressuage et les remontées de fines.

Rappelons tout d'abord les deux types de sollicitations, auxquelles sont soumises les couches de la chaussée:

Le trafic : Le passage successif des véhicules sur la chaussée engendre une fatigue générale de celle-ci. De ce point de vue, les poids lourds sont particulièrement agressifs: le passage d'un poids lourd de 13 tonnes a autant d'effet sur la structure de la chaussée que celui d'un million de véhicules de tourisme. Le frottement des pneumatiques sur la couche de roulement conduit également par usure à son vieillissement et à une perte d'adhérence. Les efforts tangentiels et transversaux notamment pour les chaussées des ronds-points giratoires peuvent donner lieu à des dégradations de la chaussée (CEBTP, 1984).

Les conditions climatiques : L'infiltration de l'eau de pluie dans la chaussée et le phénomène gel-dégel entraînent de nombreux désordres. De même, les variations de température accélèrent le vieillissement des bitumes, et celui des chaussées (CEBTP, 1984). En effet, le comportement de la chaussée est fortement dicté par le comportement des liants. À basses températures, le liant durcit et devient rigide entrainant l'apparition des dégradations de chaussée telles que les fissurations. À hautes températures, le bitume se ramollit ce qui engendre des phénomènes d'orniérage avec formation de bourrelets latéraux qui peuvent évoluer en fissuration ensuite en faïençage puis en arrachement et enfin en nid de poule, en absence d'entretien (Egis, 2009).

Selon le catalogue des dégradations des chaussées du LCPC (méthode d'essais LCPC N°52), l'évolution et la rapidité de ces dégradations qui apparaissent sont liées à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre (LCPC, 1998). Pour chaque famille nous présentons une dégradation définie par les catalogues de dégradations de chaussées (Egis, 2009).

Les déformations permanentes sont caractérisées par l'orniérage. L'orniérage peut être soit de petit ou de grand rayon. L'orniérage à petit rayon est une déformation directement sous les pneus des poids lourds qui est causé par un tassement du matériau bitumineux en surface. Les ornières à grands rayons sont causées par un tassement des matériaux dans la structure de la

chaussée. Cette déformation s'intensifie aux températures élevées, et constitue l'une des causes principales de dégradation des chaussées souples (Ali, 2006). La figure 2.1 illustre un exemple d'une chaussée atteinte d'orniérage.

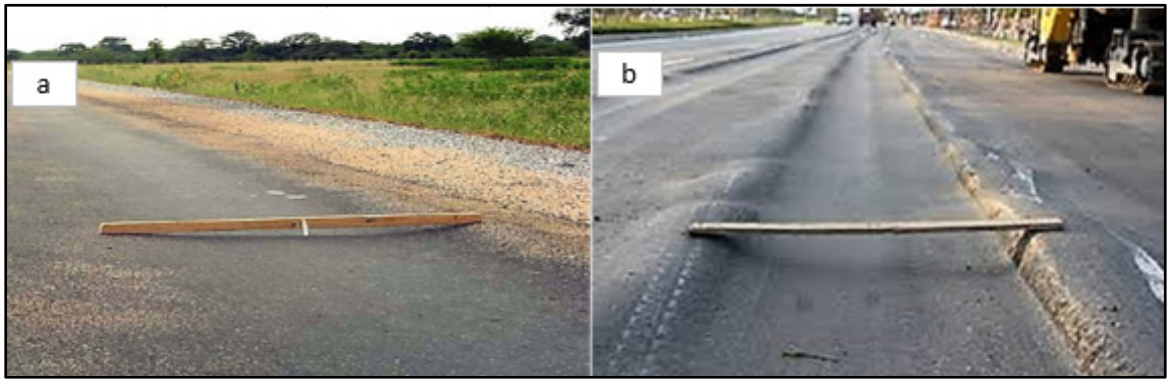


Figure 2.1 Exemples orniérage à grand rayon (a) Ornière à niveau de sévérité faible; (b) ornière à niveau de sévérité majeur (fluage)
Tirée de Egis (2009)

Les causes probables de ce type de dégradations (orniérage) diffèrent selon le type d'orniérage. Pour l'orniérage à petit rayon, les dégradations sont souvent liées à une déformation plastique des couches supérieures d'enrobés bitumineuses, à un compactage insuffisant lors de la réalisation, à des insuffisances du revêtement présentant un bitume mou ou surdosage, et un enrobé faible pour bien résister au trafic lourd. Cependant, dans le cas de l'orniérage à grand rayon, les tassements sont souvent issus d'un défaut de portance provoquant ainsi un effondrement de la chaussée, des conséquences des mauvaises absorptions des charges appliquées aux couches supérieures. Généralement, l'orniérage évolue vers un faïençage dans les ornières et la constitution de bourrelets, ou vers une augmentation de la profondeur. Les ornières sont parfois accompagnées de fissures qui sont d'autant plus ouvertes et donc engendrent la pénétration de l'eau dans le corps de la chaussée à travers ces fissures. Ceci est susceptible d'entrainer la destruction totale de la chaussée (Lo et Ndiaye, 2009).

Les principales techniques d'entretien sont le reprofilage dans les ornières avec des matériaux bitumineux (orniérage inférieur à 5 cm), ou le rechargement (orniérage supérieur à 5 cm). Le reprofilage, consiste à redonner à la chaussée un profil en travers correct (pour évacuer l'eau)

et un profil en long régulier (pour sécuriser et améliorer le confort des usagers), généralement par apport de matériaux. Le rechargement, consiste à ajouter à une chaussée existante une nouvelle couche d'enrobée bitumineux (rechargement simple) ou plusieurs couches d'enrobées bitumineux (rechargement lourd) (Lo et Ndiaye, 2009). Les enrobés coulés à froid, techniques d'entretien, sont également utilisés lors du reprofilage ou le rechargement sous réserve d'adaptation de la formule. Si les déformations sont inférieures à 10 mm, l'ECF peut être appliqué pour corriger ces défauts. Si les déformations sont comprises entre 10 et 20 mm, il peut y avoir recours à la technique des ECF appliqués en bicouches (correction des ornières au préalable). Mais dans ce cas, il faut adapter la formulation. Enfin, si les déformations dépassent les 20 mm, il faut tout d'abord faire un reprofilage à l'enrobé puis appliquer l'ECF en plusieurs couches (Lebec, 2014).

Les nids de poule sont caractérisés par une séparation localisée du revêtement sur toute son épaisseur formant des trous de forme généralement arrondie à la surface de la chaussée, au contour bien défini, de taille et de profondeur variables (Figure 2.2).



Figure 2.2 Nids de poule (a) nids de poule à niveau faible ;
(b) nids de poule à niveau majeur
Tirée de Egis (2009)

Les arrachements et le désenrobage sont souvent liés à une désintégration progressive d'une couche progressive du revêtement bitumineux de la surface due au délogement des granulats ou lorsque le lien entre les granulats et le liant s'affaiblit à la suite d'une mauvaise tenue à l'eau.

Les principales causes de l'apparition des nids de poule sont l'évolution de l'état de la chaussée par départ de matériaux dû aux fissures, faïençage ou d'un désenrobage. Ajoutons à ceci, les conditions climatiques (pluviométrie, gel et dégel), le trafic ou encore à une forte perméabilité de la couche de roulement qui ne peuvent qu'aggraver la situation.

Les nids de poule évoluent vers une augmentation en taille et en nombre des trous et vers la ruine totale de la chaussée entrainant ainsi des problèmes d'insécurité lors des conduites (STAC, 2007). C'est pourquoi les zones détruites doivent être traitées le plus rapidement possible. Le bouchage de nids de poule est la technique d'entretien courant qui consiste à rendre à la chaussée son état initial en rebouchant les nids de poule dès la constatation de leur apparition.

Les fissures longitudinales et transversales sont des ruptures apparaissant à la surface de la chaussée (Figure 2.3) (STAC, 2007). Selon le manuel d'identification des dégradations des chaussées souples, les fissures transversales sont caractérisées par des ruptures perpendiculaires à la direction de la route (souvent sur toute la largeur de la route) tandis que les fissures longitudinales sont des ruptures du revêtement parallèlement à la direction de la route et souvent situées dans les pistes des routes (les bandes).



Figure 2.3 Fissures (a) Fissure longitudinale ; (b) Fissure transversale
Tirée de Pavement Interactive (2016)

Les causes probables de ces types de dégradations dépendent de la nature des fissures. Pour les fissures transversales, les causes sont liées à une remontée en surface d'une fissure, retrait thermique, vieillissement et fragilisation après des travaux de resurfaçage ou encore remontée en surface d'un joint transversal de construction mal exécuté. Les fissures longitudinales sont dues à la fatigue de la structure suite à un excès de contrainte à la base des couches (ayant pour origine un sous-dimensionnement, un décollement entre les couches ou un trafic lourd), a un gonflement différentiel des couches dû au gel, ou encore à un mauvais drainage des couches granulaires de la chaussée ou d'une remontée de fissure des couches inférieures. Elles évoluent vers une formation de faïençage, une formation de nid de poule, et un agrandissement de la fissure. Il n'y a aucune technique d'entretien courant, mais seulement un pontage à chaud avec un mastic bitumineux ou une fermeture de la surface avec un enduit d'usure ou de scellement sur enduit superficiel (Brodeur et al., 2002).

Le ressuage est une remontée de bitume à la surface du revêtement, accentuée dans les traces de roues (STAC, 2007). La figure 2.4 illustre un exemple d'une chaussée atteinte de ressuage.



Figure 2.4 Ressuages (a) Ressuage à gravité faible ; (b) Ressuage à gravité majeure
Tirée de STAC (2007)

Les causes probables de ce type de dégradations sont liées à surdosage du bitume sur des emplois partiels à l'émulsion ou sur des enduits, un effet combiné de la température élevée du revêtement et des sollicitations du trafic, un excès de liant d'accrochage, une formulation d'enrobée inadaptée aux sollicitations (Vallon, 2010). Il évolue vers un arrachement de la couche de roulement par les véhicules par collage aux pneumatiques, ce qui altère l'adhérence conduisant à la pelade. Les techniques d'entretien courant consistent en une intervention d'urgence de gravillonnage au 4/6 ou 6/10, et à terme par le cloutage avec des granulats chauds, la pose d'enduit pré gravillonné et le fraisage superficiel (Vallon, 2010).

2.2.2 L'entretien des chaussées

Il semble judicieux de rappeler, tout d'abord les objectifs de l'entretien des chaussées. L'opération de préservation de la route consiste à réaliser des interventions préventives, curatives, palliatives ou d'urgence dont la mise en œuvre peut être décidée rapidement, afin d'assurer la sécurité des usagers.

Pour une route, les travaux d'entretien structurel vont être effectués continuellement pendant toute la durée de service. Les techniques ainsi que la fréquence des travaux dépendent

principalement du type de la structure de la route ainsi que du trafic (LCPC, 1998; Paquin, 2009).

Au fil des temps, tout réseau routier montre des signes de fatigue et de vieillissement. De plus, le climat rigoureux et le trafic intense font des chaussées des structures difficiles à entretenir. De ce fait, le développement d'une approche méthodologique performante pour l'entretien et la conservation des chaussées devient un caractère primordial pour les municipalités dans la gestion intégrée de leurs actifs municipaux. De nombreux critères sont à prendre en compte lors des entretiens des chaussées. Par exemple, le climat intervient dans le choix de la solution de prévention : en effet, le bitume ne doit pas se ramollir si la chaleur devient trop élevée ni se durcir si la température est trop basse. Pour conclure, l'entretien d'une chaussée regroupe l'ensemble des interventions nécessaires à son maintien dans un état initial le plus longtemps possible permettant la sécurité et le confort des usagers.

Il se structure essentiellement en trois types d'interventions (Carle, 2011):

- l'entretien préventif : consiste en stratégie planifiée par une politique de gestion du réseau routier visant à prolonger la durée de vie de la chaussée ;
- l'entretien curatif : regroupe l'ensemble des interventions ponctuelles qui permettent de corriger les dégradations afin de retrouver l'aspect initial de la chaussée ;
- l'entretien palliatif : destiné à des interventions visant à maintenir le revêtement de la chaussée dans un état acceptable, jusqu'à ce qu'on procède à une réhabilitation plus importante ou plus permanente. (stratégie de dépannage en attendant les interventions curatives).

C'est pour cela que, dans le but de préserver au mieux le patrimoine et dans un souci d'économie, le gestionnaire doit combiner l'entretien préventif, curatif et palliatif pour espérer de meilleurs résultats sur son réseau de chaussées (St-Marseille et Lapointe, 1997).

L'ECF, comme méthode d'entretien, est une technique pointue qui demande une très bonne maitrise et un réel savoir dans toutes les phases de conception et de réalisation. Cette technique d'entretien à froid a été décrite plus en détail dans les parties qui suivent.

2.3 Généralités sur les ECF

Les ECF sont avant tout des enrobés pour couche de surface, destinés à imperméabiliser les supports et à apporter une très bonne adhérence aux pneumatiques (NF P 98150-2). Ils sont constitués d'un mélange de granularité allant de 0/5 à 0/10 (granulats concassés sélectionnés), d'émulsion de bitume pur ou modifié, d'eau d'apport et d'additifs. Ils sont fabriqués in situ et répandus à l'avancement en couche très mince (entre 6 et 10 mm d'épaisseur) par une machine spécifique. Les ECF sont connu essentiellement en entretien de chaussée pour des faibles trafics (inférieur à 200 PL par jours) (Brosseaud, 2007), cependant, dans certains cas sont utilisés pour des trafics importants (Kucharek et al., 2010). En deux couches, ils peuvent corriger un léger orniérage d'usure du support (Figure 2.5). Apparue en Allemagne en 1978, la technique des ECF fut ensuite importée en France, où elle fait désormais partie des techniques couramment utilisées pour l'entretien des chaussées (Lebec, 2014). L'enrobé coulé à froid est une technique qui connaît depuis une quinzaine d'années, un développement certain. En effet, pendant la période 1997-2001, les surfaces appliquées en France sont passées de 11 millions de m² à 40 millions de m² en 2006 (SFERB, 2006a). Pour le Canada, la technique d'ECF connait un essor important depuis plusieurs années. Cependant, au Québec, son utilisation est plus récente et date des années 90 (Bitume Québec, 2014).

Si cette technique est actuellement en pleine expansion, il faut veiller à la préconiser dans des domaines d'emplois qui lui sont bien adaptés, à savoir :

- le renouvellement des caractéristiques de surface;
- l'étanchéité, notamment dans les traverses d'agglomération.



Figure 2.5 ECF sur route départementale
Tirée de SFERB (2006a)

Afin de mieux cerner les attentes de l'utilisation des ECF et leurs mécanismes d'évolution sur la chaussée, l'étude bibliographique est organisée selon deux axes. Dans un premier temps, elle traite de généralités les ECF, à savoir ses avantages, ses inconvénients, ses constituants et ses procédés de fabrication. Le deuxième axe traite du recyclage des GBR dans les ECF.

2.3.1 Composition des ECF

Un ECF est constitué d'un squelette granulaire, d'une émulsion de bitume et d'additifs qui permettent de réguler la rupture du matériau. La rupture proprement dite n'est pas une rupture mécanique, mais plutôt chimique. En effet le liant hydrocarboné est introduit pendant la phase de fabrication de l'ECF sous forme d'émulsion de bitume. Les constituants des ECF sont présentés dans la figure 2.6.

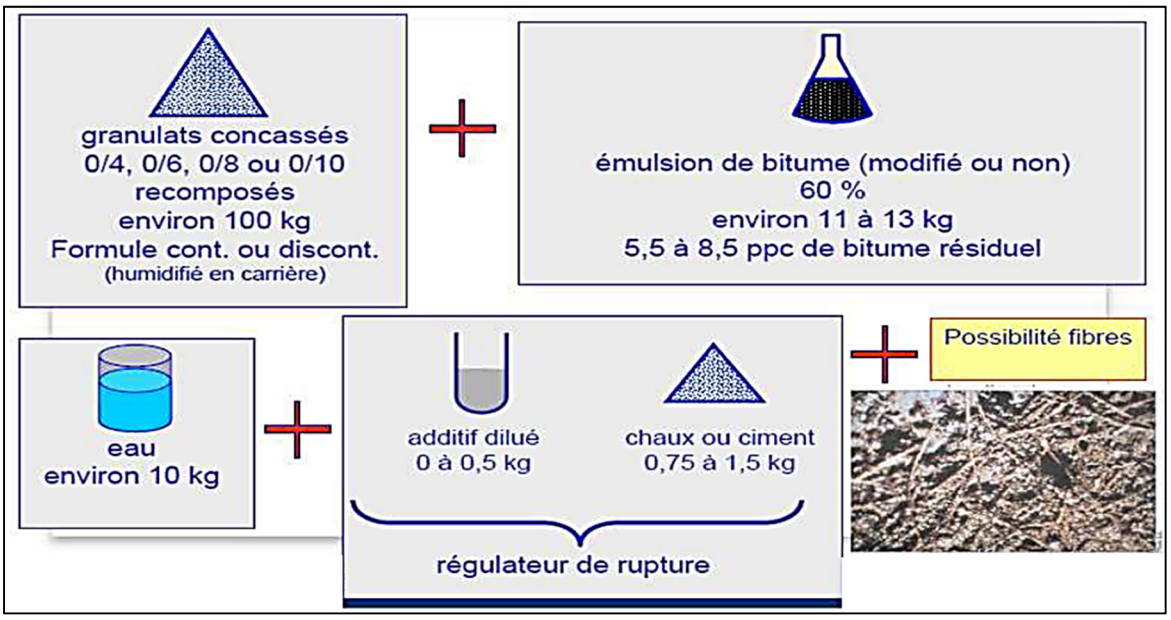


Figure 2.6 Constituants d'un ECF
Tirée de Lebec (2014)

Les granulats

Ils constituent 85 à 90 % en masse de l'ECF en fonction de la granulométrie et ont une très grande influence sur les performances de l'ECF. Les meilleures performances sont obtenues avec des granulats provenant de roches massives 100% concassées, propres et dotées de bonnes propriétés mécaniques. Ils sont spécifiés selon la norme NF EN 13043. Dans le cas des granulats pour ECF, essentiellement deux propriétés sont recherchées à savoir la résistance à l'usure (MDE) et la résistance au polissage accéléré (PSV) (Cf. tableau 2.2). Généralement, on utilise des granulométries continues (0/4, 0/6 ou 0/10). Les granulats sont humidifiés pour éviter la ségrégation lors du transport. La teneur en fines (particules fines) doit être la plus constante possible, car elle a une influence déterminante sur la vitesse de rupture de l'émulsion (Bertaud, 2007; Bitume Québec, 2014; Brosseaud et al., 2013; Lebec, 2014). Les fines jouent un double rôle dans un ECF. Elles diminuent la tendance à la ségrégation et augmentent ou réduisent la vitesse de rupture et la vitesse de prise. Elles augmentent également le module dynamique de l'enrobé résiduel (Hixon et Ooten, 1993; SFERB, 2006b).

Les émulsions de bitume

Par définition, une émulsion est un mélange de deux liquides non miscible (Lebec, 2012). Il s'agit d'une dispersion, sous forme de fines gouttelettes, de bitume (phase organique) dans l'eau (phase aqueuse continue) (Ziyani, 2013b). Elle présente l'avantage de pouvoir stocker, transporter et mettre en œuvre le bitume pratiquement à température ambiante. L'objectif final étant d'avoir une rupture de l'émulsion pour ne récupérer que le bitume sur la chaussée. Elle est par nature instable, l'ajout d'un émulsifiant (généralement un agent de surface cationique) permet sa stabilisation en abaissant la tension superficielle entre les deux phases. Ceci facilite la dispersion des gouttelettes de bitume et évite qu'elles ne s'agglomèrent (Figure 2.7) (Vallon, 2010).

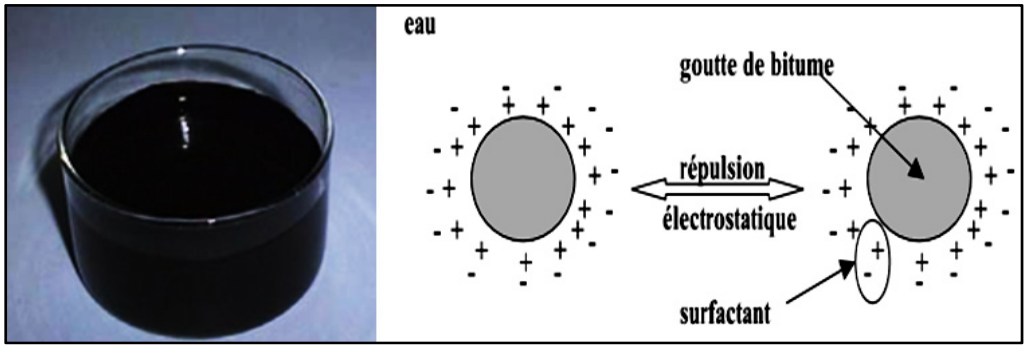


Figure 2.7 Émulsion de bitume - Stabilité d'une émulsion cationique de bitume
Tirée de (SFERB, 2006a)

Selon la Section des Fabricants des Émulsions Routières de Bitume, une émulsion bitumineuse doit répondre à certains critères (SFERB, 2006a) :

- la stabilité au stockage : la température de stockage de l'émulsion est entre 20 et 70°C. Selon sa formulation, la durée peut atteindre quelques semaines. Il faut que l'émulsion garde sa stabilité le long de son stockage ; les différents aspects d'instabilité sont la décantation par sédimentation, la floculation et la coalescence (Ziyani, 2013b);
- la rupture de l'émulsion : il ne s'agit pas d'une rupture mécanique, mais plutôt chimique (séparation entre l'eau et le bitume), quelque temps après la mise en œuvre, laissant ainsi le bitume résiduel (liant entre les granulats) en place ; la remontée du pH engendrée par la

réaction entre les acides présents dans l'émulsion et le granulat est le facteur responsable de cette rupture chimique (James, 2006);

- la viscosité : l'émulsion produite doit pouvoir être pompée et manipulée à sa température de stockage (40 à 60°C). Mais il faut également que cette viscosité soit conforme aux spécifications en vigueur et que son comportement à l'écoulement soit adapté aux conditions d'usage. L'émulsion doit être assez fluide pour permettre le pompage et l'épandage, mais être assez visqueuse pour ne pas s'écouler vers les bas-côtés ni dans les pentes. Elle varie essentiellement avec la température. En effet, plus le diamètre moyen des gouttes de bitume est faible, plus l'émulsion est visqueuse (Ziyani, 2013b).

Le plus souvent, pour répondre aux exigences de cohésion et de durabilité, les émulsions utilisées dans la plupart des formulations d'ECF sont des émulsions cationiques de bitume polymère. La teneur en liant résiduel de l'ECF est généralement comprise entre 5.5 et 9.5 % par rapport au poids des granulats secs (Lebec, 2014) (LEBEC, 2014). La teneur en bitume des émulsions est de 60 à 65 %. La vitesse de rupture de ces émulsions est contrôlée de façon à rompre au moment opportun après coulage de l'ECF, tout en maintenant une grande stabilité, indispensable au stockage et au transport. C'est la raison pour laquelle un régulateur de rupture (généralement un agent additif qui permet de maitriser le temps nécessaire pour la cohésion) est utilisé lorsque les conditions sont défavorables (température<20°C) (AI, 1995). La composition de ces émulsions est établie par chaque entreprise en fonction de la nature des granulats, du ou des émulsifiants, des objectifs spécifiques (enrobage convenable des granulats, délai de rupture et de remise sous circulation) (SFERB, 2006b).

Les régulateurs de rupture

La mise en œuvre des ECF implique de maîtriser, sur le site, la vitesse de rupture du mélange sur la chaussée. On utilise, à cet effet, un « retardateur » dont la fonction est d'augmenter le temps de rupture de l'émulsion d'une valeur suffisante pour autoriser la mise en œuvre (éviter une rupture intempestive dans le traîneau de répandage (Lebec, 2014). La quantité de retardateur varie généralement de 0 à 2 % par rapport à la quantité d'émulsion (Larpent et Tadros, 1991). Les règles de bonne pratique incitent à ajouter de faibles quantités de

retardateur, compte tenu de leur incidence négative sur la cohésion de l'ECF (ralentissent la montée en cohésion).

Fines spéciales (Ciment et Chaux)

On ajoute fréquemment du ciment ou de la chaux pour régler la vitesse de rupture de l'émulsion et pour compléter la granulométrie, mais en quantité limitée à 1% en général (parfois 2%, dans le cas du ciment), afin de ne pas rigidifier le mélange (Bertaud, 2007; Cyna, 2006) .

Fibres

L'ajout des fibres dans les mélanges d'ECF modifie la rhéologie et les caractéristiques de l'enrobé coulé à froid (élasticité, adhésivité et force de cohésion) , selon le Comité Français pour les techniques routières, il procure à court terme une bonne homogénéité à l'ECF ce qui permettra de mettre en place des formulations avec une granulométrie discontinue (technique utilisée dans des entreprises françaises) facilitant ainsi l'obtention d'une forte rugosité sans risque de ségrégation (car elles évitent la ségrégation et les coulures d'émulsion). L'apport des fibres offre également la possibilité d'augmenter le temps d'épandage, par une augmentation de la cohésion, sans craindre l'hétérogénéité du mélange et permet ainsi de diminuer le rejet. À long terme, l'introduction des fibres dans les mélanges d'ECF permet une grande souplesse de celui-ci, une fois durcis, car les fibres sont elles-mêmes très déformables. Elles améliorent aussi la résistance des mélanges d'ECF à l'usure. Il s'agit, en général, de fibres très fines, insensibles à l'acidité du milieu et capables de se disperser aisément dans le mélange, au moment de l'enrobage (Bertaud, 2007; Cyna, 2006; SFERB, 2006b). Peltonen (1991) a montré que le coefficient d'absorption de la fibre peut varier d'un type de fibre à un autre, principalement pour les fibres minérales qui ont une absorption beaucoup plus faible que les fibres de cellulose et les fibres synthétiques.

L'eau d'apport

Elle est nécessaire pour prémouiller les granulats et les fines d'apport afin d'éviter la ségrégation et de faciliter leur enrobage par l'émulsion. Cette eau aide à rendre l'enrobage encore plus facile, améliore l'adhésivité liant-granulat et régularise la rupture de l'émulsion. L'eau est le milieu de mélange des constituants de l'ECF. C'est le facteur le plus important quant à la consistance du mélange. Elle est introduite de trois façons complémentaires : en tant qu'humidité intrinsèque des granulats ou des GBR, en tant qu'eau de prémouillage et en tant que constituant de l'émulsion. A priori, on peut utiliser toute eau potable et le problème n'est pas tant celui de sa qualité que celui de la quantité présente dans l'ECF (Bertaud, 2007; Cyna, 2006; SFERB, 2006b).

Dans la perspective d'un nouveau chantier, l'opérateur après avoir choisi la granularité 0/4, 0/6 ou 0/10 (continue ou discontinue), doit sélectionner et associer les matières premières précédemment décrites pour atteindre deux objectifs bien distincts (Bertaud, 2007; Lebec, 2014):

- pouvoir fabriquer, mettre en œuvre un enrobé de qualité, ouvrir à la circulation le revêtement dans un délai compatible avec les contraintes d'exploitation de l'itinéraire, en tenant compte des conditions climatiques lors de la mise en œuvre ;
- obtenir de façon durable une qualité d'enrobage et les caractéristiques de la surface (macrotexture, adhérence, niveau sonore) requises pour le site considéré.

2.3.2 Méthodologie de formulation et validation des ECF

2.3.2.1 Comparaison des approches canadiennes et françaises

La technologie de formulation et de mise en œuvre est promue au sein de *l'International Slurry Surfacing Association* (ISSA) sous l'appellation de m*icrosurfacing*. Aux États-Unis, l'ISSA a instauré des essais normalisés qui permettent la validation des formules d'ECF. Depuis longtemps, les entreprises françaises ont utilisé par défaut la méthode de formulation de l'ISSA (ASTM, 1999; ISSA, 2005e) pour mettre au point leur ECF. Ceci est dû au manque des

méthodes de formulation adaptées à leur besoin. Cependant, avec les travaux du SFERB, cette tendance tend à disparaitre (Cyna, 2006; SFERB, 2006b). Cette absence de méthode de formulation n'affectait cependant pas les matériaux de formulation, car les normes de spécifications étaient présentes. En effet, la norme de référence sur les ECF est la NF EN 12273. Cette norme est spécifique, car repose principalement sur des critères évalués in situ à savoir une évaluation visuelle des défauts et macro texture (Tableau 2.1) et sur des caractéristiques de leurs constituants (cohésion du liant, résistance à l'usure des gravillons…).

Le tableau 2.1 présente les différentes classes de performances usuelles pour les caractéristiques des matériaux bitumineux coulés à froid et leurs constituants identifiés dans l'article 5 de la norme NF EN 12273.

Tableau 2.1 Classes de performances usuelles pour les caractéristiques des matériaux bitumineux coulés à froid et leurs constituants identifiées dans l'article 5 de la norme 12273 (2008)

		Classes de performance usuelles		
Caractéristiques (identifiées dans l'article 5.2-tableau 1 de la NF EN 12273)	**Méthode d'essai**	**ECF Classe A**	**ECF Classe B**	**ECF Classe C**
Évaluation visuelle des défauts (EVD)	NF EN 12274-8	EVDI	EVDI ou II	EVDI OU II ou III
	Classe définie selon codification du tableau n°2 ci-après.			
Macrotexture (mm)	NF EN 13036-1	≥ 1,0	≥ 0,8 ou ≥ 1,0	PND ou ≥ 0,4 ou ≥ 0,6
Bruit (macrotexture)	NF EN 13036-1	Valeur maximum déclarée		
Caractéristiques des granulats (NF EN 13043) -résistance à l'usure -résistance au polissage	NF EN 1097-1 NF EN 1097-8	MDE_{15} PSV_{50} ou PSV_{56}		MDE_{20} PSV_{50}
Granulométrie maximale (mm) (NF EN 13043)	NF EN 933-1	6 ou 8 ou 10	6 ou 8	4 ou 6
Cohésion du liant au mouton pendule (J/cm^2) (EN 13808 et EN 15322)	NF EN 13588	PND Ou ≥ 1,0 ou ≥ 1,2	PND Ou ≥ 0,7 ou ≥ 1.0	PND Ou ≥ 0,7

PND = performance non déterminée ; ECF = enrobé coulé à froid ; EVD= évaluation visuelle des défauts.

Le tableau 2.2 présente les différentes classes de performances d'Évaluation Visuelle de Défauts suivant la méthode d'essai NF EN 12274-8. Dans ce tableau, 3 classes de performances (EVDI, EVDII et EVDIII) caractérisées par l'observation visuelle du pourcentage de dégradations caractérisées à leur tour par 5 classes (P1, P2, P3, P4 et L) sur la chaussée sont représentées.

Tableau 2.2 Classes de performances d'Evaluation Visuelle de défauts suivant la méthode d'essai NF EN 12274-8 (2006)

Évaluation visuelle des défauts (EVD)	**Classes de performances**		
	EVDI	**EVDII**	**EVDIII**
P1. Ressuage, ressuage par poinçonnement et glaçage dans les bandes de roulement.	≤ 0,5 %	≤ 2 %	≤ 8 %
P2. Pelade, plumage, usure, défaut de recouvrement du joint longitudinal, orniérage ou glissement du revêtement.	≤ 0.5 %	≤ 2 %	≤ 8 %
P3. Tôle ondulée, bourrelet et bosse	≤ 0,5 %	≤ 2 %	≤ 8 %
P4. Groupes de petits défauts ou petits défauts répétitifs contenus dans pas plus de (n) rectangles.	≤ 1 % (2)	≤ 5 % (6)	≤ 20 % (20)
L. Rainures longitudinales (marques).	≤ 5m	≤ 10m	≤ 20m

EVD = estimation visuelle des dégradations en pourcentage

Compte tenu du fort intérêt économique et technique des ECF pour les maîtres d'ouvrages français dans une démarche d'entretien préventif de leur patrimoine routier, l'IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité) a publié en septembre 2017 un guide technique sur les ECF afin de compléter cette norme. Il définit les règles techniques et les démarches permettant d'assurer la réussite des revêtements avec ces matériaux, depuis le choix des constituants jusqu'à l'analyse des résultats. Des précisions sont notamment données en matière d'émulsion de bitume (IDRRIM, 2017).

Si le caractère « recyclé » des granulats utilisés dans la formulation des ECF n'est pas proscrit dans les normes et guide français, l'utilisation des GBR dans les ECF n'est pas à ce jour développée à notre connaissance. Peu de travaux scientifiques existent dans ce domaine. Sa normalisation est inexistante. En niveau de l'ISSA, les spécifications sur les ECF s'appuient plutôt sur des valeurs seuils recommandées sur des essais empiriques et de simulation évaluant certaines propriétés de l'ECF.

Ces principaux essais de formulation préconisés dans le cadre de la normalisation américaine (ASTM, 1999; ISSA, 2005e) sont présentés dans la partie qui suit. Ils sont indispensables pour vérifier certaines fonctions, comme la vitesse de montée en cohésion qui influe le délai de

réouverture sous trafic. Cependant, ces essais se pratiquent uniquement au jeune âge et restent insuffisants pour évaluer la durabilité des ECF sur site, sa tenue à l'eau, son impact structurel sur la chaussée. Par ailleurs aucune utilisation de matériaux recyclés type GBR n'est envisagée au niveau des spécifications ISSA.

2.3.2.2 Formulation des ECF

L'objectif de l'étape de formulation est de définir les natures et teneurs de chacun des différents constituants pour obtenir et assurer, au cours de la durée de vie de l'ouvrage, le maintien à un niveau satisfaisant de ses propriétés d'usage. En effet, formuler un ECF consiste à définir son squelette granulométrique (nature et proportion), la nature et teneur en émulsion de bitume, la teneur en eau et les additifs à utiliser en fonction des performances souhaitées. Au Québec, la formulation utilise les pratiques préconisées par l'ISSA. Certaines entreprises françaises pratiquent également les essais américains développés par l'International *Slurry Surfacing Association* (ISSA) , tels quels ou avec modification pour les rendre plus sévères et mieux prédictifs de conditions d'application difficiles (IDRRIM, 2017). Elles peuvent également développer leurs propres méthodes d'appréciation. Les méthodes décrites par les normes ISSA A 143 et ASTMD 6372 reposent essentiellement sur des essais technologiques. Cependant, comme précisé ci-dessus, ces essais ne s'appliquent que sur les ECF au jeune âge, aucune considération n'est observée sur l'évolution de l'ECF dans le temps, contrairement aux enrobés formulés à chaud qui prennent en compte ces considérations à travers des essais de simulation (orniérage) et des essais rhéologiques (module, fatigue).

2.3.2.3 Essai de la validation de la formulation

Avant de détailler les différents essais réalisés sur les ECF, il semble approprié d'expliquer quelques termes souvent employés (IDRRIM, 2017) :

- le temps de prise ou temps de fluidité exprimé en heure : durée entre le début de mélange des produits et la prise de l'ECF;
- le temps de rupture exprimé en minute : durée nécessaire pour que l'émulsion dans l'ECF soit totalement rompue ;

- le temps de monté cohésion exprimé en minute : durée nécessaire pour que la cohésion de l'ECF soit suffisante pour l'ouverture au trafic.

Essai de spécification de l'ISSA

Parmi ces essais ont peut citer :

- le *Modified cohesion test* ou Essai de cohésion-ISSA TB 139 (ISSA, 2005d). Cet essai permet de classer les enrobés coulés à froid comme étant des systèmes à prise lente ou rapide. Il consiste à réaliser des mesures de couple après différents temps de cure (30 min /60 min) à température ambiante (Figure 2.6) sur des galettes d'ECF. Les valeurs minimales requises pour cet essai sont de 12 Kg.cm pour un temps de cure de 30 minutes et 20 kg.cm pour un temps de cure de 60 minutes (ISSA). L'essai nous renseigne sur la vitesse de montée en cohésion des ECF après formulation (la teneur optimale en fines et l'effet des fines spéciales (ciment ou chaux) sur la cohésion du mélange en milieu humide). La norme européenne est NF EN 12274-4 ;

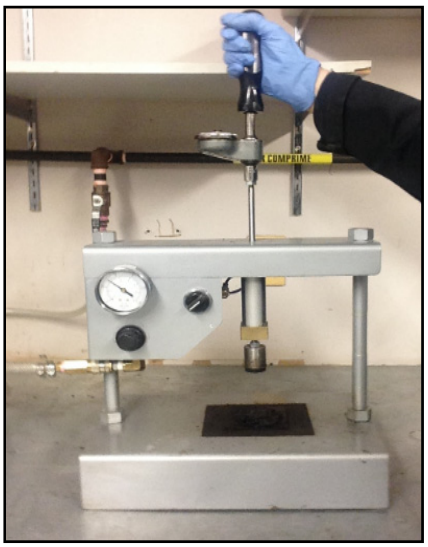


Figure 2.6 Essai de cohésion

- le *Wet Track Abrasion Test* ou Essai d'abrasion humide- ISSA TB 100 (ISSA, 2005c). L'essai consiste à déterminer le pourcentage de pertes des matériaux dans les mélanges

bitumineux dans des conditions d'abrasion humide. Le test est réalisé après avoir chauffé l'échantillon à 60°C pendant 24 heures. L'échantillon est immergé dans l'eau pendant une heure à la température ambiante (Figure 2.7). Une fois l'essai réalisé, l'échantillon est lavé et placé dans une enceinte à 60°C pour sécher. La différence de poids entre le nouveau poids et le poids mesuré avant la mise de l'échantillon dans l'eau correspond à la perte de la quantité du mélange à l'abrasion (ISSA);



Figure 2.7 Essai d'abrasion humide

- Le *Multilayer Loaded Wheel test Vertical and Lateral Displacement* ou Essai d'orniérage-ISSA TB 147 (ISSA, 2005b). L'essai d'orniérage, décrit par la norme ISSA TB 147 simule l'agression d'un pneumatique cisaillant le revêtement lors des changements de direction et des freinages, sur une plaque d'enrobée de 2 cm, de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles (aller et retour) de charges roulantes. C'est un moyen de définir la quantité minimale nécessaire du liant bitumineux pour prévenir les déformations en comparant les résultats de plusieurs échantillons contenant des pourcentages différents en teneur du liant bitumineux (Figure 2.8). La présentation de l'échantillon est identique pour les 3 essais de performances normalisés par l'ISSA. La seule différence est que l'échantillon est placé 24 heures dans l'étuve à 60°C puis 24 heures à température ambiante.1000 cycles sont réalisés avec un chargement de 56.7 kg (ISSA).

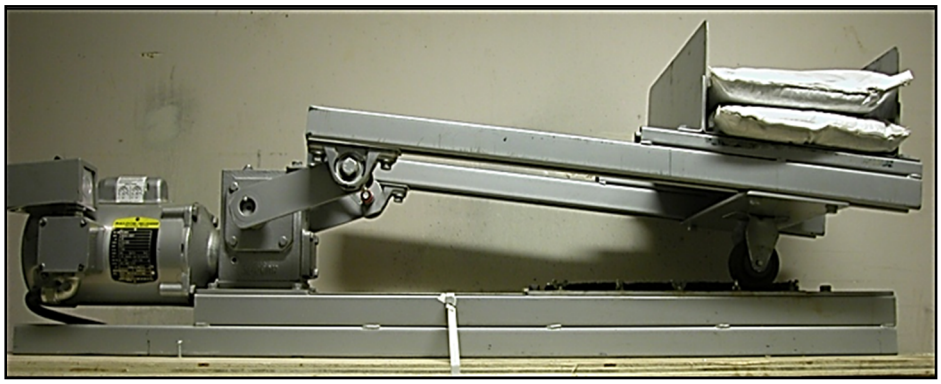


Figure 2.8 Essai d'orniérage

On distingue d'autres essais de spécification des ECF uniquement décrits par les normes européennes AFNOR. Parmi ces normes on peut citer :

- l'essai de Maniabilité au cône, (NF EN 12274-3). Il s'agit de la mesure de la maniabilité par l'étalement d'un tronc de cône d'ECF, selon un processus identique à l'essai au cône des bétons hydrauliques. Elle détermine la quantité d'eau nécessaire pour un mélange stable et facile à mettre en œuvre ;
- l'essai d'Abrasion par agitation, (NF EN 12274-7). Il s'agit d'un essai pour mesurer la compatibilité (l'aptitude à l'emploi) des granulats et les émulsions dans les ECF. Cet essai n'est pas pratiqué en France, seules l'Allemagne et l'Autriche l'utilisent comme essai de formulation ;

Il existe cependant des modes opératoires modifiés et autres méthodes développées par les entreprises, qui sont :

- l'essai HCT (*Hilt Cohésion Test*). Il s'agit d'un essai développé par Colas (non normalisé), qui permet d'évaluer la résistance à la traction et à la rupture par torsion des ECF. Des éprouvettes d'ECF sont fabriquées après avoir vérifié le temps de pris. Après un temps de cure déterminé, l'ECF est démoulé et positionné sur une surface plane, laissant la moitié de l'enrobé dans le vide et un contrepoids placé sur l'autre partie qui est fixe. On mesure alors le temps nécessaire à la cassure de la partie placée dans le vide (Figure 2.9). Le résultat est donné en secondes et représente la valeur de cohésion HCT après un temps de mûrissement défini, dans des conditions de température et d'hygrométrie maîtrisées. Plus

le temps est élevé plus l'ECF est résistant en flexion et donc plus la montée en cohésion est élevée (IDRRIM, 2017);

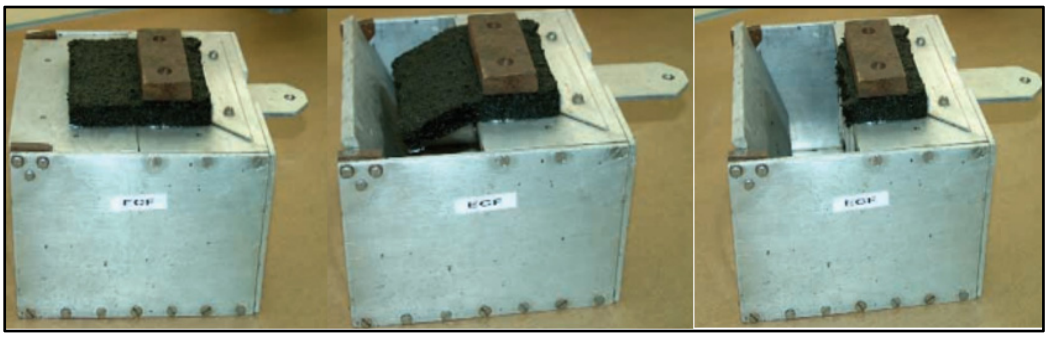


Figure 2.9 *Hilt Cohesion Test*- Mesure du temps de rupture d'une galette d'ECF

- l'essai de maniabilité et d'enrobage : Les entreprises françaises s'appuient beaucoup sur des modes internes de malaxage/enrobage avec des critères relatifs à des temps de maniabilité (appréciation « manuelle») qui ont été établis sur la base d'expériences en chantier (Cyna, 2006);
- l'essai TCS (*Test Cohésion Surface*) : Cet essai est inspiré de l'essai américain WTAT avec des modifications au niveau de la procédure de mûrissement ainsi que des modifications de matériel sur l'appareil d'usure WTAT. Il permet de mesure la perte de masse après un délai donné de maturation, dans des conditions de température et d'humidité relatives définies, d'une gamelle d'ECF immergée et soumise au passage de roues (Cyna, 2006).

2.3.3 Fabrication et mise en œuvre des ECF

La fabrication et la mise en œuvre des ECF sont effectuées simultanément à l'aide de machines mobiles, constituées d'une unité de fabrication montée sur châssis automoteur et d'un épandeur attelé. Ces machines comportent : le stockage des composantes (granulats, émulsion, eau, régulateur de rupture, additifs), leur dosage, leur malaxage, un traineau épandeur attelé à l'engin automoteur (Bordes, Guinard et Laurent, 1996; Menard et Charpentier, 2006).

On peut distinguer deux types de matériels (Lebec, 2014), voir Figure 2.10 :

- les machines traditionnelles à chargement discontinu ;
- les machines à chargement frontal.

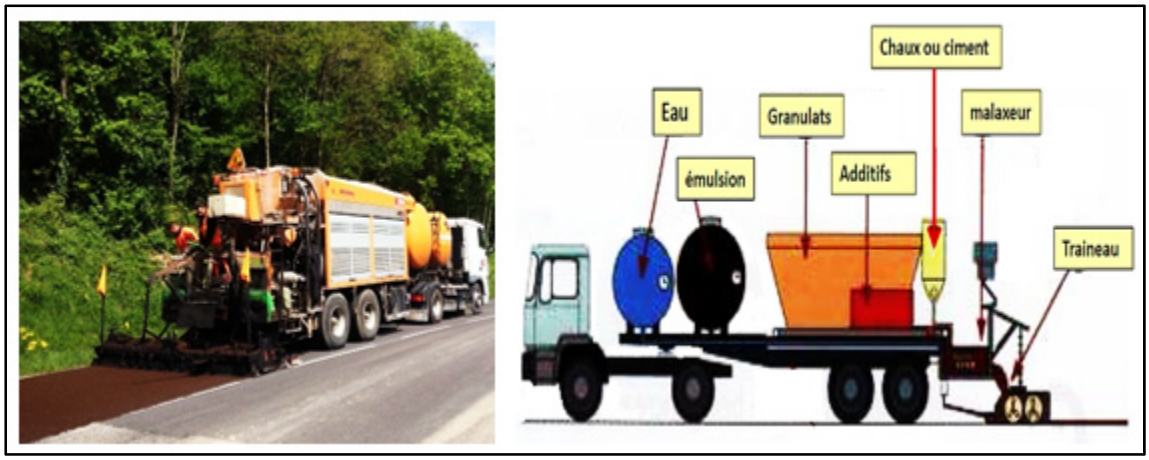


Figure 2.10 Application de l'ECF et composante d'une machine traditionnelle
Tirée de Bertaud (2007) et Probinord (2015)

2.3.4 Avantages et domaines d'emploi des ECF

Les ECF sont des techniques de surface qui apportent aux chaussées imperméabilité et adhérence. Compte tenu de leur faible épaisseur, ils ne peuvent en aucun cas résoudre les problèmes de structure (Lebec, 2014; Menard et Charpentier, 2006). Cependant, des études ont montré que appliqués en plusieurs couches, les ECF peuvent corriger les dégradations liées à l'orniérage (défaut à faibles rayons) (Robati, Carter et Perraton, 2014).

Les avantages des ECF sont :

- une technique à froid (moins d'énergie consommée, réduction des émissions des gaz à effet de serre);
- leur extrême minceur (c'est la technique d'enrobé la plus mince) ;
- un bruit de roulement modéré (confort acoustique moyen (77.3 dB) (Lebec, 2014);
- une moindre gêne à l'usage et aux riverains ;

- une absence presque totale de rejets de gravillons (comparé à la technique d'entretien d'enduit superficiel d'usure dit ESU) ;
- un bon compromis technico/économique ;
- peu de travaux préparatoires ;
- une ouverture sous trafic rapide (30 à 60 minutes).

Le domaine d'emploi de prédilection des ECF est l'entretien, préventif et curatif. La modulation de la granulométrie, la possibilité d'employer des liants modifiés, l'application en monocouche ou en bicouche permettent d'adapter la technique au trafic et aux supports. Les ECF peuvent être appliqués sur enrobé, y compris drainants, enduits, béton de ciment et pavés après dégarnissage (Brosseaud et al., 2013; Menard et Charpentier, 2006).

2.3.5 Comparaison des différentes techniques d'entretien à froid des chaussées

Au niveau des techniques d'entretien à froid des chaussées bitumineuses, les deux principaux matériaux utilisés sont les ECF et les enduits superficiels d'usure (ESU). Le tableau 2.3 montre une étude comparative entre les ESU et les ECF. L'analyse du tableau montre que les ESU sont plus adaptés que les ECF aux corrections des dégradations (orniérage, fatigue). Cependant les ECF restent des matériaux plus adaptés à la limitation des rejets de gravillons et peu à la projection d'eau. Il en découle que les ECF sont considérés comme une technique plus sécuritaire pour le confort des usagers. La technique des ECF est également plus adaptée aux zones urbaines et résiste mieux aux contraintes tangentielles. Dans la capacité de supporter le trafic routier, les deux méthodes se valent.

Tableau 2.3 Aide au choix des ESU et des ECF
Tiré de (Menard et Charpentier, 2006)

Objectifs visés	**ESU**	**ECF**	**Commentaires**
Amélioration de l'étanchéité	+ à ++	+	Approche de formulation
Amélioration de l'adhérence	+ à ++	+	Adaptation des granulats (PSV)
Réduction des projections d'eau	+	-	
Limitation du bruit	-- à -	- à +	**ESU** : granulométrie fine
Limitation des rejets de gravillons	-	+	**ESU** : Bonne maitrise de l'application
Site	**ESU**	**ECF**	**Commentaires**
Contraintes tangentielles	-	+	Ex : Carrefours et zones de freinage
Zones urbanisées	-	+	ECF : limitation du rejet des granulats
Rase campagne	++	++	
Zone ombragés	+	+	Adaptation à la formule d'ESU
Zones en pentes et/ou devers	- À +	+	Adaptation à la formule d'ESU et du liant
Trafic	**ESU**	**ECF**	**Commentaires**
Fort :> 300PL/jour/sens	+	+	
Moyen : 50 < PL/jour/sens < 300	++	++	
Faible : < 50 PL/jour/sens	++	++	
Trafic	**ESU**	**ECF**	**Commentaires**
Déformable	++	- à --	ECF : en fonction du niveau de déflexion
Ornières	+	+ si < 1cm -- si ≥ 1cm	Dans tous les cas l'ESU s'adaptera mieux que l'ECF
Hétérogène	-	+	
Ressuant	-	+	
Fissure de fatigue	+	-	
Légende : ++ très adapté ; + : adapté ; - peu adapté ; -- inadapté			

2.4 Recyclage des GBR dans les techniques routiers

2.4.1 Généralités sur le recyclage

Suite aux chocs pétroliers des années 1970, les prix du bitume explosèrent. C'est ainsi qu'eurent lieu les premiers chantiers de recyclage à chaud d'enrobés bitumineux afin d'optimiser les coûts de construction des chaussées. De nos jours, le recyclage des matériaux

doit répondre de plus en plus aux exigences du management du développement durable. Plusieurs pays règlementent, normalisent et cherchent de nouvelles voies afin de diminuer la quantité de matériaux réutilisables mise au rebut. Au Québec, le pourcentage de réutilisation des matériaux de construction dont les enrobés, augmente chaque année (AIPCR, 2003b; EAPA, 2008; info, 2009; Karlsson et Issacsson, 2006).

Selon des soudages effectués au Québec en 2006, près de 3 millions de tonnes de matériaux de construction (asphalte, béton, granulats) ont été recyclées lors des projets des constructions ou de rénovation (Ce chiffre a grimpé en 10 ans, il est passé de 875 000 tonnes à 3 millions). Près de 15% de la production annuelle des enrobés est basée sur l'enrobés recyclés (Profil de l'industrie de la chaussée souple au Québec) (Bitume Québec, 2010a).

En France, la signature d'une convention d'engagement volontaire de la profession routière avec des objectifs de recyclage a permis le développement de la pratique. Près de 6.5 millions de tonnes de GBR sont produites annuellement en France. Le taux de recyclage était de 23% en 2010 et s'est élevé à 60% en 2012.

Deux catégories de réutilisation d'anciens matériaux bitumineux sont distinguées à savoir le recyclage à froid appelé également retraitement et le recyclage à chaud. Ces deux méthodes sont divisées selon leur lieu d'intervention donc, soit « en place » signifiant une réalisation in situ sur le chantier même, ou soit « en centrale » lorsque les GBR sont transportés à la centrale d'enrobage. Grâce à cette gamme de procédés, le taux de recyclage de GBR dans le nouvel enrobé peut atteindre plus de 40% en centrale à chaud et 100% en place. Chaque procédé nécessite de l'équipement spécialisé selon les techniques appliquées (AIPCR, 2003b; EAPA, 2008; info, 2009; Karlsson et Issacsson, 2006).

Les quatre procédés de recyclage connus sont (Figure 2.11):

- le recyclage en place à froid aussi dénommé « retraitement en place à froid »;
- le recyclage en centrale à froid;
- le recyclage en place à chaud ou thermo-régénération;
- le recyclage en centrale à chaud.

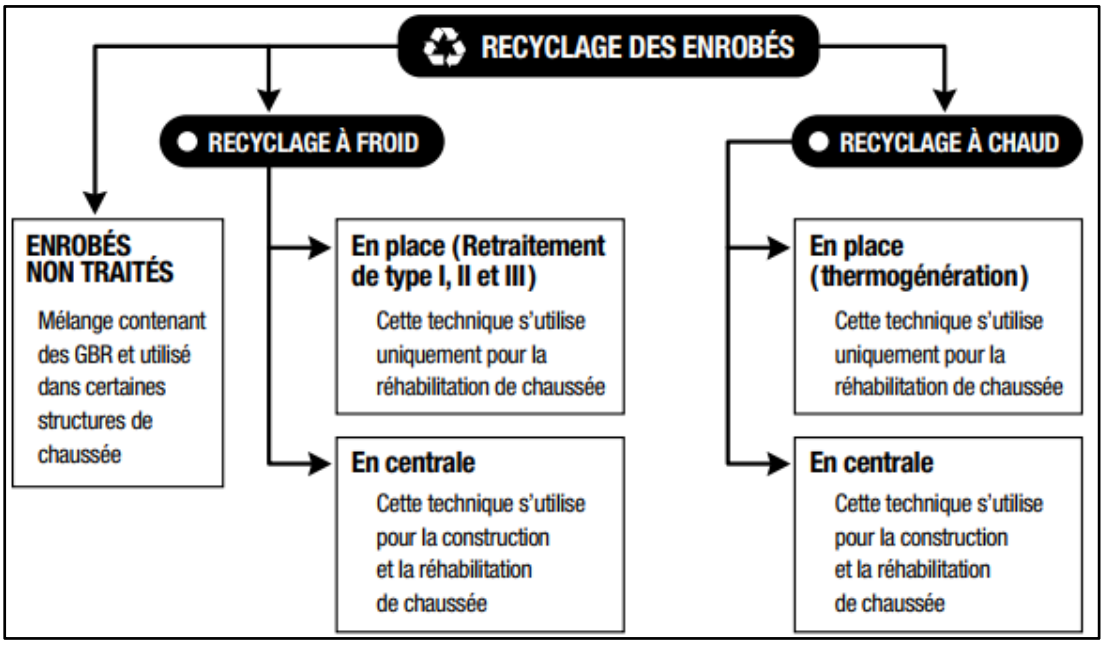


Figure 2.11 Schéma explicatif des différents procédés de recyclage des enrobés. Tirée de Bitume Québec (2010b)

Il est à noter que la technique de recyclage à chaud en place n'est plus actuellement utilisée en France, car demandant beaucoup d'énergie et générant beaucoup de fumée. À notre connaissance, le recyclage de GBR dans les ECF n'est pas à ce jour employé sur les chantiers. Très peu de travaux scientifiques existent dans ce domaine. Une étude récente effectuée au sein de l'École de technologie supérieure (ÉTS) a porté sur la formulation des enrobés coulés à froid destinés à résoudre les problèmes de dégradation engendrés par l'orniérage des couches supérieures de la chaussée. Il a été ainsi démontré la possibilité de formuler des enrobés coulés à froid avec des matériaux recyclés en respectant les critères de la *International Slurry Surfacing Association* (ISSA) (Robati, 2014a).

Plusieurs avantages ont été identifiés dans le recyclage des GBR. Ces avantages peuvent être de type environnemental, technique ou économique. Sur le plan environnemental, le recyclage des enrobés se traduit par une préservation des ressources naturelles non renouvelables (granulats, mais aussi éventuellement liant bitumineux notamment pour le recyclage à chaud), une diminution de la quantité de rebuts, une diminution des gaz à effet de serre (GES) et une économie sur les distances de transport (AIPCR, 2003b). Sur le plan technique, différents

avantages sont mis en avant selon la technique de recyclage utilisée. Pour le recyclage à chaud, selon l'AIPCR (AIPCR, 2003b), les avantages généralement rencontrés sont une amélioration de la résistance au désenrobage, une amélioration à l'essai de tenue à l'eau du mélange, un renforcement de la structure de la chaussée, une élimination des fissures existantes dans la chaussée, un ralentissement de la remontée de fissure dans le revêtement de surface et une prolongation de la durée de vie de la chaussée. Lors du recyclage à chaud des GBR, la rentabilité économique du recyclage des enrobés est reliée au taux d'utilisation des GBR, au coût actualisé des matériaux neufs, au coût de la mise en décharge de matériaux usés (évaluée en 2010 à environ 7 $ /tonne au Québec et jusqu'à 120 $ /tonne en Ontario) et au coût du procédé technique de recyclage utilisé (AIPCR, 2003b).

2.4.2 Notion de GBR

Les granulats bitumineux recyclés (GBR) appelés agrégats d'enrobés en France sont définis comme des « matériaux provenant du fraisage de couches de roulement en enrobé, de concassage de plaques d'enrobés, des déchets ou morceaux de plaques d'enrobé et des surplus de production d'enrobé », (NF EN 13108-8) (Figure 2.12). Leur utilisation comme matière première pour la fabrication d'enrobés trouve son origine au début du XXème siècle et connaît un développement en France à la suite des crises pétrolières des années 80. En effet, les différentes orientations politiques, sociétales et économiques ont poussé l'industrie routière à utiliser les matériaux des anciennes chaussées dans la fabrication des nouvelles chaussées (Chappat et Plaut, 1982; Imtiaz et Lovell, 1991).

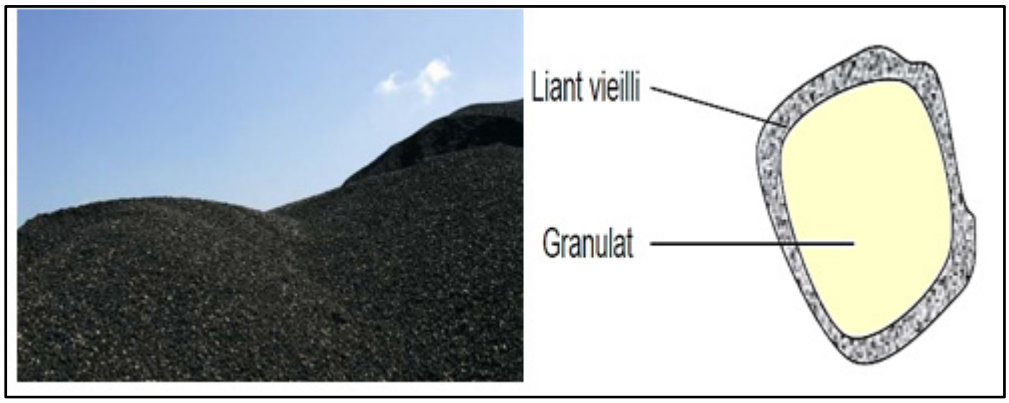


Figure 2.12 Granulats bitumineux recyclés GBR
Tirée de Eurovia (2013)

2.4.3 Domaine de réutilisation des GBR

Il existe d'ores et déjà de nombreuses techniques de réutilisation des GBR. Celles-ci se distinguent par la température à laquelle l'enrobé est produit. L'enrobé peut être produit à chaud c'est-à-dire à une température comprise entre 160°C et 180°C, et à froid, c'est-à-dire à une température ambiante. On distingue aussi les enrobés tièdes produits et mis en œuvre à des températures inférieures de 30 et 50°C par rapport à l'enrobé à chaud (USIRF, 2012).

Les deux grands domaines de réutilisation des GBR sont (Arzan, 2007):

- le recyclage à chaud en centrale d'enrobage : Les matériaux bitumineux usés (granulats bitumineux recyclés GBR) sont récupérés, stockés et renvoyés dans des centrales d'enrobage (sites de production des enrobés bitumineux). Ils sont éventuellement concassés et criblés. Un contrôle précis de ces matériaux permet leur classification. Le recyclage à chaud permet d'obtenir des produits d'aussi bonne qualité (ou presque) qu'avec les matériaux neufs. C'est pourquoi les GBR sont réutilisés pour les mêmes fonctions (AIPCR, 2003b). On peut construire de nouvelles couches bitumineuses à partir d'anciennes couches bitumineuses. On a recours au recyclage à chaud pour la construction et l'entretien des routes à fort trafic (autoroutes, nationales...) qui ont besoin d'être solides, durables et de bonne qualité ;

- le retraitement à froid à l'émulsion : Cette technique consiste à retraiter, en tout ou en partie, une chaussée avec de l'émulsion de bitume, ou avec un liant composé (liant mixte, émulsion de bitume + liant hydraulique), avec ou sans apport complémentaire de matériaux granulaires (Menard et Charpentier, 2006). Ce retraitement aboutit, selon le cas, à la réalisation d'une couche de base ou de liaison qui nécessite une couche de roulement adaptée aux conditions de trafic et de site : enduit, ECF, béton bitumineux, etc. La technique de retraitement à froid peut être réalisée en place comme en centrale, identique aux centrales de grave émulsion (Cyna, 2006). Certaines entreprises utilisent des liants d'apport (émulsion de bitume) mélangés avec un régénérant à la production, qui est un additif permettant de régénérer le bitume vieilli d'enrobage des GBR, pour ramollir tout en renouvelant ses propriétés initiales (Total, 2017).

2.4.4 Caractérisation des GBR

Les GBR sont des matériaux bitumineux obtenus par fraisage d'une ou de plusieurs couches bitumineuses d'anciennes chaussées revêtues d'enrobés bitumineux (ECF, ESU, bétons bitumineux, etc.). D'autres types de matériaux bitumineux sont utilisables comme les bardeaux d'asphalte connus sous le nom RAS (*Reclaimed Asphalt Shingle*), principalement au Canada et peu ou pas en France. Ce sont des matériaux utilisés pour les toitures, riches en bitume.

La granulométrie ainsi que les caractéristiques relatives au liant issu des GBR sont généralement les propriétés essentielles pour déterminer les propriétés des GBR. La détermination de la granulométrie des GBR sans liant se fait à l'aide d'une extraction par solvant. Cette étape consiste à séparer le liant et les granulats issus des GBR et à étudier le squelette granulaire des GBR lavés. Contrairement à la granulométrie et aux propriétés intrinsèques des granulats récupérés, les propriétés relatives au liant ne sont pas identiques à celles du bitume neuf (bitume initial de l'enrobé), cela est expliqué par un mécanisme de vieillissement du liant.

2.4.4.1 Propriétés des bitumes

Le bitume est considéré comme un mélange complexe de composés hydrocarbonés. Il est issu du traitement des pétroles bruts et représente la fraction la plus lourde de la distillation. Le bitume est constitué principalement d'un assemblage d'atomes de carbones et d'hydrogène. Le bitume est matériau connu pour sa susceptibilité thermique et cinétique. En effet, le bitume est dit un liquide newtonien (visqueux) au-dessus d'une température spécifique (généralement supérieure à 90°C) et se transforme en un solide élastique et fragile à basses températures. Entre ces deux états, le bitume est un considéré comme un matériau viscoélastique.

Tandis que la susceptibilité cinétique du bitume désigne le changement des propriétés du bitume en fonction temps de chargement. Le comportement à long terme et la résistance des matériaux bitumineux sont influencés par ces deux paramètres.

2.4.4.2 Effet de la température : vieillissement du bitume

Pour un enrobé bitumineux à chaud, dès l'étape de fabrication et de la mise en œuvre à des températures élevées entre 140°C et 160°C, le bitume subit un premier vieillissement. Ce dernier se poursuit sous l'effet du trafic et des conditions climatiques. Concernant les conditions climatiques, les principaux acteurs pouvant altérer les propriétés de l'enrobé en couche de roulement et donc le liant sont l'oxygène de l'air, les rayons UV (pour les revêtements en couche de roulement), l'eau et la température (EL-Beze, 2008). Il existe deux types de vieillissement, le vieillissement physique et le vieillissement chimique. Le vieillissement physique se traduit par une augmentation de la viscosité sans modification chimique des constituants.

Ceci est engendré par (EL-Beze, 2008; Tachon, 2008) :

- le durcissement du liant lors de son refroidissement après la mise en œuvre;
- l'apparition des fractions cristallines ;
- l'évaporation des fractions volatiles.

Le vieillissement chimique, quant à lui, se traduit par une modification de la composition chimique du bitume, i.e. une augmentation de la teneur en asphaltènes qui sont des composés de poids moléculaire très élevé et précipités dans le bitume et par la création de liaison carboxyles C=O et sulfoxydes S=O au sein du bitume.

Le vieillissement s'effectue en deux principales phases (Tachon, 2008):

- au cours de l'enrobage (étape de fabrication), lorsque les granulats chauffés sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant ;
- pendant la durée de vie de l'enrobé sur site, c'est le vieillissement à long terme. Il dépend de la région, de la température, de la durée de sollicitation et de sa position sur la chaussée.

Le vieillissement chimique d'un liant extrait des GBR, quant à lui, peut être évalué par la technique de spectroscopie infrarouge en observant les réponses des fonctions carbonyle et sulfoxyde présentes dans le liant vieilli (Dony et al., 2016).

2.4.4.3 Oxydation du bitume

Comme défini auparavant, de par sa nature organique, le bitume qui est composé d'hydrocarbures (majoritairement des hydrogènes et carbones) réagit avec l'oxygène de l'air. Cette réaction dite d'oxydation modifie la composition des molécules présentes, ce qui conduit à un durcissement du bitume. Ce durcissement conduit à la fragilisation de la chaussée. L'oxydation de bitume peut également avoir lieu à la raffermie. Lors de le l'interaction des molécules existantes dans le bitume avec l'oxygène de l'air, des sites polaires (liaisons non covalentes) apparaissent ce qui augmente la rigidité du bitume.

2.4.5 Rôle des liants présents dans une technique de recyclage

Un enrobé recyclé contient différents constituants qu'il est important de bien rappeler : un squelette granulaire neuf, un liant bitumineux d'apport, une proportion de GBR. Se posent alors classiquement la question du mélange des deux liants présents et leur rôle respectif dans

le nouveau enrobé. Lors d'un recyclage à chaud des GBR, le mélange entre le liant vieilli du GBR et le liant neuf semble évident compte tenu de la température élevée du procédé, en considérant un temps de mélange adapté. Mais, l'incorporation d'un pourcentage des GBR dans la formulation d'un enrobé à froid pose la problématique spécifique suivante: les deux bitumes (neuf et celui des GBR) se mélangent-ils au jeune âge puis dans le temps? Aucune information concernant l'enrobage à froid des granulats (monocouche homogène ou bien multicouches) ni concernant l'évolution au cours du temps de deux bitumes n'est révélée par la littérature.

Les travaux de Navaro (2011) ont conduit au développement d'une méthode permettant d'extraire de façon séquencée (extraction par couche) le bitume d'un enrobé recyclé à chaud ou tiède (Figure 2.13). Cet essai a permis de répondre à une problématique qui se pose au niveau du recyclage des matériaux bitumineux, qui est de savoir si le bitume d'enrobage des granulats bitumineux recyclés (GBR) se mélange au bitume du matériau final en fonction du temps de mélange et de la température de mélange (Navaro, 2011). Il est à noter que ce travail a été mené sur un enrobé fraichement fabriqué et pas après vieillissement dans le temps.

L'essai consiste à réaliser des extractions successives par solvant sur un même échantillon d'enrobé recyclé, de sorte que chaque liant obtenu par extraction représente une couche donnée du liant d'enrobage. Connaissant les caractéristiques du bitume d'apport et celle du GBR, et après caractérisation des différents bitumes récupérés par séquences, la comparaison des résultats permet de savoir si le bitume d'apport et celui du GBR se mélangent ou pas. Dans le cas où les liants se mélangent, le bitume final sera homogène, ce qui induit à des caractéristiques similaires pour tous les liants extraits (voir Figure 1.3 au chapitre 1).

Les conclusions établies par Navaro suite à cette technique d'extraction progressive appliquée à des fabrications d'enrobé à chaud ou tiède ont montré que le degré d'homogénéité du liant issu des GBR dépend des conditions de fabrication (température et durée de malaxage).

2.5 Conclusion

Les dégradations des chaussées sont actuellement une préoccupation majeure liées à des facteurs extérieurs et se traduisent par différents phénomènes. L'entretien est une solution qui garantir un meilleur état à la chaussée. Parmi les différentes possibilités d'entretien existantes, on cite la technique des ECF qui est une technique d'entretien de couche de surface de chaussée en pleine expansion dans le monde, présentant de multiples avantages. Cependant, bien que son application date de plus de 20 ans, il n'existe pas de méthodologies normalisées française ou américaine qui permettent d'évaluer le comportement du matériau à long terme. Tous les essais technologiques qui sont présentés auparavant sont applicables au jeune âge. Après ce tour d'horizon sur la technique des ECF, un grand nombre d'interrogations retiennent toujours l'attention. Ainsi, pour l'évolution du matériau dans le temps, il est important de connaitre sa cinétique et ses conséquences (affecte-t-elle le liant et les granulats ?). Il est aussi important d'identifier et de mettre en place les conditions de simulation du vieillissement accéléré et les méthodes de caractérisation applicables. Pour la formulation de l'ECF avec des GBR, il est utile de déterminer le rôle du liant du GBR dans l'ECF. Il est également important d'identifier le type d'émulsion d'ajout (spécifique ou classique) et les méthodes d'évaluations de l'ECF recyclé à adopter. Enfin, le recyclage à froid n'est pas aussi bien maitrisé que le recyclage à chaud. Toutes ces questions sont traitées dans la suite de cette thèse.

CHAPITRE 3

MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA FORMULATION DES ECF

3.1 Introduction

La fabrication des ECF nécessite la sélection des matériaux de formulation, mais aussi la mise en œuvre de celui-ci afin d'obtenir un produit performant sur chantier. Cette thèse a été effectuée entre deux pays (la France et le Canada) d'où l'emploi des matériaux de propriétés différentes.

Il parait donc indispensable de bien décrire les différents matériaux employés pour répondre à la problématique de cette thèse. À travers ce chapitre, les matériaux de formulation utilisés durant les essais ainsi que le procédé de laboratoire adopté pour la mise en œuvre des ECF sont décrits.

Deux types de GBR ont été utilisés dans cette thèse. Afin d'éviter toute confusion, les abréviations GBR-C et GBR-F seront affectées respectivement aux GBR canadiens et aux GBR français.

3.2 Matériaux employés pour les essais effectués au Canada

Les matériaux de formulation décrits dans cette partie proviennent des entreprises canadiennes, situées généralement au Québec. Un des objectifs de cette thèse a été de formuler un ECF avec des granulats bitumineux recyclés (GBR) aussi performant qu'un ECF classique (formulés avec des granulats vierges).

Pour ce faire, plusieurs matériaux de nature différente ont été testés afin de sélectionner ceux qui répondent au mieux aux critères désirés. L'origine de ces matériaux de formulation et leur composition, sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Matériaux utilisés pour formuler l'ECF pour les essais realisés au Québec - Canada

Matériaux	Provenance		Description
Granulats vierges	Carrière St-Isidore en banlieue de Montréal au Québec		0/5 continue, teneur en eau de 4,2%.
Granulats bitumineux recyclés (GBR-C)	Carrière St-Isidore en banlieue de Montréal au Québec		0/5 continue, teneur en eau de 1,3%, et une teneur en bitume de 5,0%.
Émulsion de bitume Cationique	Entreprise canadienne Mc Asphalt		Émulsion cationique CQS-1HP (*cationic quick set- hard bitumen with polymer*), contenant 60% de bitume (Annexe 1).
Émulsion de bitume Anionique	Entreprise canadienne Mc Asphalt		Émulsion anionique dite SS1 (*slow setting*) constituée de 60 % de bitume (ASTM, 2005)
Émulsion de bitume Cationique	Entreprise européenne		Émulsion européenne modifiée par polymère SBS (styrène-butadiène-styrène), à rupture lente constituée de 60 % de bitume de classe C60.
Ciment	CRH anciennement Holcim		Type GU
Dope d'adhésivité (nom commercial ADP1)	Probinord		n-suif propylène polyamines saponifiées à l'aide d'acide chlorhydrique et en dispersion à 10% dans la masse d'eau. Il a pour but de réguler la rupture de l'émulsion en jouant le rôle de retardateur.
Fibres	Probinord		Il s'agit de fibres de verre provenant d'un fournisseur de Probinord aux États-Unis. Ces fibres ont été utilisées dans les ECF recyclés à plus de 20 % (50 % et 100 %), afin d'améliorer la cohésion entre liant et granulats (Annexe 1).

Il est à noter que les granulats bitumineux recyclés (GBR-C) ont été séparés selon les différents tamis, puis la granulométrie a été recomposée afin d'assurer d'avoir une granulométrie constante pour chaque mélange. La granulométrie des GBR est établie avant extraction du bitume, car il est considéré que, puisque les essais sont faits sans apport de chaleur, les particules fines enrobées de bitume vieilli resteront sous forme de conglomérats.

Pour les essais d'orniérage effectués au Canada, les plaques d'enrobes à chaud servant de support sont des enrobés semi-grenus (ESG10) fabriqués avec 5,1% de bitume PG70-28. Leur densité est de 2,903 et leur teneur en vides est de 5%.

3.3 Matériaux employés pour les essais en France

Les matériaux décrits dans cette partie proviennent de l'entreprise partenaire PROBINORD spécialisée dans les techniques des ECF. Il s'agit de matériaux contrôlés, avec fiche technique à l'appui, ce qui a permis d'avoir toutes les informations concernant leur origine et composition (Annexe 1). Les matériaux sont classiques et identiques à ceux utilisés sur chantier. Les matériaux utilisés sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Matériaux utilisés pour formuler l'ECF pour les essais réalisés en France

Matériaux	Provenance	Description
Granulats vierges	Carrière Vignats (située en Normandie France)	nature grès quartzite granularité 0/6 continue, teneur en eau : 4,2%;
Granulats bitumineux recyclés **(GBR)**	Centrale Viame TP (située en Ile de France)	stock sélectionné et supposé homogène 0/6 continu teneur en eau: 1,3% teneur en bitume moyenne: 4,4 %;
Émulsion de bitume **Cationique**	Probinord	C60B5 cationique à rupture lente, à base de bitume pur de grade 70/100
Dope (nom commercial ADP1)	Probinord	Dope d'adhésivité à l'interface liant-granulats utilisé pour les enrobés coulés à froid en pré enrobage des GBR composés de n-suif propylène polyamines saponifiées à l'aide d'acide chlorhydrique de nature neutre. Régulateur de rupture en jouant le rôle de retardateur.
Ciment	Holcim	Ciment Portland noté CEM II 32,5 Rôle : fines permettant de réguler la rupture de l'émulsion.
Fibres	Probinord	Il s'agit de fibres de verre provenant d'un fournisseur de Probinord aux États-Unis. Ces fibres ont été utilisées dans les ECF recyclés à plus de 20% (50% et 100%), afin d'améliorer la cohésion entre liant et granulats.

La figure 3.1 présente l'ensemble des matériaux de formulation employés pour les essais réalisés au cours de cette thèse.

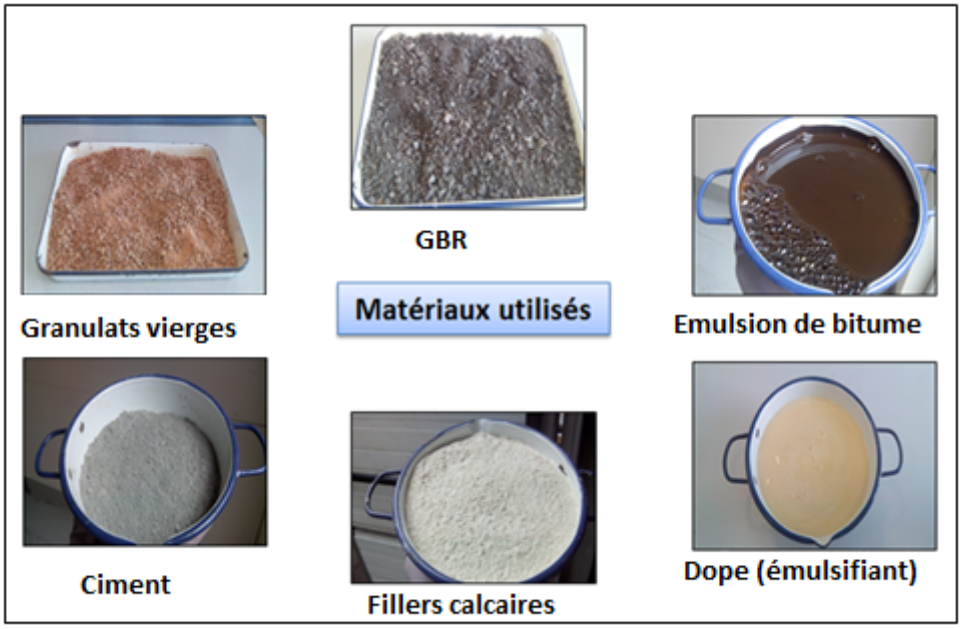


Figure 3.1 Récapitulatif des matériaux utilisés pour les essais

Concernant les enrobés à chaud utilisés au cours des essais réalisés en France, ils ont été fabriqués en centrale d'enrobage par Probinord. Une extraction récupération a été effectuée afin de vérifier leur teneur en bitume. Il s'agit d'un BBSG 10 pour couche de roulement fabriqué à partir d'un bitume de classe 35/50. La teneur en bitume des BBSG 10 est de 5,4%. La teneur en vide des BBSG 10 est variable et comprise entre 5 et 10% (les valeurs de teneur en vide dépendent des cas qu'on souhaite testés).

3.4 La fabrication des ECF en laboratoire

Les différentes étapes de fabrication des ECF utilisés dans le cadre de cette recherche en laboratoire autant en France qu'au Canada sont harmonisées et décrites ci-dessous :

- pré-mouillage des granulats (vierge et GBR) dans une gamelle pour obtenir la teneur en eau initiale et repos pendant 30 minutes à l'air libre et à température ambiante, pour avoir un mélange homogène, ajout de fibres avec les granulats dans le cas des ECF recyclés;

- parallèlement à cette étape, mélange manuellement pendant environ 5 minutes dans un récipient de l'émulsion, de l'eau d'apport et du dope;
- une fois les 30 minutes écoulées, ajout du ciment dans le sable et malaxage manuel rapide pour éviter une prise du ciment;
- ajout du sable prémouillé + ciment dans le récipient contenant l'émulsion, l'eau et la dope; malaxage manuel pendant 40 secondes, et coulage dans une gamelle propre ou sur le support approprié pour chaque essai.

Un même référentiel de spécification a été utilisé pour la validation des formulations des ECF vierges et des ECF avec GBR. Une fois l'ECF coulé, l'émulsion doit rompre à peu près en 10 secondes (± 2 secondes). Cette vérification est visuelle à travers l'apparition de gouttelettes d'eau à la surface. Après 5 minutes, nous pouvons valider la formulation en observant la couleur de l'eau évacuée de l'ECF pendant la rupture. Si l'eau est claire, cela signifie que le dosage est bon ; si elle est de couleur marron, il y'a trop de dope. Dans ce cas, la procédure décrite précédemment est reprise en réduisant la quantité de dope.

Cette étape de formulation ont été mises au point par Probinord :

- les 40 secondes de malaxage manuel, représentent le temps que prend la machine sur chantier pour fabriquer l'ECF (mélange des différents constituants, et malaxage) et l'application sur la chaussée ;
- les 11 secondes représentent le temps nécessaire pour régler la surface de l'ECF juste après l'application (passage de la machine). Cette procédure de fabrication tend à se rapprocher le plus possible des réalités du chantier.

Les formulations utilisées dans cette thèse sont détaillées dans l'Annexe 1.

3.4.1 Correction de la granulométrie pour recycler

La première étape incontournable de la formulation des enrobés bitumineux (que ce soit à chaud ou à froid) selon l'approche empirique encore en usage dans plusieurs pays, est le choix

des fractions granulaires de sorte que la courbe granulométrique du mélange s'insère dans un fuseau de référence. L'incorporation des GBR doit tenir compte de cette exigence.

Avant de réaliser la granulométrie des GBR-C et GBR-F, ces derniers ont été lavés afin d'enlever la poussière, puis séchage à 40°C (pour évacuer l'eau) jusqu'à masse constante sans oxydation.

Pour les essais réalisés au Québec, le fuseau de référence que nous avons retenu pour les ECF vierges est conforme aux normes de l'ISSA et présenté sur la figure 3.2.

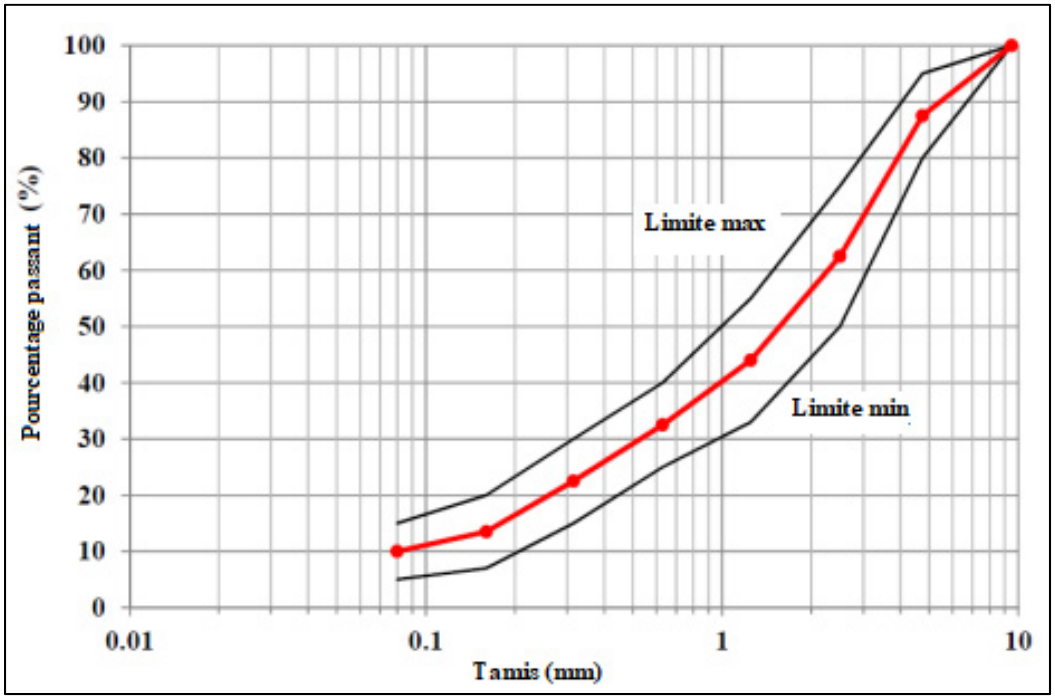


Figure 3.2 Courbes granulométriques pour les ECF- pourcentage de passant en fonction du diamètre des granulats. Limites selon exigences ISSA

La figure 3.3 représente la courbe granulométrique pour les GBR-C.

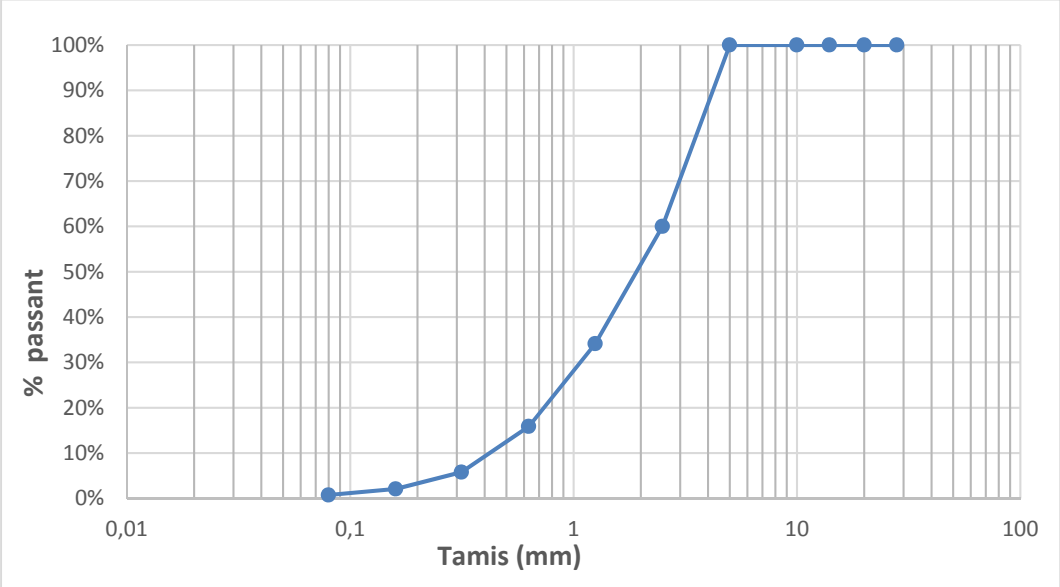


Figure 3.3 Courbes granulométriques des GBR –C (0-5mm)

Concernant les essais effectués en France, la courbe granulométrie de référence utilisée est présentée sur la figure 3.4.

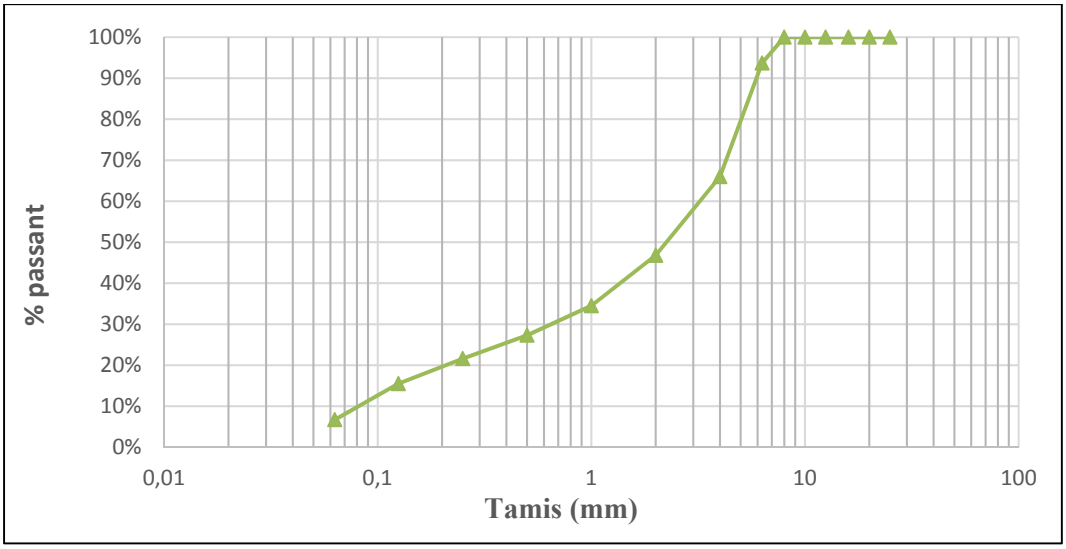


Figure 3.4 Courbes granulométriques des granulats vierges

La correction granulaire lors de la formulation avec des GBR a pour principe l'ajout de granulats neufs pour obtenir une granulométrie comparable à celle d'un enrobé neuf (Delorme, 2007). Dans notre cas, nous avons constaté que la proportion en fines des GBR non désenrobés est très faible contrairement au granulat vierge (Figure 3.4). Il était donc nécessaire de corriger la courbe granulométrique du mélange recomposé (granulat vierge + GBR) de sorte qu'elle se rapproche le plus de la courbe granulométrique des granulats vierges, qui est notre courbe de référence. Pour cela, il a été nécessaire d'ajouter des fines calcaires, dont la proportion varie en fonction du pourcentage de recyclé incorporé dans l'ECF (Figure 3.5 à 3.7).

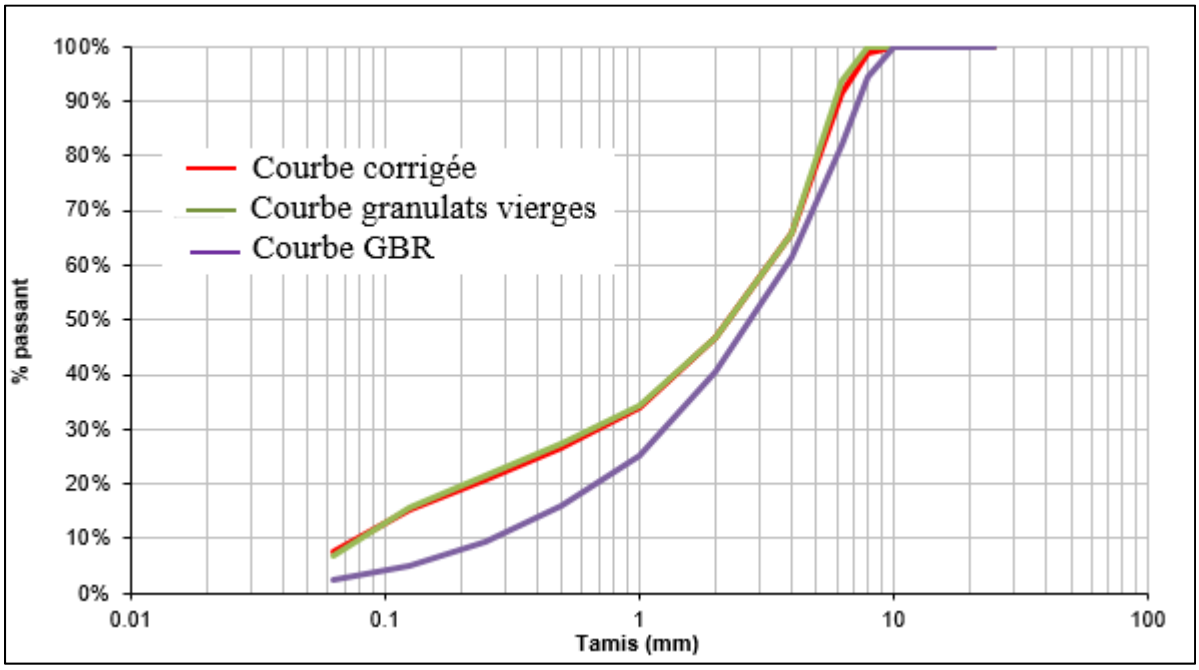


Figure 3.5 Courbes granulométrique pour ECF avec 20% de GBR, ainsi que les courbes pour le granulat vierge et le GBR

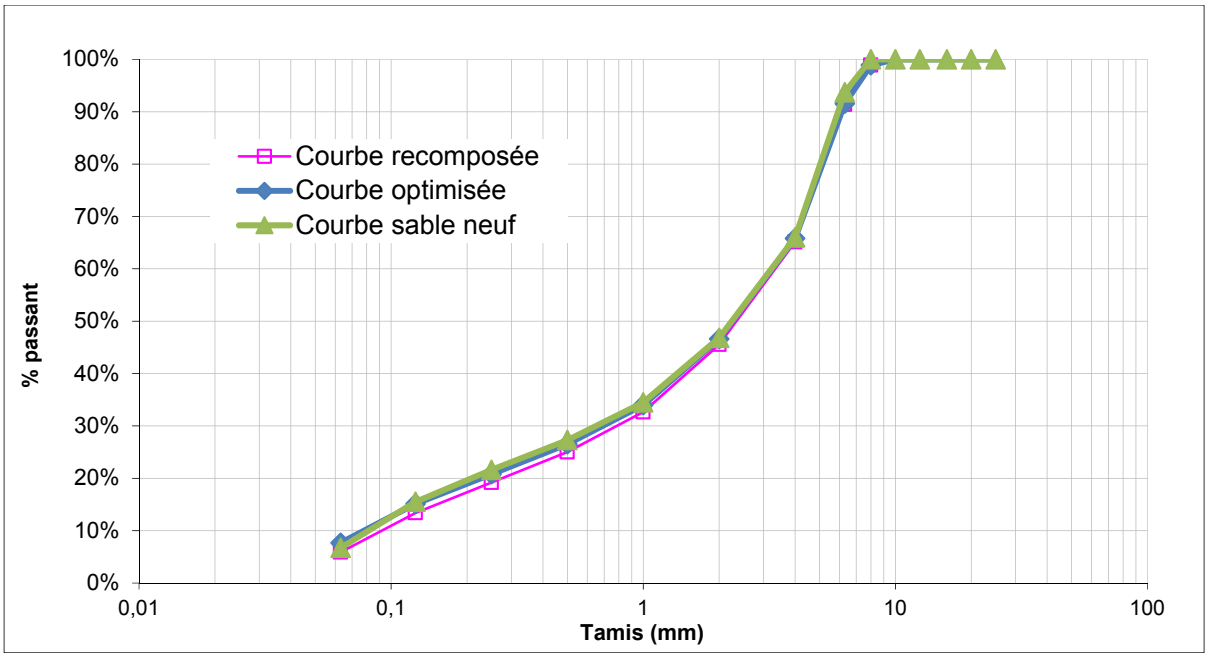


Figure 3.6 Courbes granulométrique pour ECF avec 50% de GBR, ainsi que les courbes pour le granulat vierge et le GBR

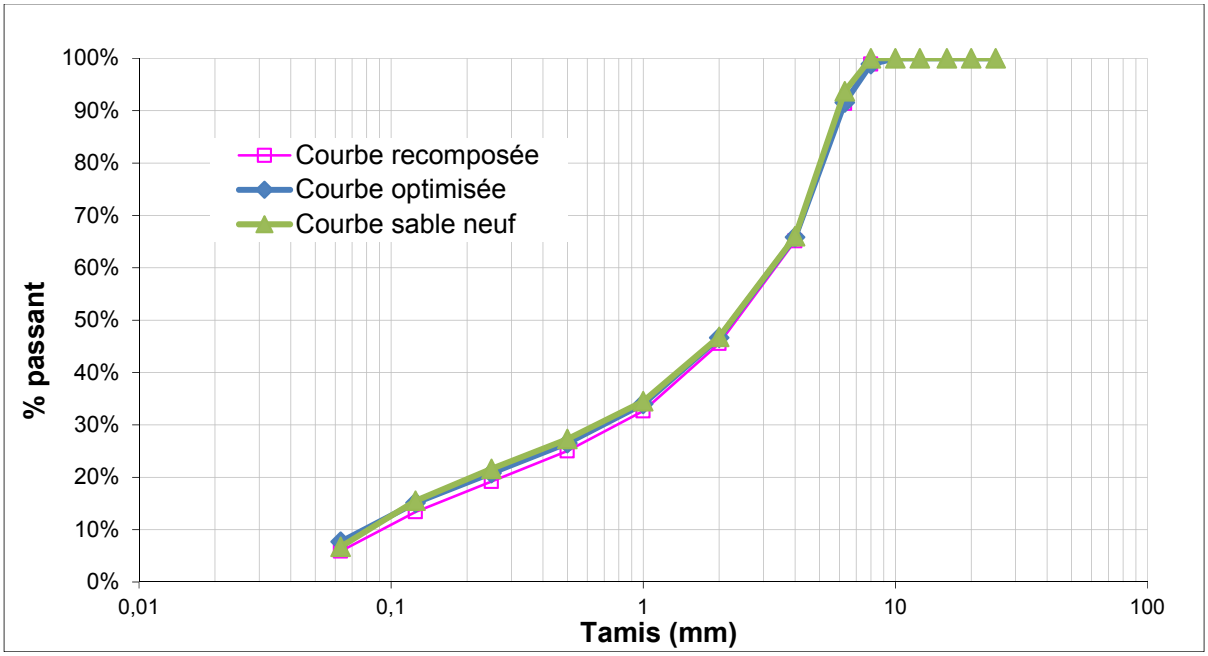


Figure 3.7 Courbes granulométrique pour ECF composé de 100% de GBR, ainsi que les courbes pour le granulat vierge et le GBR

3.4.2 Essais réalisés sur les ECF

Dans cette partie, la liste des essais réalisés pour valider les formulations des ECF est rappelée. Ainsi, pour les essais de spécification de l'ISSA, nous avons :

- l'essai de cohésion - ISSA TB 139 (ISSA, 2005d);
- l'essai d'abrasion humide - ISSA TB 100 (ISSA, 2005c);
- l'essai fluage (orniérage) - ISSA TB 147 (ISSA, 2005b).

Les formules ont été également validées selon l'essai HCT (*Hilt cohesion test)* développé par Colas (IDRRIM, 2017). Tous ces essais sont détaillés dans le chapitre 2.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de regrouper les différents matériaux utilisés pour cette thèse. Il a également décrit les différentes étapes à suivre pour la réalisation d'ECF selon les spécifications imposées**.**

CHAPITRE 4

FORMULATION DES ECF AVEC 100 % DE GBR

4.1 Introduction

Le recyclage est la solution la plus favorable pour réduire la consommation de matières premières naturelles non renouvelables (granulat et liant bitumineux). Comme pour le recyclage à chaud, le recyclage à froid des GBR dans la production des matériaux bitumineux permet de réduire l'empreinte écologique et le coût avec un gain énergétique plus important (à froid). Actuellement, le but commun des industries routières est de fabriquer un enrobé ayant des caractéristiques comparables à celles d'un enrobé neuf mais en utilisant le plus possible de matériaux récupérés (Tachon, 2008).

Développé pour certaines techniques en place, à notre connaissance, le recyclage à froid n'est pas actuellement pratiqué dans les ECF. La technique des ECF formulés avec matériaux vierges a fait ses preuves en matière de sécurité et de confort des chaussées, par la maitrise de sa formulation et le choix rigoureux de ses matériaux de base.

Cependant, plusieurs questions et aspects restent à étudier sur leur comportement lorsque les matériaux qui le composent varient (inclusion de GBR, d'adjuvant, etc.) et sur leur durabilité (résistance aux dégradations sur une chaussée mise en service et apport structurel) ce qui ouvre plusieurs possibilités de recherches dans ce domaine.

Dans cette perspective, ce travail vise principalement à une étude de paramètres influant la formulation des ECF fabriqués avec des matériaux bitumineux 100% recyclés (granulats bitumineux recyclés (GBR) et à analyser leur comportement par l'évaluation de leurs propriétés mécaniques selon les essais imposés par *l'International Slurry Surfacing Association* (ISSA).

4.2 Objectifs

Même s'il est plus difficile de recycler dans les couches de roulement, compte tenu des exigences sur les matériaux, des efforts doivent cependant être faits dans cette voie, notamment dans les couches de surface.

L'objectif principal de cette partie des travaux de recherche sur les ECF est d'évaluer expérimentalement les performances des ECF fabriqués avec des matériaux recyclés afin d'obtenir une meilleure compréhension et une meilleure maitrise de leur comportement.

Ce projet a également comme objectifs l'évaluation du type ainsi que la teneur optimale en émulsion, en eau et en ciment des mélanges, mais aussi d'évaluer l'effet de la teneur en fines sur la cohésion des ECF contenant une grande quantité de GBR-C (100% de GBR).

4.3 Méthodologie

Le programme expérimental a été axé sur la compréhension de l'influence des paramètres variables (type de l'émulsion, teneur en émulsion et teneur en ciment) lors de la formulation des ECF 100% recyclé.

La formulation d'ECF avec du GBR-C a été effectuée en trois étapes distinctes :

- dans un premier temps, les ECF recyclés (contenant des GBR-C) ont été fabriqués à partir d'un seul type d'émulsion et une seule source de granulat (GBR-C), mais avec trois granulométries différentes avant d'être caractérisés selon les essais de l'ISSA afin de déterminer le mélange optimal en fonction des performances aux essais ISSA ;
- dans un deuxième temps, une étude plus approfondie du mélange d'ECF recyclé choisi a été effectuée en faisant varier l'émulsion et le temps de cure des essais (essai de cohésion) ;
- enfin, une variation de la quantité en ciment a été testée sur le mélange fabriqué avec la teneur en émulsion offrant les meilleures résistances aux tests ISSA. L'objectif de ces tests est de maitriser l'impact des GBR-C sur le comportement final des ECF afin de réaliser une

formulation performante d'ECF composé de 100% de GBR-C, ainsi que d'ajuster le dosage des différents composants.

4.3.1 Choix des matériaux et composition des ECF

Les essais ont été menés sur une formulation d'ECF avec des GBR-C (0/5 mm) issus d'une carrière située à Saint-Isidore, au Québec. Les GBR-C ont une teneur de bitume de 5%.
Trois types d'émulsion ont été testés :

- une émulsion principale CQS-1HP (*cationic quick set- hard bitumen with polymer*; appellation standard des émulsions utilisées pour les ECF dans l'industrie selon les critères de l'ISSA), constituée de 60% de liant bitumineux et 40% d'eau;
- une émulsion Classe 6 (C60) selon la norme EN 1431 modifiée par polymère SBS (styrène-butadiène-styrène) à rupture lente constituée également de 60% de liant bitumineux et 40% d'eau ;
- Une émulsion anionique dite SS-1 (*slow setting*) constituée aussi de 60% de liant bitumineux et 40% d'eau.

Ces trois types d'emulsion differentent par leur pH et leur composition chimiques.
Les caractéristiques des matériaux utilisés pour la formulation des ECF recyclés sont détaillées dans le chapitre 3.

4.3.2 Démarche expérimentale

La formulation des mélanges d'ECF avec des GBR a été basée sur la formulation issue des travaux antérieurs effectués au LCMB (Robati, 2014a) suivant les normes de l'ISSA. La formule de référence (granulométrie moyenne dense) est composée des granulats vierges de fraction 0-5mm (mélange 100% de granulats vierges), de 12% en teneur d'émulsion, de 10% teneur en eau et de 1% de ciment. La courbe de la formule de référence est centrée dans le fuseau granulométrique de l'ISSA.

Ainsi, partant du fuseau granulométrique de la norme ISSA, trois granulométries d'ECF formulés avec du GBR-C ont été déterminées suivant leur répartition à l'intérieur du fuseau, comme présenté dans la figure 3.3 chapitre 3.

Les trois granulométries sont :

- le mélange d'ECF recyclé avec granulométrie moyenne (mélange de référence dite dense-dense (DD)) centré sur le fuseau;
- le mélange d'ECF recyclé avec granulométrie grossière plus grenu (appelée dense-grossière (DG)), situé en bas du mélange de référence;
- le mélange d'ECF recyclé avec granulométrie fine plus sableux (dite dense-fine (DF)), situé au-dessus du mélange de référence.

Le mélange dense-dense (DD) a été déterminé en faisant la moyenne des courbes Max et Min du fuseau granulométrique de l'ISSA, et le mélange granulométrie grossière (DG) a été réalisé en calculant la moyenne des courbes dense-dense (DD) et Min. Pour la courbe granulométrie fine (DF), elle a été établie en faisant la moyenne entre la courbe dense-dense (DD) et la courbe Max (figure 4.1) et (tableau 4.1).

Pour obtenir les trois granulométries, le GBR-C a été séparé sur différents tamis puis les trois granulométries ont été recomposées.

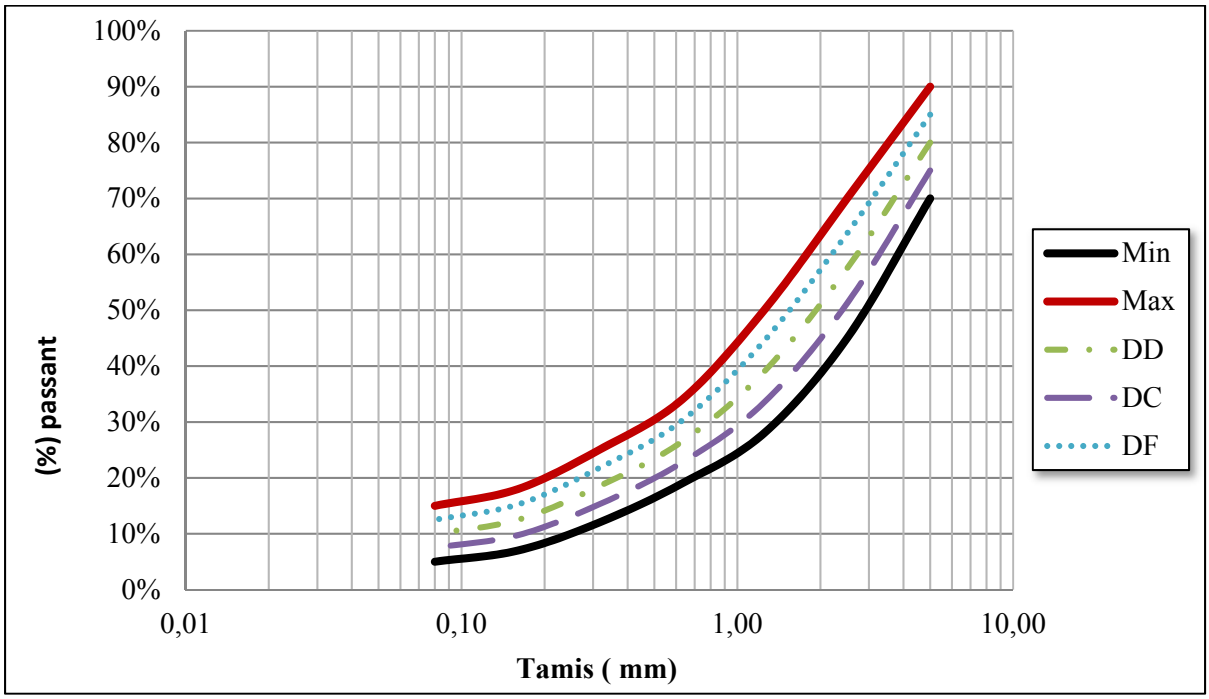


Figure 4.1 Courbes granulométriques des mélanges dense, fine et grossière dans le fuseau de l'ISSA

Tableau 4.1 Granulométrie et masses utilisées pour les mélanges Dense-Dense, dense-grossière, dense-fine

	Formule Dense-dense DD	**Formule Dense-grossière DG**	**Formule Dense-fine DF**
Tamis mm	**% Passant**	**% Passant**	**% Passant**
5,0	80	75	85
2,5	57	51	64
1,25	39	34	45
0,63	26	23	30
0,315	18	15	22
0,16	12	9,8	15
0,08	10	7,5	13
plat	0,0	0,0	0,0

Classiquement dans les techniques de recyclage à chaud, la formulation d'enrobés avec GBR, tient compte de la teneur en bitume issu des GBR qui est censée participer au mélange. La fabrication des ECF est une technique à froid, et donc on part de l'hypothèse que la teneur en émulsion est indépendante du taux de GBR introduit. Pour ce faire, neuf mélanges d'ECF fabriqués avec l'émulsion CQS-1HP et 100% de GBR ont été formulés à partir des trois courbes granulaires définies (dense, fine et grossière) avec trois teneurs en émulsion en appliquant les essais de validation selon les critères de l'ISSA (cohésion, abrasion et déplacement).

Tous les pourcentages des constituants de l'ECF ont été calculés par rapport à la masse des granulats GBR-C secs. Les teneurs valeurs minimales et maximales de la teneur en émulsion (permettant d'évaluer l'influence de la variation de la teneur en émulsion) ont été choisies suite à des essais préliminaires réalisés sur les mêmes granulométries, mais sans GBR-C.

La teneur en eau ainsi que le pourcentage de ciment ont été maintenus constants pour un premier temps (11% d'eau et 1% de ciment, mêmes teneurs que la formule de référence). Ces valeurs ont été basées sur les retours d'expérience des essais de formulation réalisés précédemment au laboratoire et sur chantier (Lebec, 2014; Robati, 2014a). Le tableau 4.2 résume les pourcentages des constituants des mélanges ECF pour les différentes formulations.

Tableau 4.2 Pourcentages massiques des différentes formulations d'ECF recyclés

Formules	**Dense-Dense**	**Dense-Grossière**	**Dense-Fine**
Pourcentage massique %			
GBR humides	100	100	100
Émulsion de bitume	11,5-12,0-12,55	11,0-11,5-12,0	10,5-11,0-11,5
Eau d'apport	11,0	11,0	11,0
Ciment type GU	1,0	1,0	1,0

4.3.3 Essais réalisés pour la validation des formulations des ECF avec GBR-C

Afin de valider les formulations, mais aussi d'évaluer l'influence des composantes des ECF, des essais de caractérisation ont été effectués. Les essais effectués sont des essais de cohésion ISSA-TB 139 (ISSA, 2005d), d'abrasion humide ISSA TB 100 (ISSA, 2005c), de déplacement ISSA TB 147 (ISSA, 2005b) et l'essai HCT (*Hilt Cohesion Test*) développé par l'entreprise Colas (IDRRIM, 2017). Ces derniers (expeté l'essai HCT) sont tous issus des recommandations ISSA et leurs principes sont détaillés ci-avant (voir chapitre 2).

4.4 Interprétation des résultats

4.4.1 Validation de la formulation ECF vierge

Les résultats relatifs à la formulation d'un ECF vierge (granulométries moyennes denses denses) conduisent tous à des résultats conformes aux spécifications de l'ISSA. Les ECF vierges sont formulés avec l'émulsion CQS-1HP. La teneur en émulsion est de 12% et la teneur en eau de 11%.

Ainsi, les résultats des essais de validations de la formulation des ECF vierges sont regroupés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Résultats des essais de caractérisation des ECF vierges

Essais	**Cohésion ISSA TB 139**		**Abrasion ISSA TB 100**		**WTAT ISSA TB 147** (après 1000 cycles)		**HCT**
ECF vierge	**30 min Spec>12kg.cm**	**60 min Spec>20kg.cm**	**Masse initiale avant l'essai**	**Masse finale après l'essai <538g/m²**	**%déplacement vertical (Spec< 10%)**	**%déplacement horizontal (Spec< 5%)**	**temps de cassure (min)**
	14,3	22	762,6	762, 3	7	2	3,2

Pour ce qui est des résultats, on voit donc que la formulation d'ECF vierge est conforme aux normes. Ceci affirme que le dosage entre les différents constituants est maitrisé. Un seul échantillon d'ECF a été testé pour valider la formulation des ECF vierges.

4.4.2 Résultats des essais des ECF avec GBR-C

L'analyse des résultats a été réalisée en deux parties : dans un premier lieu, une interprétation des résultats obtenus est présentée et a permis d'évaluer le comportement des 9 mélanges fabriqués suite à la réalisation des essais déjà cités (tableau 4.4). Ceci a permis d'identifier le mélange présentant les meilleures performances. Dans un second lieu, une étude est effectuée sur le mélange sélectionné afin d'améliorer ses résultats.

Tableau 4.4 Les numéros des différents mélanges selon la granulométrie (DD, DG et DF) et la teneur en émulsion

Granulométrie	**Dense-Dense (DD)**			**Dense-Fine (DF)**			**Dense- Grossière (DG)**		
Mélange	DD1	DD2	DD3	DF4	DF5	DF6	DG7	DG9	DG10
Teneur en émulsion (%)	11,5	12,0	12,5	10,5	11,0	11,5	11,0	11,5	12,0

4.4.2.1 Analyse de tous les mélanges (ECF +GBR-C)

Les figures 4.2 à 4.7 montrent l'influence de la granularité sur les performances des mélanges ECF pour une même émulsion (CQS-1HP), mais une teneur en émulsion variable. Les mélanges sont numérotés de 1 à 9 et diffèrent selon leurs granulométries et leurs teneurs en émulsion (tableau 4.4). Ces chiffres ont permis de différencier les différents mélanges pour chaque formule suivant leur teneur en émulsion de bitume. Les valeurs d'écarts types associées aux valeurs de l'essai d'abrasion sont calculées pour un seul opérateur sur les divers échantillons testés.

Pour l'essai de cohésion à 30 min, les résultats étaient sensiblement les mêmes et n'ont pas décelé un effet de la granularité. On observe une variation de 8 à 13 kg.cm. De même, tous les résultats de cohésion à 60 min ont été considérés comme sensiblement égaux : moyenne de 12.5 kg.cm avec une variation de 10 à 12 kg.cm à 60 min.

Par ailleurs, la cohésion à 60 min n'a pas montré des résultats concluants, car toutes les valeurs obtenues étaient inférieures à 20 kg.cm. Puisque les résultats des essais à la cohésion sont fortement tributaires de l'interaction entre l'émulsion et les granulats, il n'a pas été surprenant d'avoir obtenu des résultats. Il semblerait que la cohésion des ECF atteint son maximum après 30 min de temps de cure. En effet, le début de la montée en cohésion se traduit par la formation d'un gel (coalescence goutte par goutte), puis agglomération des gouttes, fusion de celles-ci et enfin la formation d'un film de bitume autour de granulats. Une fois ces étapes réalisées, la cohésion est obtenue. Cependant, la vitesse de montée en cohésion varie selon la nature des granulats. Ainsi, pour des granulats peu réactifs, la cinétique de rupture de l'émulsion est plus lente que dans le cas des granulats réactifs (Joliecoeur, 2006). Ceci peut expliquer l'absence de l'influence du temps de cure sur la cohésion des ECF.

Il a été également remarqué que la cohésion augmente en même temps que la teneur en émulsion pour chaque type de mélange. Par contre, la teneur en fine a aussi habituellement un fort impact sur la montée en cohésion. Pour ces trois mélanges, la granulométrie est différente. On a donc une teneur en fines minimale pour le mélange dense-grossier (DG) (inférieure à 3%), puis le mélange dense-dense (DD) avec une teneur en fines de 4% et enfin pour la granulométrie dense-fine (DF), nous avons une teneur en fines de 4,5%). Cependant, les relations (interaction) entre la teneur en fines et la cohésion à 30 minutes ou 60 minutes n'ont pas été observées même si les mélanges ont des teneurs en fines variables.

Classiquement, plus la teneur en fines augmente, plus la teneur en liant augmente aussi. Cependant, cette augmentation a des limites, car l'excès de liant peut entrainer des phénomènes de ressuage et les excès de fines engendrent une perte de maniabilité et une faible résistance à la fatigue (AIPCR, 2003a; Corté et Di Benedetto, 2004a; Robati, 2014a). L'absence d'une

interaction entre les essais de cohésion et la variation de la teneur en fine peut s'expliquer par cette hypothèse.

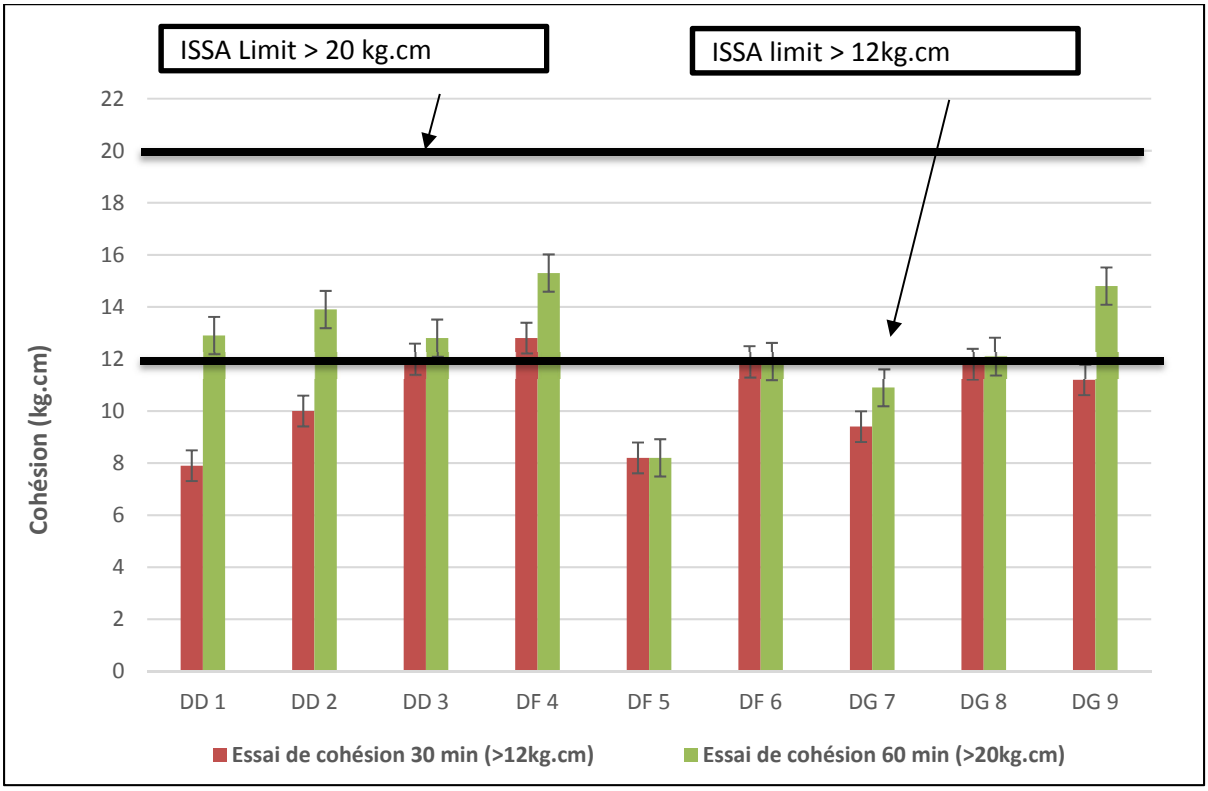


Figure 4.2 Résultats des essais de cohésion des mélanges ECF en fonction de la teneur en émulsion

Les tableaux 4.5 et 4.6 présentent les gammes de moyenne de répétabilité : les moyennes maximale et minimale obtenues après 3 essais pour chaque formule d'ECF. Le calcul de la gamme de répétabilité s'est basé sur des travaux antérieurs pour tous les essais à savoir cohésion , abrasion et déplacement (Robati, 2014a). Il est à noter que pour tous les résultats des essais sont inclus dans la gamme de répétabilité. Les valeurs d'écarts types sont également présentées dans le tableau 4.5 et tableau 4.6.

Compte tenu des valeurs obtenues, les tests de cohésion à 30 min et à 60 min montrent une bonne répétabilité. Cependant, il est indispensable de souligner que ces résultats sont obtenus avec un nombre limité d'échantillons.

Tableau 4.5 Moyenne des essais cohésion à 30 min, gamme de répétabilité et écart type

Formules ECF	Teneur en émulsion (%)	Cohésion 30 min (>12kg.cm)	Moyenne	Gamme de répétabilité	Écart type
DD 1	11,5	8	7,9	6,2 - 9,6	0,26
	11,5	7,6			
	11,5	8,1			
DD 2	12	9,7	10,0	8,3 - 11,7	0,5
	12	10,6			
	12	9,8			
DD 3	12,5	12,0	11,8	10,1 - 13,5	0,3
	12,5	11,5			
	12,5	12,0			
DF 4	11,5	13,0	12,8	11,1 - 14,5	0,3
	11,5	12,9			
	11,5	12,5			
DF 5	11	7,2	8,2	6,5 - 9,9	0,9
	11	8,5			
	11	9,0			
DF 6	10,5	12,0	11,9	10,2 - 13,6	0,1
	10,5	11,9			
	10,5	11,9			
DG 7	11	8,8	9,4	7,7 - 11,1	0,6
	11	10,0			
	11	9,5			
DG 8	11,5	12,0	11,8	10,1 - 13,5	0,3
	11,5	11,5			
	11,5	12,0			
DG 9	12	11,0	11,2	9,5 - 12,9	0,3
	12	11,5			
	12	11,0			

Tableau 4.6 Moyenne des essais cohésion à 60 min, gamme de répétabilité et écart type

Formules ECF	Teneur en émulsion (%)	Cohésion 60 min (>20 kg.cm)	Moyenne	Gamme de répétabilité	Écart type
DD 1	11,5	13	12,9	8,9 - 16,9	0,06
	11,5	12,9			
	11,5	12,9			
DD 2	12	13,5	13,9	9,9 - 17,9	0,5
	12	13,8			
	12	14,5			
DD 3	12,5	13,0	12,8	8,8 - 16,8	0,3
	12,5	12,5			
	12,5	12,9			
DF 4	11,5	15,0	15,2	11,2 - 19,2	0,3
	11,5	15,5			
	11,5	15,0			
DF 5	11	7,2	8,2	4,2 - 12,2	0,9
	11	8,5			
	11	9,0			
DF 6	10,5	12,0	11,9	7,9 -15,9	0,1
	10,5	11,9			
	10,5	11,9			
DG 7	11	10,5	10,9	6,9 - 14,9	0,5
	11	10,8			
	11	11,5			
DG 8	11,5	12,0	12,0	8 - 16	0,0
	11,5	12,0			
	11,5	12,0			
DG 9	12	14,5	14,7	10,7 - 18,7	0,3
	12	15,0			
	12	14,5			

Pour l'essai d'abrasion, les résultats ont montré que les mélanges DF ne vérifient pas la limite d'acceptation pour toutes les teneurs en liant considérées. Cette sensibilité plus importante à l'abrasion, observée pour les mélanges DF peut être due à la teneur en bitume qui n'était pas suffisante pour enrober tout le squelette granulaire. Cependant, ces pourcentages de bitume ont été basés sur des formulations de référence. Les mélanges DD et DG quant à eux, ont présenté des bons résultats, qui ont été cependant influencés par la teneur en émulsion. On a également observé que les mélanges DD 1 et DG 8 présentaient d'excellents résultats.

Les mélanges Dense-dense (DD) et Dense-fine (DF) montrent les mêmes tendances au niveau des performances à l'abrasion : plus la teneur en émulsion est faible, mieux le comportement à l'abrasion de l'ECF 100% GBR-C est. Pour les mélanges DG, un optimum est obtenu avec la granulométrie DG8 avec la teneur en émulsion choisie pour ce mélange.

Nous avons donc conclu que l'essai d'abrasion est influencé aussi bien par la granularité que par la teneur en liant. Les insuffisances en abrasion observées au niveau du mélange DF peuvent être expliquées par sa faible teneur en bitume et la teneur élevée en fines. En effet, les mélanges riches en granulats grossiers ont tendance à avoir de bonnes résistances à l'usure par abrasion et à la déformation permanente (Corté et Di Benedetto, 2004b; Lédée, Delalande et Dupont, 2005; Nguyen et al., 2007).

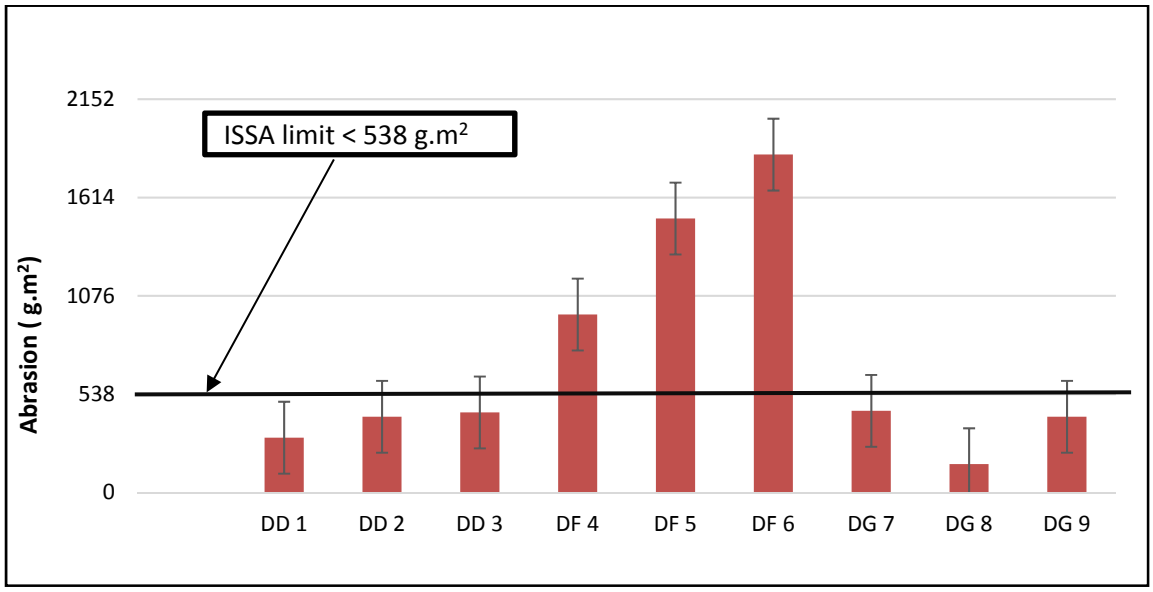


Figure 4.3 Résultats des essais d'abrasion des mélanges ECF en fonction de la teneur en émulsion

Tableau 4.7 Moyenne des essais d'abrasion, gamme de répétabilité et écart type

Formules ECF	Teneur en émulsion (%)	Abrasion (<538 g.m^2)	Moyenne	Gamme de répétabilité	Écart type
DD 1	11,5	300	300	153,3 - 453,3	50,00
	11,5	250			
	11,5	350			
DD 2	12	420,0	415	265 - 565	13,2
	12	400,0			
	12	425,0			
DD 3	12,5	435,0	438,3	288,3 - 588,3	10,4
	12,5	430,0			
	12,5	450,0			
DF 4	11,5	950,0	975	825 - 1125	21,8
	11,5	985,0			
	11,5	990,0			
DF 5	11	1450,0	1450	1300 -1600	30,0
	11	1480,0			
	11	1420,0			
DF 6	10,5	1825,0	1849,3	1699,3 - 1999,3	23,5
	10,5	1851,0			
	10,5	1872,0			
DG 7	11	456,0	447,3	297,3 - 597,3	8,1
	11	440,0			
	11	446,0			
DG 8	11,5	165,0	155	5 - 305	10,0
	11,5	155,0			
	11,5	145,0			
DG 9	12	415,0	414,5	264,5 - 564,5	0,5
	12	414,0			
	12	414,5			

Le tableau 4.7 présente les gammes de moyennes de répétabilité : les moyennes maximales et minimales obtenues après 3 essais pour chaque formule d'ECF. Les valeurs d'écarts types sont également présentées dans le tableau 4.7.

Compte tenu des valeurs obtenues, les tests d'abrasion montrent une bonne répétabilité. Cependant, on remarque des valeurs d'écart type élevées pour certaines formulations. Par exemple, la formulation DD 1 s'associe au pourcentage d'émulsion de bitume et la granulométrie moyenne. Ceci peut expliquer les faibles valeurs d'abrasion et la dispersion des résultats. En effet dans ce cas de figure, l'enrobage des granulats n'est pas bon. Pour l'essai de déplacement horizontal et vertical, les résultats obtenus ont été satisfaisants, à part le mélange DD 2 et le mélange DG 7, ce qui a permis de déduire que la granularité influence peu les essais de déplacement. L'analyse des essais de performances obtenues avec les neuf mélanges de granularité différente a montré que le mélange 9 (DG) présentait les meilleures performances.

Les tableaux 4.8 et 4.9 présentent les gammes de moyennes de répétabilité : les moyennes maximales et minimales obtenues après 3 essais pour chaque formule d'ECF. Les valeurs d'écarts types sont également présentées dans le tableau 3.8 et 3.9.

Tableau 4.8 Moyenne des essais déplacement latéral, gamme de répétabilité et écart type

Formules ECF	Teneur en émulsion%	Déplacement (Latéral <5%)	Moyenne	Gamme de répétabilité	Écart type
DD 1	11,5	-	-	-	-
	11,5	-			
	11,5	-			
DD 2	12	8,0	7,5	4,3 - 10,7	0,5
	12	7,5			
	12	7,0			
DD 3	12,5	3,5	3,5	0,3 - 6,7	0,2
	12,5	3,3			
	12,5	3,7			
DF 4	11,5	4,0	4,1	0,8 - 7,3	0,1
	11,5	4,2			
	11,5	4,0			
DF 5	11	1,5	1,7	1,5 - 4,9	0,3
	11	1,7			
	11	1,9			
DF 6	10,5	3,5	3,7	0,5 - 6,9	0,2
	10,5	3,7			
	10,5	3,8			
DG 7	11	6,1	6,2	3 - 9,4	0,3
	11	6,5			
	11	6,0			
DG 8	11,5	1,8	1,8	1,4 - 5	0,3
	11,5	2,0			
	11,5	1,5			
DG 9	12	2,5	2,4	0,8 - 5,6	0,3
	12	2,7			
	12	2,1			

Tableau 4.9 Moyenne des essais déplacement vertical, gamme de répétabilité et écart type

Formules ECF	Teneur en émulsion(%)	Déplacement (Vertical <10%)	Moyenne	Gamme de répétabilité	Écart type
DD 1	11,5	-	-	-	-
	11,5	-			
	11,5	-			
DD 2	12	11,0	11,2	7,2 - 15,2	0,3
	12	11,5			
	12	11,0			
DD 3	12,5	8,5	8,7	4,7 - 12,7	0,3
	12,5	9,0			
	12,5	8,5			
DF 4	11,5	1,5	1,7	2,3 - 5,3	0,3
	11,5	1,7			
	11,5	2,0			
DF 5	11	5,5	5,8	1,8 - 9,8	0,3
	11	6,0			
	11	6,0			
DF 6	10,5	0,5	0,3	3,7 - 4,3	0,1
	10,5	0,3			
	10,5	0,3			
DG 7	11	9,5	9,6	5,6 - 13,6	0,2
	11	9,4			
	11	9,8			
DG 8	11,5	9,0	9,1	5,1 - 13,1	0,1
	11,5	9,2			
	11,5	9,0			
DG 9	12	7,5	7,7	3,7 - 11,7	0,3
	12	7,5			
	12	8,0			

Compte tenu des valeurs obtenues, les tests de déplacement latéral et vertical montrent une bonne répétabilité des essais et des écarts types faibles. Compte tenu des performances du mélange 9 en abrasion et en déplacement, mais de sa mauvaise cohésion, une étude plus détaillée a été menée sur ce mélange.

4.4.2.2 Analyse complémentaire sur le mélange DG 9

Le but de cette partie était d'évaluer le comportement du mélange DG 9 vis-à-vis de la cohésion en fonction du temps et en fonction du type d'émulsion utilisée. Ainsi, deux paramètres ont été variés au cours de cette étape: le temps de mesure de cohésion et le type d'émulsion (3 émulsions citées dans la section 4.3.1).

Les temps choisis après lesquels la cohésion de l'ECF a pu être mesurée sont les suivants :

- 30 minutes;
- 60 minutes;
- 1440 minutes (24 heures);
- 2880 minutes (48 heures);
- 4320 minutes (72 heures).

La figure 4.5 présente les résultats obtenus pour les nouveaux paramètres employés. On remarque que les valeurs de cohésion conformes aux exigences ISSA sont obtenues après 24h avec l'émulsion SBS, 48 h pour l'émulsion anionique et 72 h pour l'émulsion CQS-1HP. Ceci montre donc que l'émulsion C60 est la plus adaptée à la formulation des ECF utilisant des enrobés recyclés GBR-C, car sa cohésion a évolué plus rapidement que celle des autres émulsions utilisées dans cette étude. Donc, on peut en conclure que les émulsions à rupture lente sont plus adaptées au ECF formulés avec du GBR. Cependant l'explication de cette adaptation est complexe. En effet, si la rupture de l'émulsion correspond à une évaporation de l'eau, suivi d'une coalescence et de la formation du film de liant autour du granulat (Ziyani, 2013a), l'utilisation des émulsions à rupture lente permettrait à cette eau de rester plus longtemps en contact avec les GBR. En présence d'eau, les molécules de bitume sont en

compétition avec les molécules d'eau aux interfaces bitume-granulat des enrobés bitumineux (Jolicoeur et Otis, 2006; Ktari, 2016; Kucharek 2012). Ainsi donc, les émulsions à base de SBS permettraient à l'eau d'effectuer un certain désenrobage du liant vieilli des GBR et la libération de point de contact favorable à l'adhérence de l'émulsion d'ajout.

De plus, une montée initiale plus rapide de la cohésion est observée avec l'émulsion C60 par rapport aux deux autres émulsions. Cette constatation est due à la nature des granulats GBR-C utilisée. En effet, ces derniers sont plus réactifs à l'émulsion C60 que les granulats français GBR-F.

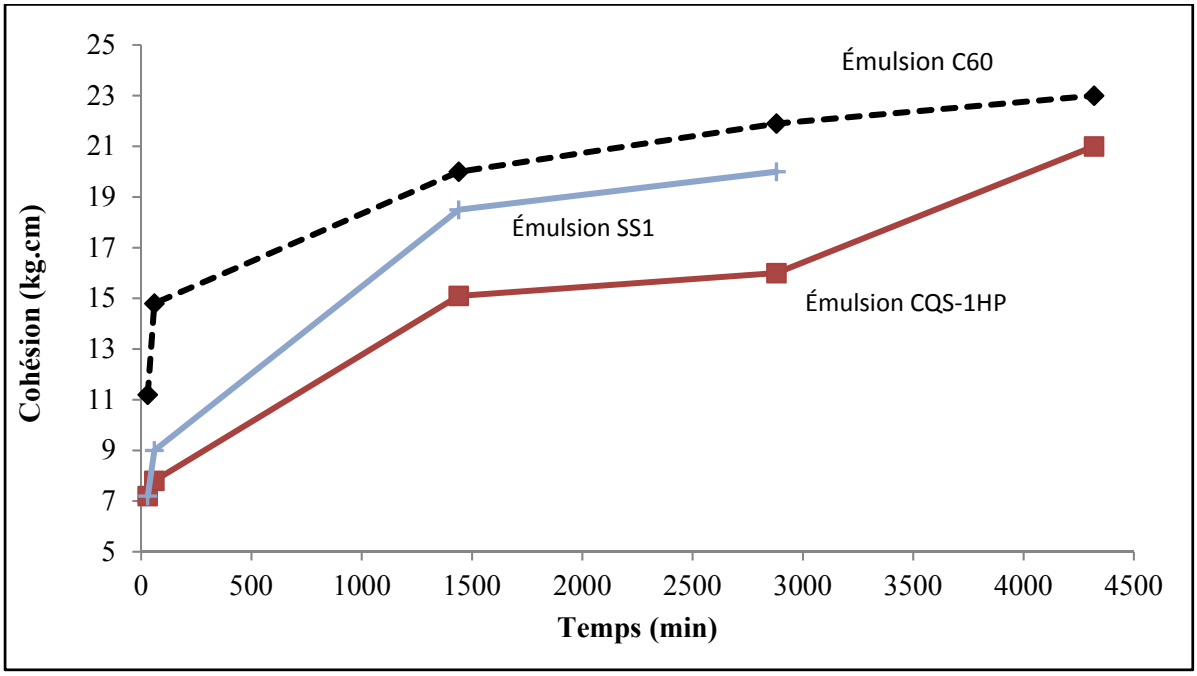


Figure 4.4 Évolution de la cohésion d'un ECF en fonction du temps et du type d'émulsion de bitume

Afin de se rapprocher des exigences de temps de la norme ISSA, une étude complémentaire a été réalisée avec l'émulsion C60 afin de réduire le temps de cohésion. Ainsi différentes teneurs en ciment variant de 0,3 % à 2,5 % ont été utilisées. Les teneurs en ciment choisies ont été

calées sur le retour d'expérience des professionnels. La figure 4.6 présente les résultats obtenus.

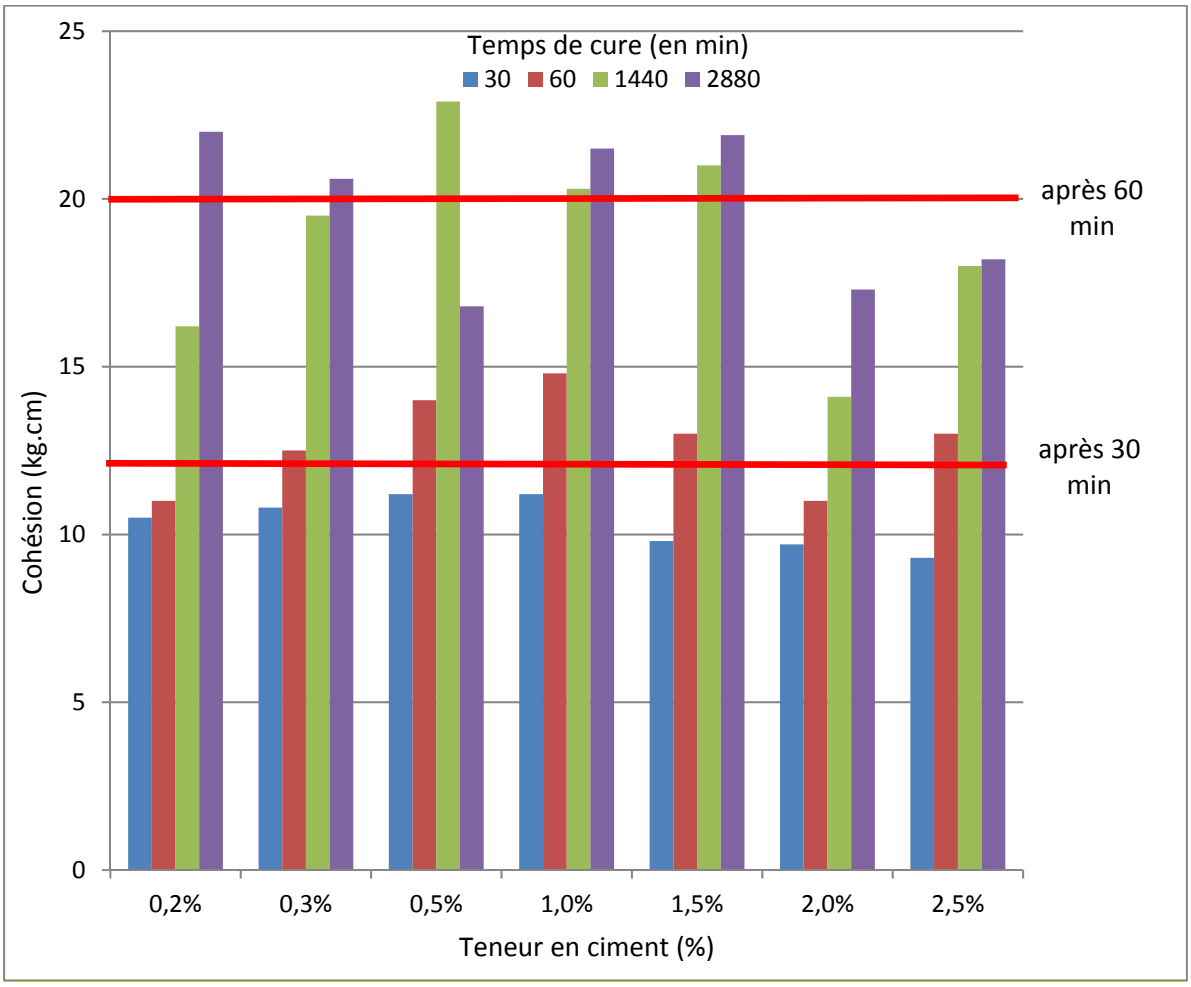


Figure 4.5 Évolution de la montée en cohésion en fonction du temps de cure et du dosage en ciment (DG9, émulsion C60)

Comme présenté sur la figure 4.6, les valeurs de cohésion conformes aux exigences ISSA ont été obtenues plus rapidement pour les faibles teneurs en ciment de 0,3 à 1,5 %. Parmi ces mélanges, le meilleur résultat est obtenu à 1,0 et 1,5% de ciment. Ces résultats étaient plutôt inattendus puisque le ciment sert de rupteur pour l'émulsion et par conséquent, devrait améliorer la montée en cohésion des mélanges. En effet, plus la teneur en ciment augmente plus la cohésion est rapide.

Cette observation peut s'expliquer par le fait que seulement une partie du ciment ait été utilisée comme filler réactif, et que le reste du ciment a simplement modifié la granulométrie, en augmentant la quantité de fine dans le mélange au-delà du maximum, aidant à la cohésion. Ce phénomène peut être également s'expliquer par le fait qu'une augmentation de teneur en ciment engendre un manque d'eau et donc problème d'hydratation du mélange. Cependant la quantité du ciment utilisée dans la formulation reste minime.

Afin de mieux évaluer l'aspect de la cohésion du mélange DG 9 (12% d'émulsion de bitume, 1% d'eau et 1% de ciment), l'essai de cohésion (*Hilt Cohesion Test* (HCT)) développé en interne par l'entreprise Colas a été réalisé.

Le HCT a été effectué sur un mélange de référence (granulométrie dense-dense) : un ECF avec des granulats vierges. Les résultats ont montré un temps de rupture de 2 minutes et 50 secondes pour les ECF avec granulats vierges après un temps de cure de 30 minutes. Il est à noter que selon Colas (Office Européen des brevets, 2006), un temps minimum de 15 secondes à 30 minutes de cure est nécessaire pour s'assurer d'une montée en cohésion correcte du mélange. Ce temps permet de définir le temps nécessaire pour ouvrir le trafic. Les critères de l'expérience ne sont pas normalisés. Ils se réfèrent au savoir-faire et à l'expérience de l'entreprise. Pour les ECF avec GBR, l'essai HCT a été réalisé uniquement sur deux formules, qui diffèrent seulement par la teneur en eau. Les résultats sont présentés au tableau 4.10.

Tableau 4.10 Résultats des essais HCT pour ECF avec 100% GBR-C

Émulsion	**Teneur en émulsion**	**Teneur en ciment**	**Teneur en eau**	**Formulation**	**HCT 30 min**	**HCT 60 min**
CQS-1HP	10%	0,5%	12,0%	DG	39 s	-
CQS-1HP	10%	0,5%	10,0%	DG	43 s	1 min 36s

Comme observé dans le tableau 4.10, les deux mélanges testés ont répondu à l'exigence imposée par l'essai HCT après un temps de cure de 30 minutes. Ces résultats sont la moyenne de trois essais par type de mélange testé. Ces essais ont montré une bonne répétabilité. Cet essai semble plus représentatif de l'état des ECF en chantier que l'essai ISSA de cohésion, raison pour laquelle les résultats obtenus sont considérés valables.

4.5 Conclusion

Les différents essais réalisés sur les mélanges d'ECF ont permis de valider la formulation des enrobés coulés à froid fabriqués avec des matériaux bitumineux recyclés (GBR) et de souligner les difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre des formules. L'objectif de ce chapitre était de répondre à la problématique du recyclage sans aucune limitation dans le taux de recyclés à utiliser.

Les résultats des essais d'abrasion et de déplacement pour les ECF avec GBR ont montré des comportements acceptables pour la totalité des mélanges effectués parce que les résultats répondent aux spécifications imposées par l'ISSA. Des problèmes de cohésion ont été détectés pour tous les mélanges. Afin d'améliorer les résultats de cohésion, différentes tentatives ont été réalisées pour répondre aux exigences des essais imposés par l'ISSA. Le premier point a consisté à évaluer l'influence du type de l'émulsion et du temps de l'essai sur le comportement à la cohésion des ECF. Plusieurs teneurs en ciment ont été également employées afin d'analyser l'effet du ciment sur la cohésion des mélanges ECF.

Une amélioration des résultats des essais de cohésion a été constatée après un temps d'essai plus long (à partir de 24 heures) ce qui permet de conclure qu'avec nos matériaux d'étude, la durée d'ouverture du trafic pour les enrobés coulés à froid recyclés est plus élevée que celle avec les enrobés coulés à froid vierges.

L'effet de certains paramètres sur les performances des ECF formulés avec des GBR tels que la granularité des GBR utilisés, la nature de l'émulsion de bitume et la teneur en additif de rupture (ciment) ont été évaluées au cours de cette étude. Ces conditions d'essais ont permis

de considérer un temps de cohésion supérieur à celui de la norme ISSA pour les granulats vierges, car la montée en cohésion des ECF recyclés a mis plus de temps que les temps annoncés dans les spécifications ISSA.

En perspective, il faudra continuer les études sur la cohésion afin de réduire le temps de cohésion par l'utilisation de régénérant pour le bitume vieilli, d'autres types de ciment, des fibres ou par ajout de granulats vierges (augmenter la teneur en fines). Cependant, il est à noter que l'utilisation de GBR dans les ECF nécessite une très bonne maitrise de la granularité. Par conséquent, il semble judicieux de s'interroger sur les différentes contraintes techniques et économiques lors de l'utilisation des matériaux recyclés. Il serait intéressant d'étudier la possibilité d'intégrer des matériaux d'apport ainsi que de bien maitriser les caractéristiques chimiques de l'émulsion afin de mieux contrôler les mélanges réalisés.

En effet, les paramètres étudiés sont pertinents. Cependant, il a été remarqué que leur variation ne suit pas une logique. Il serait intéressant d'établir un plan d'expérience afin de mieux formuler les hypothèses.

Bien que la formulation des ECF avec des GBR ait montré des résultats satisfaisants, il reste indispensable d'étudier leurs propriétés et performances mécaniques à savoir orniérage, rigidité, vieillissement, tenue à l'eau, etc.

CHAPITRE 5

ÉTUDE DU VIEILLISSEMENT THERMIQUE ET PHOTOCHIMIQUE SUR LES ECF VIERGES ET ECF AVEC GBR

5.1 Introduction

Conformément à la politique de gestion d'une route, le manque d'entretien est un risque d'évolution des dégradations qui, si elles dépassent certains seuils, obligent à recourir à des techniques de réhabilitation coûteuses pour redonner à la chaussée ses propriétés initiales (LCPC, 1994a). Plusieurs techniques d'entretien sont utilisées de nos jours, et parmi elles les enrobés coulés à froid (ECF) qui sont en pleine expansion. Bien que la technique des ECF soit reconnue dans l'entretien routier, plusieurs questions se posent sur ses performances tout au long de sa durée de vie (SFERB, 2006b).

La réutilisation des GBR dans les techniques routières a connu un développement important suite aux actions techniques mises en œuvre dans le domaine de la construction routière en réponse aux politiques environnementales du développement durable (Meeddat, 2009). Le recyclage est aujourd'hui une réponse logique permettant de réduire la consommation de granulats et de liant bitumineux, matières premières naturelles non renouvelables.

Cependant, bien que le recyclage des GBR dans les ECF soit une solution très favorable au respect des exigences du management du développement durable, des questions subsistent dans l'impact de ces GBR sur les performances mécaniques et chimiques de l'ECF. En effet, le liant des GBR vieilli se mélange-t-il au liant neuf de l'ECF et quand ? Si oui comment ce vieillissement impacte-t-il les performances de l'ECF ? Dans le cas où les deux liants ne se mélangent pas, les propriétés d'adhésivité entre les GBR et l'émulsion de bitume neuf doivent être étudiées.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'évolution des performances du liant d'un ECF formulé avec des GBR à différents stades de mûrissement/vieillissement, comparativement à celles du

liant d'un ECF classique de référence. À travers cette étude, nous avons défini dans un premier temps une méthodologie de vieillissement accéléré en laboratoire sur ECF classique afin de simuler l'évolution des ECF dans le temps. Ensuite nous avons évalué les caractéristiques du liant vieilli à travers des essais mécaniques, physico-chimiques et rhéologiques. Pour évaluer le vieillissement du liant bitumineux, la spectroscopie infrarouge a été utilisée pour mesurer le degré d'oxydation des liants.

Cependant, il est important de souligner que même si l'essai de simulation proposé permet de suivre l'évolution du matériau dans le temps, il est délicat de comparer la cinétique de vieillissement par rapport à celle du terrain, car chaque chantier est spécifique (dépend des conditions climatiques, des sollicitations, du type de liant). Pour ce faire, une comparaison avec des liants extraits des carottes d'ECF prélevées sur chantier, après 10 années de service, a permis de positionner le vieillissement simulé en laboratoire par rapport à celui in situ et à faciliter l'analyse sur les différents liants (bitume d'émulsion et liant extrait de granulats d'enrobés recyclés à différentes étapes de vieillissement).

5.2 Problématique du vieillissement des ECF

Comme précisé précédemment, la technique des ECF est une technique d'entretien de couche de surface de chaussée en pleine expansion, grâce à ses multiples avantages. Cependant, bien que son application date de plus de 20 ans, il n'existe pas de méthodologies normalisées pour sa formulation, sa caractérisation et son évaluation au cours du temps. En effet, l'ECF est un revêtement pour couche de roulement, il est exposé directement aux UV du soleil qui peuvent engendrer un vieillissement appelé vieillissement photochimique. Ajoutons à cela, l'action du climat et des pneumatiques qui contribuent à la rétractation de la couche des ECF en provoquant ainsi son vieillissement thermique.

Ces deux types de vieillissement (photochimique et thermique) conduisent dans les deux cas à des phénomènes d'oxydation. Malgré ce suivi de l'évolution dans le temps des ECF, il est difficile d'avoir un comparatif entre la cinétique du vieillissement simulé en laboratoire par

rapport et celle du terrain, car les conditions de formulation, de la mise en œuvre et de conditions climatiques (température, humidité, vent et saisons) sont spécifiques pour chaque chantier.

Cependant, même s'il est compliqué de positionner le vieillissement en laboratoire par rapport à celui du terrain, cette comparaison reste primordiale pour l'évaluation des résultats.
L'introduction des GBR dans la formulation des ECF est également un point à évaluer. Même s'il est évident que le recyclage est un avantage environnemental, son introduction dans une technique à froid reste très peu maitrisée. Ceci s'explique par le fait, qu'à froid, on considère que les liants issus des GBR ne se mélangent pas avec les liants neufs.

Tous ces facteurs entrainent un grand nombre d'interrogations qui retiennent toujours notre attention :

- concernant l'évolution du matériau (ECF vierge et recyclé) dans le temps, à savoir comment se passe-t-elle ? Est-elle liée au liant et/ou aux granulats ? Quels types d'essais de vieillissement et de caractérisation pouvons-nous réaliser ? Quels types de méthodes d'évaluations de l'ECF vierge et recyclé pouvons-nous adopter ?
- concernant le vieillissement des ECF à savoir quelles méthodes de vieillissement à adopter afin de pouvoir suivre l'évolution du matériau ? Comment se positionner le vieillissement du laboratoire par rapport à celui du terrain ?
- concernant la position d'ECF comme couche de surface ainsi que sa faible épaisseur à savoir comment dissocier le vieillissement thermique et le vieillissement photochimique ? Quelles conditions peuvent être testées (étuve ventilée ou pas, distance liant /UV dans l'étuve, durée d'exposition…) ?

L'objectif global de ce chapitre est d'évaluer les performances du liant d'un enrobé coulé à froid (ECF) et notamment avec GBR, suite à un vieillissement thermique et UV accélérés en laboratoire, comparativement à celles du liant d'un ECF classique de référence. Ensuite, nous positionnons une référence de l'entreprise Probinord (carottes prélevées sur chantier après 10

ans de service) pour comparer les résultats obtenus en laboratoire avec ceux issus des échantillons prélevés du site.

5.3 Organisation de l'étude

Cette étude a été réalisée suivant les trois axes principaux suivants. Dans un premier temps, nous avons simulé le vieillissement thermique en laboratoire sur les ECF. Nous avons donc caractérisé l'évolution dans le temps d'un ECF classique avec granulats vierges qui a servi de référence. À travers cette partie, nous avons pu mettre en place une méthode de mûrissement/vieillissement thermique des ECF en laboratoire, méthode qui n'existe pas actuellement, à notre connaissance.

La seconde partie de l'étude a été axée sur l'étude du vieillissement photochimique (UV) des ECF. Pour cela, un protocole expérimental en laboratoire a été établi et a permis d'évaluer l'impact des UV sur les ECF vierges qui ont servi de référence. Pour les deux types de vieillissement simulés en laboratoire (thermique et photochimique), des proportions de GBR ont été incorporées dans les ECF. Après adaptation de la formulation d'ECF, nous avons appliqué les méthodes de vieillissement définies pour comparer ses performances et celle des liants récupérés avec celles de l'ECF classique de référence. Une analyse des liants après vieillissement (thermique ou UV) soit globalement ou sélectivement en adaptant une procédure d'extraction progressive a été réalisée.

La troisième partie a concerné l'analyse des liants extraits des carottes d'ECF prélevées sur chantier après 10 ans de service. Cette étape a permis de comparer le vieillissement simulé en laboratoire par rapport à celui in situ.

Pour cela, il nous a tout d'abord fallu effectuer l'état de l'art sur les types de vieillissement.

5.4 Phénomène de vieillissement d'un enrobé bitumineux

5.4.1 Notion de vieillissement

La durabilité et les performances des chaussées dépendent de différents facteurs dont principalement les matériaux choisis. Selon leur nature, leurs propriétés peuvent évoluer dans le temps, notamment de sollicitations climatiques (thermiques et photochimiques), mais aussi mécaniques dues au trafic.

Ce phénomène d'évolution est appelé vieillissement. Les liants bitumineux, constituants de la structure des chaussées, vont évoluer comme toutes autres substances organiques vu leur susceptibilité thermique et cinétique. En effet le bitume est un mélange plusieurs éléments chimiques avec des masses moléculaires différentes. Ces éléments principaux sont : le carbone, l'hydrogène, l'azote et l'oxygène. La proportion de ces composantes varie selon la nature du bitume ainsi que sa méthode de fabrication. Il est usuel de décrire la composition du bitume par deux composants, soit les maltènes et les asphaltènes (Lesueur, 2002). Le phénomène de vieillissement fait également varier la distribution de ces éléments dans la formulation du bitume. Par exemple, lors du vieillissement, il y a une augmentation de la proportion d'asphaltènes due à l'évaporation des fractions légères incluses dans les maltènes (Lesueur, 2002).

Les bitumes sont soumis à des changements dus aux conditions environnementales durant leurs différentes phases d'utilisation (Rebufa et al., 2002). En effet, l'oxydation, causée par l'air et la lumière (Rayons ultraviolets), est connue comme étant un grand facteur contribuant au durcissement du bitume, et elle est amplifiée à haute température. De plus, l'action de l'eau de pluie et des produits dissous de la pollution contribue à aggraver le phénomène du durcissement du liant bitumineux.

Ces phénomènes de vieillissement vont entraîner des modifications irréversibles des caractéristiques mécaniques et rhéologiques des bitumes, ce qui engendrera l'évolution de la structure de la chaussée.

Pour prédire l'évolution des propriétés physico-chimiques des liants bitumineux, il est essentiel de distinguer plusieurs types d'évolution allant du jeune âge (phase de fabrication et mise en œuvre) et celui à long terme (lors de vie en service de la route).

Classiquement pour les matériaux bitumineux, seul le vieillissement thermique est étudié. Le vieillissement photochimique ne concerne que les couches supérieures exposées aux UV et plus précisément les couches très minces, car ce dernier ne se produit que sur de faibles épaisseurs. Cependant, pour un ECF (couche mince de surface), la lumière de jour (dont les longueurs d'ondes du soleil supérieures à 295 nm) figure, avec la température et l'oxygène atmosphérique, parmi les principaux facteurs agissant sur la vitesse d'évolution du liant en accélérant l'oxydation (Mastrofini et Scarsella, 2000; USIRF, 2001).

5.4.2 Evolution des enrobés bitumineux dans le temps

5.4.2.1 Phénomène du vieillissement thermique du liant hydrocarboné

Le vieillissement est un phénomène lié au degré de modification de la structure chimique du bitume. De par sa nature organique, le bitume est exposé à des phénomènes d'évolution et d'altération depuis sa production en raffinerie jusqu'au stade ultime de la vie de l'enrobé sur la chaussée en service, engendrant certains désordres de chaussées (USIRF, 2001). Ce phénomène peut également être influencé par la nature des granulats, certains types de granulat absorbant les fractions huileuses du bitume, ce qui provoque son évolution (Moustapha, 2009). L'évolution du bitume dans le temps se traduit par une augmentation de sa consistance (durcissement), il devient fragile ce qui peut entrainer des phénomènes de fissuration de surface, donc joue sur la durabilité du matériau (Cyna, 2006). Actuellement, c'est principalement le vieillissement thermique qui est étudié et simulé en laboratoire à l'échelle du liant bitumineux. Plusieurs méthodes de simulation de vieillissement sont utilisées pour simuler ce type de vieillissement. Ces méthodes sont détaillées dans les parties qui suivent.

5.4.2.2 Le vieillissement photochimique

Ce type de vieillissement est peu étudié dans le domaine des matériaux de chaussées, mais classiques pour des polymères organiques type polymères ou tout matériau exposé aux UV du soleil. Pour simuler le vieillissement photochimique naturel à l'échelle du laboratoire, un photo-vieillissement artificiel accéléré, permettant d'augmenter la vitesse du vieillissement tout en gardant le même mécanisme réactionnel, peut être effectué (Fayolle et Verdu, 2005).
La simulation du photo-vieillissement artificiel consiste à exposer un matériau, dans un dispositif de vieillissement en laboratoire (enceinte UV), à des conditions (principalement la température et l'humidité) qui peuvent varier (cycliques et amplifiées) par rapport à celles rencontrées lors d'une exposition en extérieur (Fayolle et Verdu, 2005).L'apport d'une grande quantité d'énergie *hv* cause l'oxydation violente du matériau. Ceci accélère les phénomènes d'oxydation et de polymérisation.

À l'échelle des matériaux bitumineux, les travaux de Mouillet et Dumas (2008) montrent que l'exposition aux rayons UV, d'un liant bitumineux de 10 μm d'épaisseur à une température de 60°C, engendre une oxydation plus violente que le vieillissement thermique seul (à la même température) (figure 5.1) (Durrieu F, Farcas F et V., 2007).

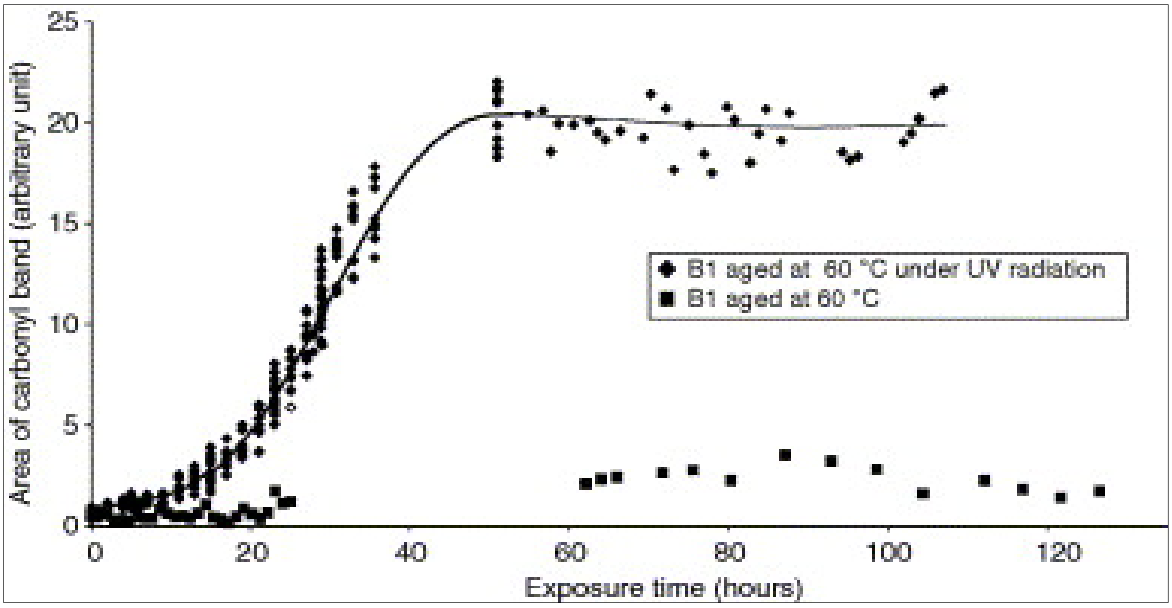


Figure 5.1 Comparaison du vieillissement du bitume à 60°C avec et sans exposition aux UV
Tirée de Durrieu F, Farcas F et V. (2007)

5.4.2.3 Mécanisme du vieillissement thermique et photochimique d'un liant bitumineux

Le processus du vieillissement consiste en une absorption d'un photon. Cette absorption va transformer l'espèce absorbante dans l'état A à l'état excité [A]* (un niveau électronique d'énergie plus élevée). Cette transformation va donc conférer à la molécule une réactivité qu'elle n'a pas à l'état fondamental (Ramond et Such, 1990). Dans le cas des matériaux de chaussés, ce procédé se réalise en présence d'oxygène ; on parle alors de photo-oxydation.

Dans le cas d'une matière bitumineuse, l'oxydation photochimique ou thermique se traduit par une rupture des chaines de carbone qui la constituent, afin de créer des groupements carbonyles C=O ou bien des groupements sulfoxydes S=O. Lors de ce processus, on constate un approvisionnement en éléments cycliques (aromatiques) et une augmentation de la teneur en résine puis en asphaltènes (molécules les plus lourdes du bitume). D'une manière plus générale, lors de l'oxydation du bitume, de nouveaux sites plus polaires se créent. L'apparition

des nouveaux sites pousse les molécules de bitume à s'organiser d'une façon plus structurelle (orientation préférentielles), ce qui engendre un durcissement du bitume. Les mécanismes de formation de ces groupements sont détaillés sur les Figures 5.2 et 5.3, (Ramond et Such, 1990).

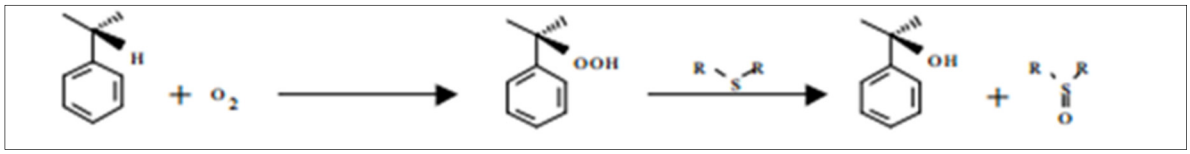


Figure 5.2 Formation des sulfoxydes
Tirée de Ramond et Such (1990)

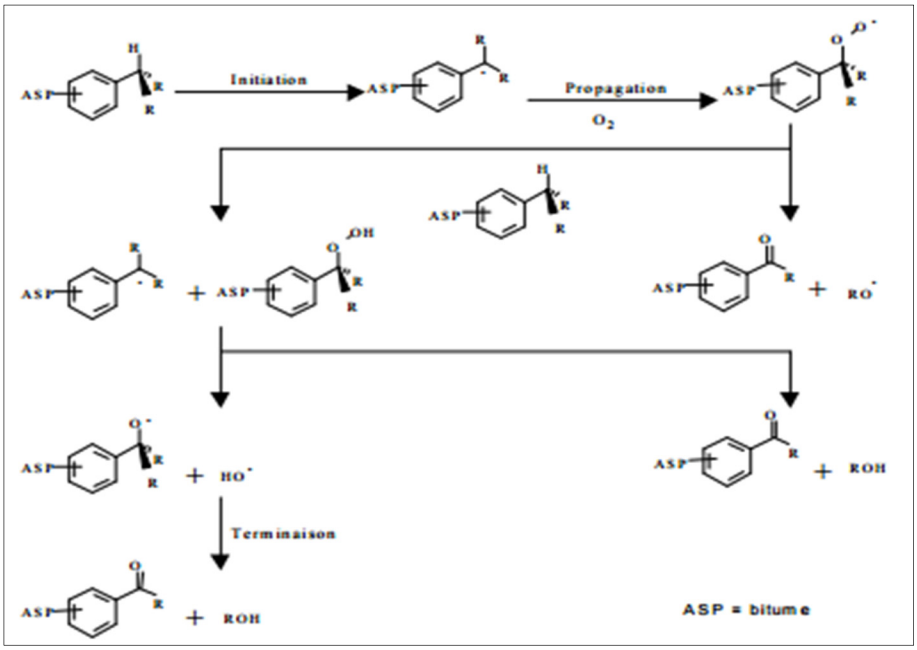


Figure 5.3 Mécanismes radicalaires de formation des carbonyles
Tirée de Ramond et Such (1990)

Pouvoir prédire l'évolution du comportement d'un bitume dans un enrobé, revient toujours à décrire son vieillissement: le vieillissement par oxydation chimique et le durcissement en fonction du temps. Il est donc impératif de préciser les principales évolutions d'un bitume.

Lorsque le bitume a atteint un niveau important de durcissement, il devient fragile ce qui se manifeste aux surfaces d'adhésion avec le minéral de l'enrobé et peut entraîner des phénomènes de fissuration de surface principalement par fatigue thermique. On distingue deux processus de vieillissement des bitumes (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 Les deux processus de vieillissement des liants bitumineux
Adapté de Lesueur (2002)

Le vieillissement physique	Le vieillissement chimique
Une augmentation de la viscosité sans modification chimique des constituants	Modification de la composition chimique du bitume (augmentation de la teneur en Asphaltènes et création de liaison carboxyles C=O et sulfoxydes S=O au sein du bitume.) **Au cours de l'enrobage** • les granulats sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant **Sur site pendant la durée de vie de l'enrobé** • c'est le vieillissement à long terme. Il dépend de la région, de la température et de la durée de sollicitation

5.4.2.4 Comparaison entre le vieillissement thermique et photochimique

Des travaux antérieurs (Mouillet et al., 2014) ont montré que, contrairement au vieillissement photochimique qui est un phénomène surfacique , le vieillissement thermique est un phénomène homogène à long terme. Les mécanismes des réactions d'oxydation ayant lieu au cours de ce vieillissement sont alors les mêmes à la surface qu'au fond du liant bitumineux. Le vieillissement photochimique est un phénomène de surface ; en effet, les rayons UV ne

pénètrent que quelques micromètres au sein d'un matériau. Les réactions d'oxydation se produisent principalement à la surface du bitume. La vitesse de ces réactions d'oxydation dépend alors de l'épaisseur du liant (Durrieu F, Farcas F et V., 2007; Mouillet et al., 2014). Cette étude a été menée selon deux grandes parties complémentaires : une première partie réalisée à l'échelle de l'émulsion et de l'ECF de référence (ECF avec des granulats neufs), suivie par une deuxième partie adaptée à l'échelle de l'ECF avec des GBR. Dans les deux parties de notre étude, on suit l'évolution du liant sous des conditions de vieillissement thermique et photochimique par des mesures rhéologiques, des essais de spectroscopie infrarouge, et par des essais conventionnels (TBA, pénétration) pour une période allant de 1 à 21 jours à 44°C.

5.4.3 Méthodologies de vieillissement accélérées en laboratoire

Ces méthodologies permettent de simuler les différents stades de l'évolution des matériaux routiers ou de leur liant (bitume ou émulsion de bitume) en laboratoire. Pour cela, il existe plusieurs méthodes dont la plupart consistent à mettre l'échantillon dans une étuve, dans des conditions spécifiques (température, ventilation d'air, etc.), pour accélérer le processus de vieillissement à court terme ou à long terme. Cependant, ces méthodes de vieillissement thermique ne permettent de savoir la durée exacte de vieillissement réalisé sur chantier . Parmi ces méthodes, certaines ne s'appliquent que sur le liant c'est-à-dire le bitume ou l'émulsion de bitume, et d'autres s'appliquent sur le matériau (enrobé à chaud ou à froid) lui-même. Une fois, ces essais réalisés, le liant du matériau (bitume) peut être extrait, récupéré, et faire l'objet de caractérisation selon les essais spécifiques. Le vieillissement à court terme, représente l'évolution de l'enrobé bitumineux de sa fabrication jusqu'à sa mise en œuvre, tandis que le vieillissement à long terme représente son évolution après la mise en œuvre (après l'ouverture sous trafic).

Les différentes méthodes de vieillissement accéléré en laboratoire sont décrites dans la suite :

- méthode RILEM : La méthode RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux) est une méthode européenne non normalisée, adaptée au vieillissement

accéléré sur enrobé à chaud. Elle consiste à stocker l'enrobé foisonné après sortie du malaxeur en laboratoire, dans une étuve ventilée, afin de simuler le vieillissement à court terme (transport sur chantier après fabrication et mise en œuvre) et le vieillissement à long terme (sur chaussée). Pour cela, les échantillons sont stockés à l'étuve pendant 4 heures à 135°C pour le vieillissement à court terme, et 9 jours à 85°C pour le vieillissement à long terme. Cependant, cette méthode tout comme les autres ne permet pas de connaitre le temps réel de vieillissement qu'a subi le liant bitumineux (pas de corrélation avec le chantier). Ce temps est souvent estimé entre 7 et 10 ans (De La Roche et al., 2013);

- méthode LCPC (Juin 1987): Cette méthode est tirée d'un travail publié en juin 1987 par le Laboratoire Central des ponts et chaussées (LCPC) qui portait sur la caractérisation des liants modifiés pour enduits superficiels. En pratique, le liant stabilisé est obtenu par étuvage à 50°C (étuve ventilée) pendant 15 jours d'un film mince de 1 mm pour les liants fluxés et d'une épaisseur correspondant à 1 mm de liant résiduel pour les émulsions. Dans ce cas la rupture est obtenue par simple évaporation de l'eau à 50°C. Le liant vieilli est obtenu également par un étuvage dont la durée est portée à 21 jours, la température à 70°C et l'épaisseur à 3mm. Les essais sont réalisés conformément aux normes AFNOR (LCPC, 1987);
- le test RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) : l'essai RTFOT simule en laboratoire le vieillissement subi par du liant bitumineux lors de la fabrication de l'enrobé à chaud dans la centrale d'enrobage. En référence à la norme européenne EN 12607-1, l'essai RTFOT comprend huit bouteilles de verre contenant chacune 35 g de bitume, disposées dans un contenant en rotation, à l'intérieur d'un four. Il se fait à haute température de 163°C pendant 75 minutes, quel que soit le grade de bitume testé. L'essai permet d'exposer tout le bitume (en film mince) à la chaleur et à l'air pulsé, et le mouvement continu du dispositif permet de s'assurer qu'aucune peau ne se développe à la surface du bitume pour le protéger ;
- le test PAV (*Presure Aging Vessel*): L'essai de PAV est utilisé en laboratoire pour simuler le vieillissement sur chaussée à long terme. Il est appliqué généralement sur le liant récupéré. Au cours de cet essai, le bitume est soumis à une pression de 2.1MPa et à une

température de 100°C durant 20 heures (Norme NF EN 14769). Il est classiquement réalisé après l'essai RTFOT.

Initiée par une approche uniquement thermique (simulation du vieillissement thermique), cette étude est complétée par une simulation de vieillissement photochimique dont les phénomènes sont comparés en utilisant une procédure qui combine les étapes de stabilisation et de vieillissement d'un liant bitumineux. Parallèlement à l'évolution de l'ECF classique, celle de l'émulsion de bitume utilisée est également étudiée. Une étude sur l'évolution d'ECF avec incorporation de GBR permettra de comparer l'effet de recyclage sur les propriétés des ECF. Une synthèse des essais de caractérisation permettra, par la suite, de conclure quant aux performances du liant de l'ECF classique et de l'ECF avec GBR et de dégager les limites de la méthode et ses perspectives éventuelles.

5.5 Démarche expérimentale adoptée pour la simulation du vieillissement thermique et photochimique

5.5.1 Méthode de vieillissement thermique et UV accélérée en laboratoire adoptée

Pour simuler le vieillissement accéléré (thermique ou UV) de l'ECF en laboratoire dans cette étude, nous avons convenu de combiner la méthode RILEM en modifiant la phase préalable (simulation de la stabilisation de l'ECF) et la méthode LCPC, comme précisé dans la partie étude bibliographie :

- la méthode RILEM est une référence pour le vieillissement accéléré à long terme sur enrobés à chaud. Il s'agit d'une méthode de plus en plus utilisée par les industriels (De La Roche et al., 2013; Pierard et Mouillet, 2014);
- la méthode dite LCPC est appliquée sur les enduits superficiels à base d'émulsion qui sont très proches des ECF. En plus ces deux méthodes sont applicables sur le matériau contrairement aux autres méthodes qui s'appliquent sur le liant (bitume ou émulsion de bitume).

Avant le vieillissement du matériau (thermique ou UV), il sera tout d'abord réalisé une première étape qui va consister à le stabiliser. La stabilisation a pour but d'évacuer toute l'eau et les fractions volatiles contenues dans le matériau. Cette étape est importante sur le terrain car elle permet de reprendre le trafic. Pour cela, nous allons utiliser la méthode décrite dans la norme NF EN 13074-1, applicable sur le liant (bitume ou émulsion), et qui consiste à mettre, dans notre cas d'étude, soit le liant de l'émulsion soit l'enrobé en étuve ventilée à 50°C pendant 24 heures pour l'évaporation de l'eau. La méthode LCPC, décrite en 1987, effectue une stabilisation à 50°C pendant 14 jours. En matière de vieillissement, la procédure RILEM propose un vieillissement de 9 jours à 85°C en étuve ventilée et la méthode LCPC de 21 jours à 70°C.

Nous avons donc défini le protocole d'ensemble suivant : Il va consister à mettre nos échantillons à l'étuve à 50°C pendant 24 heures pour simuler la stabilisation de l'ECF (évacuation d'eau et disparition des fractions volatiles, etc.), à savoir même étape pour les deux types de vieillissement (thermique et photochimique (UV)).

Ensuite, la deuxième étape consiste à augmenter la température à 85°C toujours en étuve ventilée pendant une durée allant de 1 jour à 14 jours pour le vieillissement thermique afin de simuler le vieillissement à long terme. Cette température a été choisie pour accélérer le vieillissement mais tout en restant dans des conditions réalistes. En ce qui concerne le vieillissement photochimique, la deuxième étape consiste à baisser la température à 44°C pour une période allant de 1 à 21 jours pour simuler le vieillissement UV. Cette durée ainsi que la température ont été définies en se basant sur des études antérieures réalisées sur les bitumes (Durrieu et al., 2007; Mouillet et al., 2014). Au cours de cette étape, nous avons également simulé le vieillissement thermique à 44°C afin d'avoir une comparaison entre les deux types de vieillissement a la même température.

Il est à noter que la stabilisation sera suivie par une mesure de la perte de masse (des échantillons d'ECF après chaque jour de vieillissement) et que l'ECF ne pourra pas être re-malaxé lors de sa phase de mûrissement/vieillissement, contrairement à la procédure RILEM).

5.5.2 Organisation de l'étude pour la simulation du vieillissement thermique et le vieillissement photochimique

L'étude du vieillissement thermique et photochimique a été réalisée en deux parties successives, tout d'abord sur l'ECF de référence puis sur l'ECF avec recyclé. Ces programmes détaillent bien la nature, l'objectif et le principe de chaque essai. Les plans expérimentaux sont présentés dans les parties qui suivent.

5.5.2.1 Procédure expérimentale du vieillissement thermique

La procédure expérimentale diffère selon qu'il s'agit de l'ECF de référence ou l'ECF avec GBR :

- ECF de référence (Figure 5.4) : dans un premier temps 4 échantillons d'ECF ont été fabriqués avec granulats vierges (1,5 cm d'épaisseur), et 4 échantillons d'émulsion seule de 3 mm d'épaisseur. Après validation de la formule par des essais d'abrasion, de cohésion, et de cassure (HCT), chaque échantillon est mis à l'étuve à 50°C pendant 24 heures pour la phase de stabilisation, suivie par pesées. Ensuite, s'en suit la phase de vieillissement en laissant ces mêmes échantillons dans l'étuve, mais cette fois-ci à une température de 85°C à une durée allant de 1 à 14 jours pour le vieillissement thermique selon notre méthode calée (RILEM + LCPC). Pour chaque stade de mûrissement/vieillissement donné (1er, 5ème, 9ème et 14ème jour), le liant vieilli est extrait et récupéré à l'aide de l*'asphalt analyser* et de l'évaporateur rotatif, pour réaliser les essais de caractérisation retenus à savoir : TBA, pénétrabilité, rhéologie (module complexe et angle de phase avec le rhéomètre Kinexus), et spectroscopie infrarouge ;
- ECF avec recyclés (Figure 5.5) : nous avons tout d'abord caractérisé les GBR (analyse granulométrique, teneur en liant, identification du liant des GBR). Ensuite, nous avons incorporé dans l'ECF des proportions des GBR allant de 20 à 100%. Après validation des formulations, nous avons réalisé 4 échantillons, et suivi le même protocole de caractérisation que pour ECF avec granulats vierges, et enfin comparé les deux résultats.

Il est important de souligner que le liant extrait et récupéré dans cette partie est un liant moyen (mélange entre liant neuf et liant issu des GBR). Cependant, sur chantier, l'homogénéisation parfaite et complète des deux liants n'est pas aussi évidente.

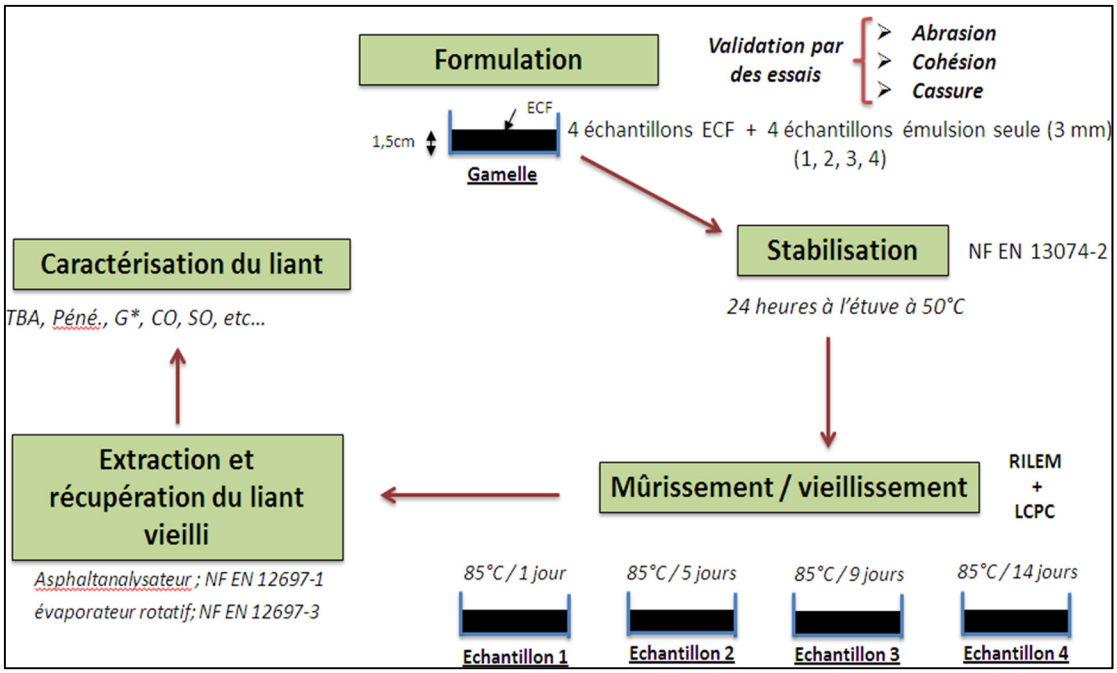


Figure 5.4 Plan d'essais de l'ECF de référence

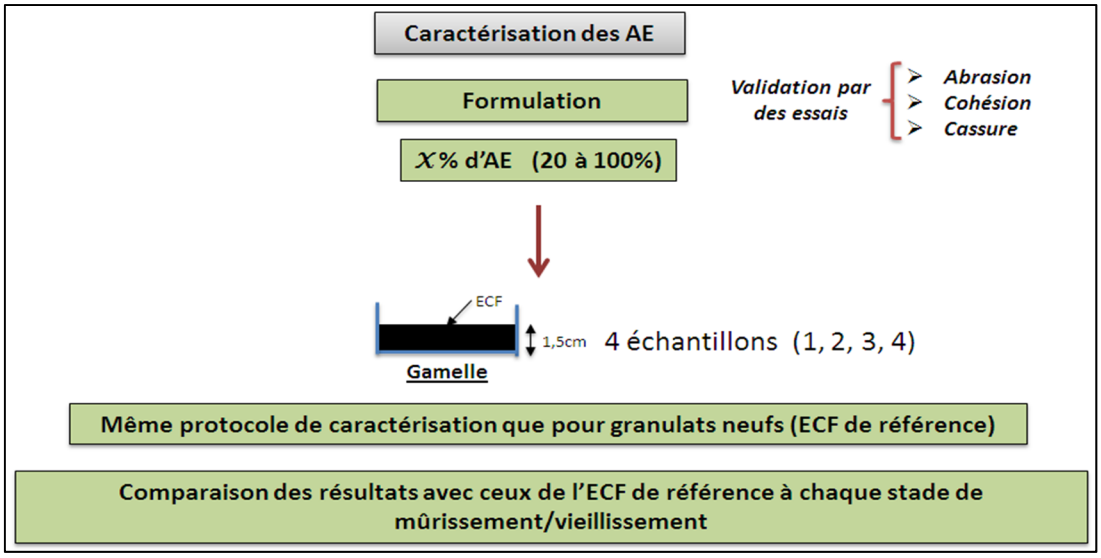


Figure 5.5 Plan d'essais ECF avec GBR

5.5.2.2 Procédure expérimentale du vieillissement photochimique et thermique a 44^{o}C pendant 21 jours

La procédure du vieillissement photochimique comporte principalement deux étapes, dont une de stabilisation (émulsion/ECF avec et sans GBR) pendant 24 heures à 50°C dans le but d'évacuer l'eau et les fractions volatiles. Cette étape est similaire à celle réalisée précédemment dans la première partie (vieillissement thermique).

La seconde étape est un vieillissement accéléré en laboratoire pour simuler les vieillissements thermiques et photochimiques simultanément afin d'établir une comparaison à une même température de 44°C. Les échantillons, issus de la première étape (24 heures à 50°C), ont été placés respectivement dans une étuve ventilée et une enceinte équipée des lampes UV, à une température de 44°C, pendant une durée allant de 1 à 21 jours en prenant comme référence des travaux antérieurs réalisés par Virginie Mouillet (Mouillet, 2008). La durée d'exposition ainsi que la température sont différentes du vieillissement thermique effectué dans la première partie (nous avons utilisé une température de 44 °C pendant 21 jours au lieu d'une exposition pendant 14 jours à 85°C pour simuler les deux types de vieillissement).

Le logigramme de la figure 5.6 présente les différentes étapes réalisées durant cette partie parallèlement sur les émulsions, ECF vierge et ECF recyclé.

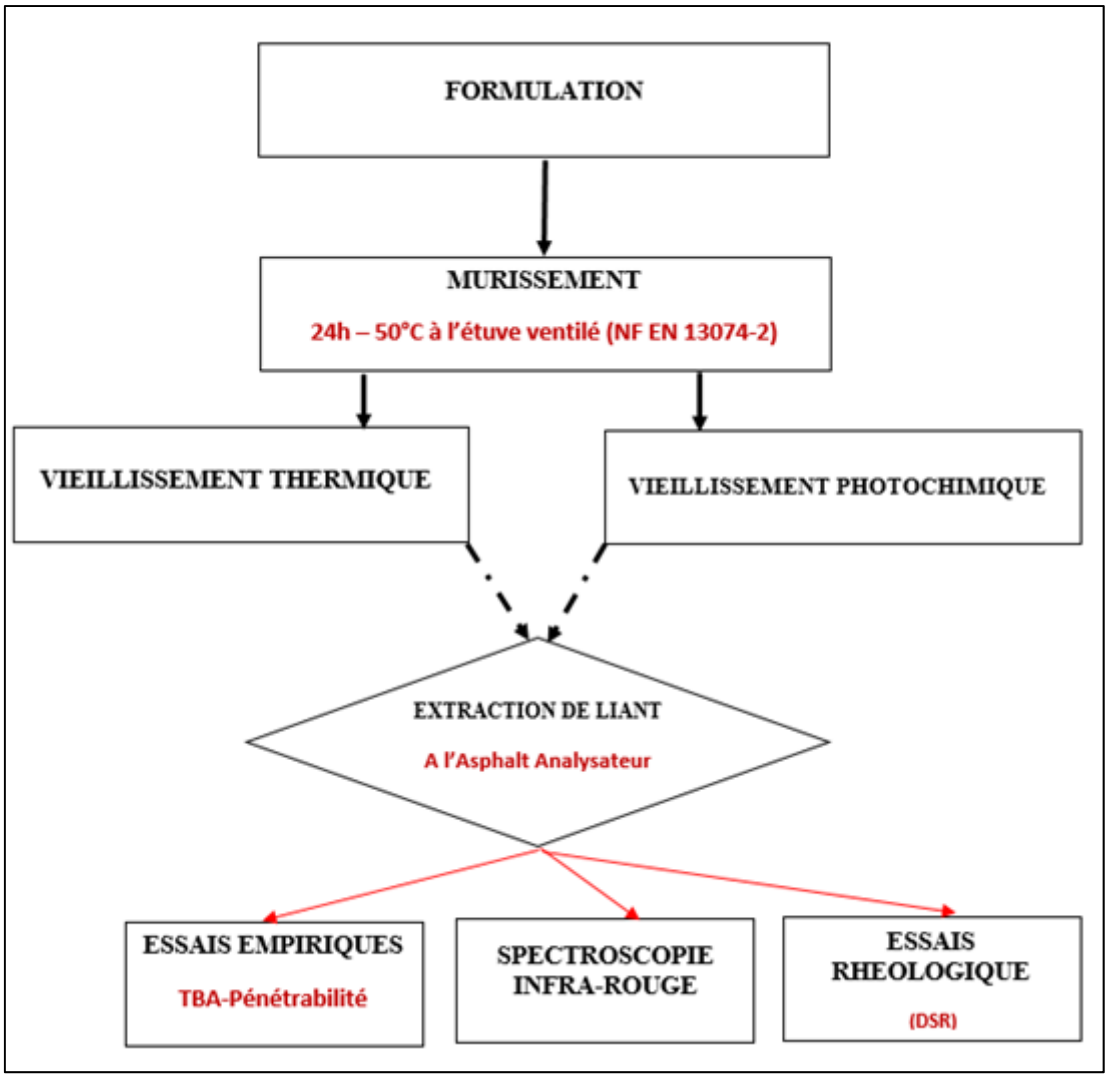


Figure 5.6 Le logigramme des différentes étapes mûrissement /Vieillissement (thermique et UV) sur émulsion, ECF vierge et ECF recyclé

5.5.3 Matériaux et matériels utilisés pour la procédure du vieillissement thermique et photochimique

5.5.3.1 Matériaux de base

Les matériaux utilisés dans ce chapitre ont été fournis par l'entreprise Probinord. Il s'agit de matériaux contrôlés, avec fiche technique à l'appui, ce qui nous permet d'avoir toutes les informations concernant leur origine et composition. Les matériaux sont classiques et

identiques à ceux utilisés sur chantier. Les propriétés des matériaux de base sont décrites dans le chapitre 3 (section matériaux utilisés pour les essais effectués en France), voir Annexe 1.

5.5.3.2 Formules étudiées

Les formules de l'ECF de référence et de l'ECF avec GBR ont été calées sur la base de la nature de ces matériaux (teneur en eau des granulats et de l'émulsion, pH et viscosité de l'émulsion, viscosité). Afin de maîtriser au mieux nos paramètres de formulation, nous avons choisi d'utiliser des granulats vierges secs, que nous avons pré-mouillés pour les ramener à l'état d'humidité initiale 4.2% (état hydrique envisagé sur chantier). Il est à noter que, la teneur en eau du granulat humide varie de façon considérable pendant le stockage au laboratoire compte tenu des variations de température, et cela joue énormément sur la formulation. Les étapes de formulations sont décrites dans le chapitre 3. Les formulations utilisées sont rassemblées dans l'Annexe 1.

5.5.3.3 Matériels retenus pour la caractérisation des essais de vieillissement thermique et photochimique

Pour la validation de la formulation, nous avons réalisé des essais d'abrasion et de cassure (HCT). Ces essais empiriques sont très pertinents, car ils permettent d'évaluer certaines propriétés de l'ECF, indispensables pour assurer ses fonctions, comme la vitesse de montée en cohésion qui influe le délai de réouverture sous trafic. Les essais ont montré des résultats satisfaisants tant pour les ECF vierges que pour les ECF avec 50% de GBR avec des temps de cassures respectivement de 3,2 min et de 17 min. Ces résultats ont été jugés importants par notre partenaire industriel Probinord.

Pour la caractérisation des liants, il faut tout d'abord récupérer le liant présent dans l'ECF (séparation de la partie granulaire et organique). Nous avons utilisé l'*asphalt analyser* pour l'extraction du liant et l'évaporateur rotatif pour la récupération selon la norme européenne NF EN 12697-3.

Le liant récupéré est ensuite caractérisé par les essais suivants :

- caractérisations conventionnelles : les essais de température bille-anneau et de pénétrabilité sont deux essais incontournables en Europe pour une étude sur liants bitumineux. Ils évaluent la consistance du bitume, paramètre très illustratif du vieillissement, car un bitume vieilli devient plus dur donc consistant, selon les normes en vigueur ;
- caractérisation rhéologique : cet essai permet de déterminer le module complexe, l'angle de phase, et le domaine de comportement viscoélastique linéaire. Nous avons utilisé un rhéomètre Kinexus (Malvern Instrument), permettant de travailler sur une large gamme de température et de fréquence. La norme en vigueur pour les liants bitumineux est la norme NF-EN 14770 ;
- caractérisation par spectroscopie infrarouge : cet essai physico-chimique permet d'apprécier le degré d'oxydation du liant de l'ECF après vieillissement, par analyse des bandes carbonyles CO présentes ou non dans le liant. La spectroscopie nous permet également de valider la méthode de vieillissement accéléré adoptée (RILEM + LCPC) décrite ci-après.

5.6 Résultats et discussion

5.6.1 Caractérisation des matériaux de formulation en vue de l'étude thermique et photochimique

5.6.1.1 Analyse de la granulométrie des granulats vierges et GBR

Nous avons comparé la granulométrie des matériaux 0/6 neufs et des GBR non désenrobés (Figure 5.7).

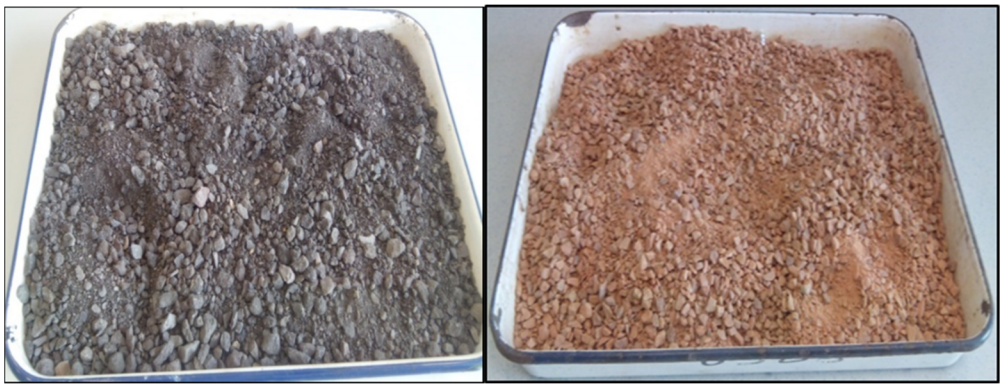


Figure 5.7 Granulats vierges 0/6 continus- GBR 0/6 continus

Les résultats des essais de granulométrie effectués sur les granulats vierges et les GBR (Cf chapitre 3) ont confirmé que les deux matériaux sont bien de granularité 0/6 mm. Il a été constaté un écart entre les deux granulométries (granulats vierges et GBR) montrant une plus grande finesse du granulat vierge 0/6 mm. La granulométrie des GBR est réalisée sur granulats enrobés contrairement aux granulats vierges (cela sous-entend que le bitume d'enrobage déjà vieilli ne se mélange pas après la fabrication de l'ECF), le liant bitumineux reste collé aux granulats et empêchent la libération des fines. Les GBR contiennent ainsi très peu de fines (les tamis < 1 mm), ce qui peut jouer considérablement sur les performances de l'ECF (les fines combinées au bitume jouent le rôle de mastic et favorise la consolidation des grains entre eux). Il sera donc nécessaire, lors de l'ajout des GBR dans les ECF, d'ajouter des fines pour corriger la courbe granulométrique, de sorte qu'elle se rapproche le plus possible de celle des granulats vierges.

5.6.1.2 Caractérisation du liant d'apport et du bitume d'enrobage des GBR

Essais conventionnels

Le liant d'apport pour l'ECF avec recyclé est une émulsion C60 faite à base de bitume pur, de grade 70/100 identique à l'émulsion utilisée pour l'ECF de référence, afin d'avoir une bonne concordance entre les procédés. Les résultats des essais de température bille-anneau et de pénétrabilité sont présentés sur le graphique ci-dessous (Figure 5.8). Ils montrent un bitume

pur assez mou, de grade 70/100 conformément aux valeurs de la fiche technique donnée par le fournisseur, tandis que le bitume vieilli des GBR est très dur, de classe 10/20. Ce résultat est classique pour un liant des GBR, cependant il ne nous permet pas de connaitre l'âge du bitume vieilli.

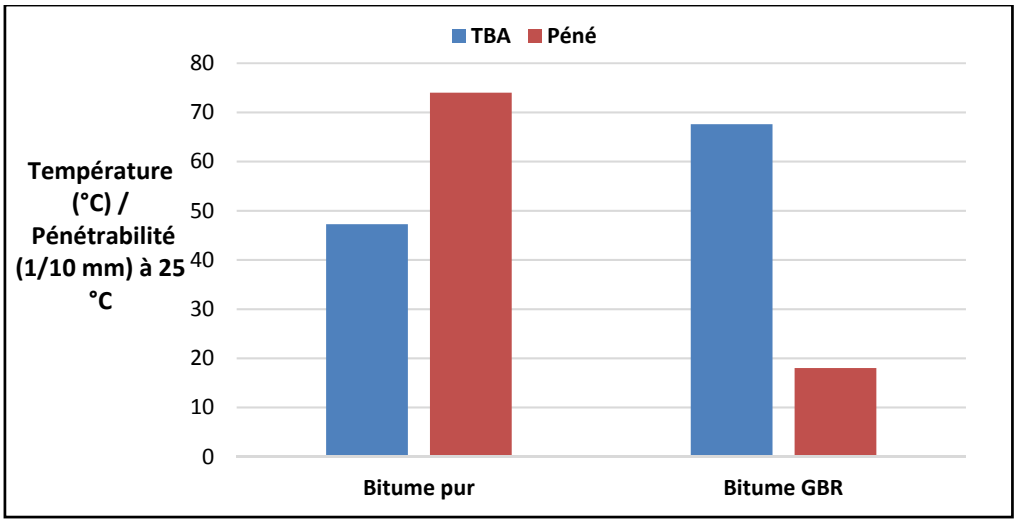


Figure 5.8 Résultats des essais TBA et pénétrabilité pour le bitume pur et le bitume des GBR

Essai de spectroscopie infrarouge

Les fonctions impliquées dans le vieillissement chimique du liant bitumineux sont les carbonyles et les sulfoxydes. La spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) est la technique de caractérisation la plus précise pour repérer, au cours du vieillissement, l'apparition ou l'évolution de ces deux groupements chimiques dosés par rapport à des groupements chimiques non évolutifs (essentiellement les groupements aliphatiques) (Durieu et al., 2007) Cette méthode se base sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé (le bitume dans notre cas).

L'analyse ses spectres du bitume pur et du bitume des GBR en spectroscopie infrarouge conduisent aux spectres présentés dans la Figure 5.9. Les pics carbonyle (CO) et sulfoxydes (SO) qui sont représentés sur le graphique à 1700 et 1045 cm^{-1} sont les pics de référence qui

traduisent bien le vieillissement d'un liant bitumineux. Plus le pic est important et plus le liant est vieux.

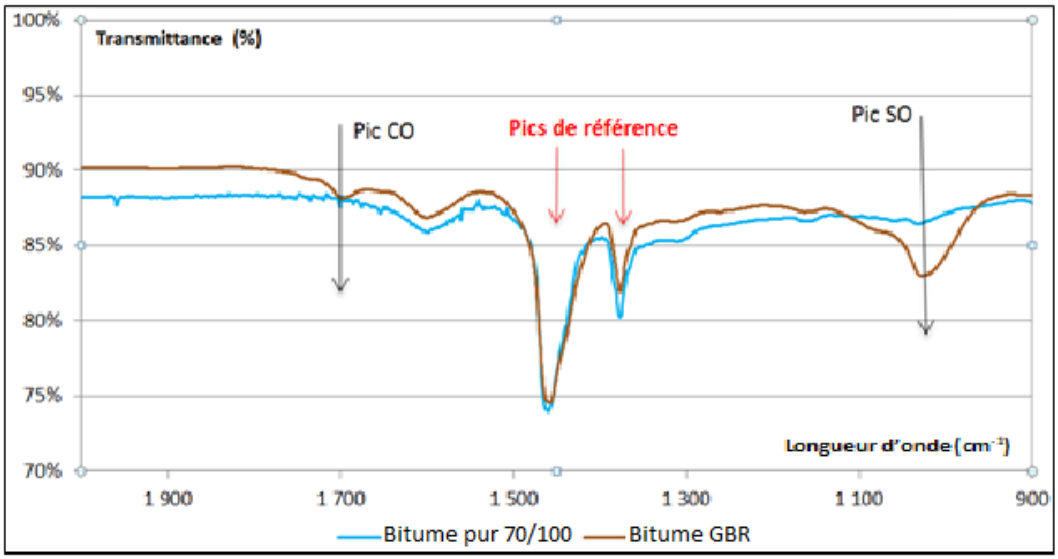


Figure 5.9 Spectres Infrarouge du bitume pur et du bitume GBR après zoom

Nous pouvons constater que le pic CO est quasiment inexistant sur le spectre du bitume pur, et est assez important sur le spectre du bitume GBR. Cependant, nous remarquons un petit pic SO sur le spectre du bitume pur, et ce pic est plus important sur le bitume GBR. Il peut arriver qu'un spectre de bitume pur présente un pic de SO dû au processus de fabrication du bitume. C'est pourquoi il est plus pertinent de se référer plus précisément au pic CO pour quantifier le vieillissement ou non d'un bitume.

La spectroscopie infrarouge permet donc de mesurer les absorbances d'énergie des liaisons chimiques des groupements carbonyles et sulfoxydes présents dans le bitume et de les corréler à leurs concentrations, puisque l'intensité de l'absorption est directement proportionnelle à la concentration de la molécule considérée (Durieu et al., 2007).

Plus particulièrement, l'indice carbonyle est déterminé comme étant le rapport de l'aire du pic de la liaison C=O (AC=O), situé à 1700 cm^{-1} sur l'aire de deux pics des liaisons C-H des

groupements aliphatiques du liant (Aaliph) dits pics de références, situés à 1450 et 1370 cm^{-1}. De la même manière, l'indice sulfoxyde est défini comme étant le rapport de l'aire du pic de la liaison S=O (AS=O), pic situé à 1030 cm^{-1}, sur Aaliph (Figure 5.10).

- $I = \frac{a}{A} * 100$ avec;
- $I =$ indice d'oxydation;
- $a =$ aire du pic CO (Voir Annexe 2);
- $A =$ aire des pics de référence (Voir Annexe 2).

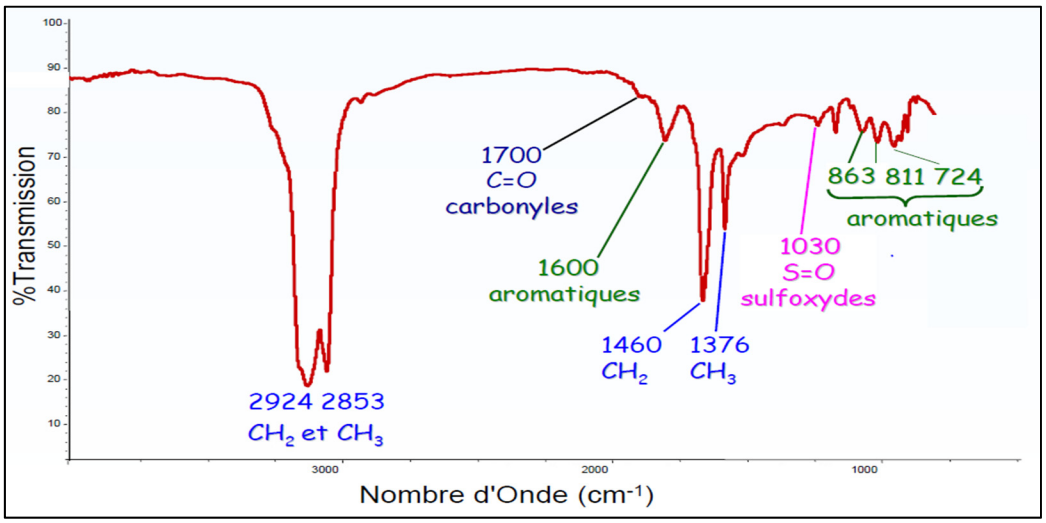


Figure 5.10 Spectre classique d'un bitume obtenu par IRTF
Tirée de Durieu et al. (2007)

Après calcul selon la méthode détaillée plus haut, nous obtenons les résultats présentés dans le tableau 5.2. Nous constatons sur le tableau que l'indice d'oxydation du bitume pur est faible (0,04) contrairement à celui du bitume des GBR qui est élevé (3,54). Cela confirme que le liant du bitume des GBR est vieilli. Ces résultats sont importants pour la suite de l'étude, car ils constituent les deux références sur nos matériaux avant processus de vieillissement.

Tableau 5.2 Indices d'oxydation du bitume pur et du bitume des GBR

	Aire du pic CO	**Aire des pics de référence**	**Indice d'oxydation**
Bitume pur	0,00	3,54	0,04
Bitume GBR	0,15	4,29	3,54

Détermination du module complexe de cisaillement et de l'angle de phase du bitume pur et du bitume de GBR en fonction de la fréquence

La caractérisation du comportement mécanique a consisté à déterminer le module de cisaillement complexe et l'angle de phase qui sont deux grandeurs qui traduisent bien le comportement des matériaux viscoélastiques comme le bitume. Le Rhéomètre Kinexus utilisé pour nos essais nous a permis de déterminer ces deux grandeurs pour le bitume pur et le bitume des GBR. Nous avons utilisé deux types de plans, dont un PP8 (module plan de diamètre 8 mm) et un PP25 (module plan de diamètre 25 mm) sur lesquels les échantillons sont placés avant d'appliquer une contrainte de cisaillement de 200 Pa, en faisant varier la fréquence de 0 à 10 Hz à une température fixe. Pour le PP8 nous avons utilisé des températures faibles allant de - 10 à 30°C contre des températures élevées pour le PP25 allant de 30 à 60°C.

La Figure 5.11 montre les représentations graphiques des modules complexes de cisaillement en fonction de la fréquence et aussi les angles de phase en fonction de la fréquence et cela pour le bitume pur et le bitume des GBR, en PP8 et en PP25 (Voir Annexe 2). Nous pouvons constater sur le graphique 5.11 que les modules complexes du bitume des GBR sont plus élevés que ceux du bitume pur, ce qui est normal et permet de confirmer que le bitume des GBR est très rigide (dur) donc très vieux. Les résultats des angles de phase du bitume des GBR sont également très faibles par rapport à ceux du bitume pur, ceci permet de confirmer la conclusion précédente, car nous savons que plus l'angle de phase est faible, plus le matériau est dur (Voir Annexe 2).

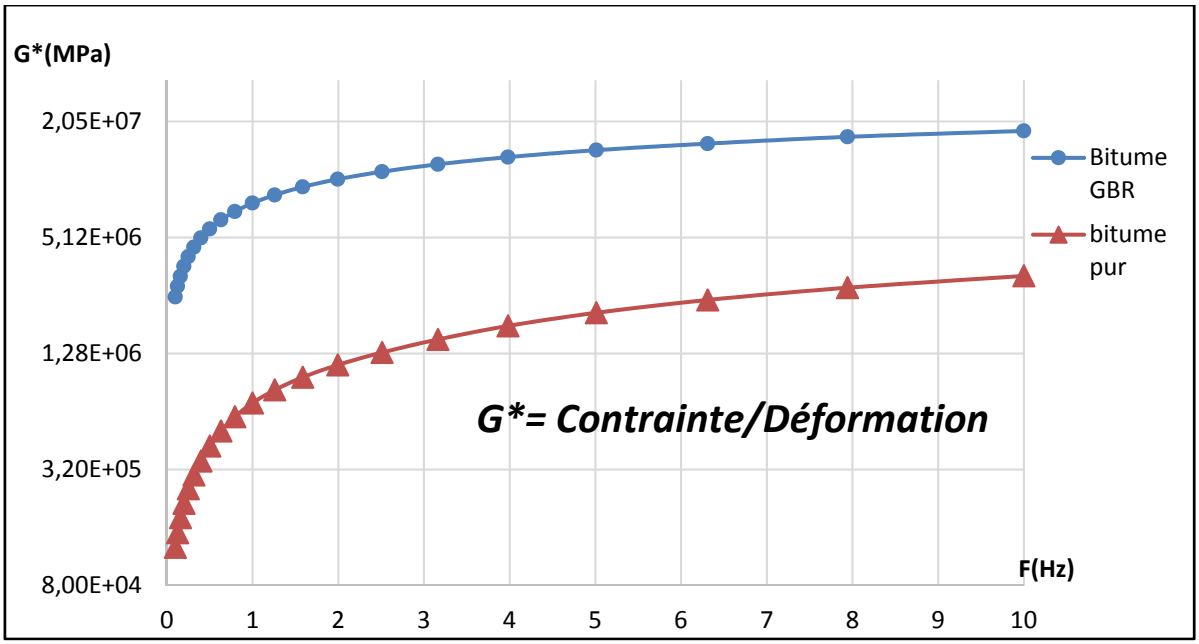


Figure 5.11 Courbes module complexe (G*) en fonction de la fréquence (F(f)) à 20°C en PP8

5.6.2 Étude du vieillissement thermique des ECF vierges et des ECF avec GBR

La validation des formulations des ECF vierges et des ECF recyclés a été faite sur la base des essais d'abrasion, de cohésion Benedict et de cassure (HCT). Ces essais qui ont été réalisés au sein du laboratoire de l'entreprise Probinord, nous ont permis de vérifier la validité des formulations, à savoir les ECF de référence, ECF 20% GBR et ECF 50% GBR.

Les résultats de la cohésion ont montré des temps de cassure satisfaisants pour tous les ECF vierges et recyclés, et ont été jugés suffisants pour reprendre le trafic. On a obtenu des temps plus élevées dans le cas des ECF 50% GBR. Ceci est dû à la présence des fibres dans les formulations des ECF avec plus de 20 % de GBR qui ont contribué à améliorer la cohésion et donc la rigidité de l'ECF. Les temps de cassure respectifs sont de 17 min, 2,4 min et 3,2 min pour les ECF 50% GBR , ECF 20% GBR et ECF de référence, après un temps de cure de 30 minutes.

5.6.2.1 Évaluation des performances du liant

Après fabrication des échantillons d'ECF, et validation de la formule, ceux-ci sont laissés à l'étuve à 50°C pendant 24 heures pour évacuer toute l'eau ; ce qui correspond à la phase de stabilisation. Après cette phase, les échantillons, qui sont au nombre de 4 ECF (d'épaisseur 1,5 cm) et 4 émulsions (d'épaisseur 3 mm) sont stockés à nouveau à l'étuve, cette fois-ci à 85 °C pendant 14 jours pour le mûrissement/vieillissement selon les deux méthodes combinées RILEM+LCPC décrites auparavant. Les échantillons sont ensuite retirés continuellement de l'étuve selon la chronologie présentée au plan expérimental (Figure 5.12). En effet, après le premier jour (J1) de vieillissement deux échantillons sont retirés de l'étuve dont un d'ECF et un d'émulsion, sur lesquels nous effectuons une extraction et récupération du liant vieilli qui est ensuite analysé par les essais de caractérisation. Nous réalisons ensuite, respectivement le même processus pour le 5ème, 9ème et 14ème jour de vieillissement ; ce qui nous permet de suivre en temps réel l'évolution des caractéristiques de l'ECF comparativement à celles de l'émulsion, à chaque stade (nombre de jours de vieillissement).

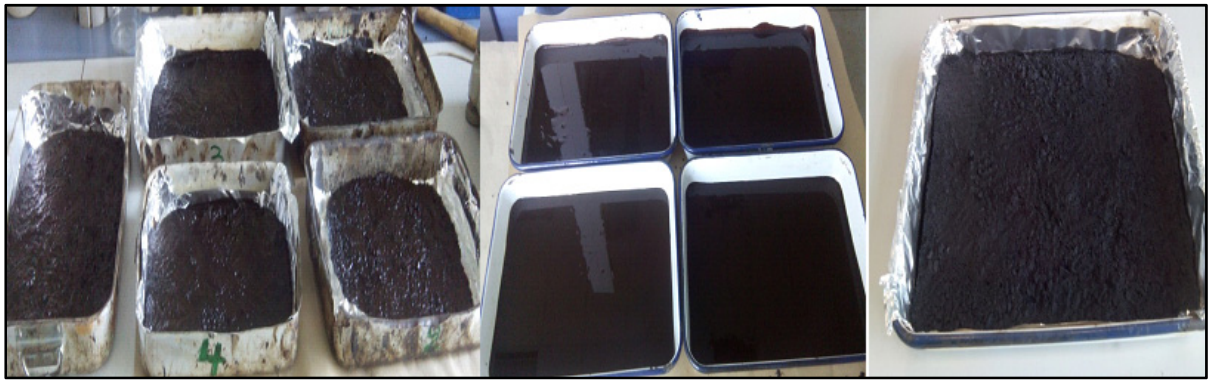


Figure 5.12 Échantillons d'ECF de référence après formulation et coulage dans les gamelles - Échantillons d'émulsion coulés dans les gamelles pour mûrissement/vieillissement - Échantillon d'ECF de référence retiré de l'étuve après 1 jour de vieillissement accéléré

Caractérisation conventionnelle sur le liant extrait de l'ECF de référence (vierge) et le liant d'émulsion vierge

Les résultats des essais de température bille-anneau et de pénétrabilité réalisés sur le liant de l'ECF et de l'émulsion à chaque stade sont présentés sur les figures 5.13 et 5.14. Les résultats de TBA montrent une évolution de la consistance du liant en fonction du nombre de jours à l'étuve, comme nous pouvons le constater sur le premier graphique (passage de ≈48 à ≈61°C). Sur le second graphique (Figure 5.14), nous observons bien que la pénétrabilité du liant de l'ECF et de l'émulsion diminue considérablement en fonction du nombre de jours passés à l'étuve, ce qui signifie que le liant durcit, donc vieilli (passage de ≈72 à ≈30 1/10mm). Le bitume, qui était de classe 70/100 au départ, est passé à une classe 20/30 après le 14ème jour de vieillissement. Cependant, nous ne pouvons pas établir une correspondance avec le terrain avec les méthodes de vieillissement définies dans cette thèse .Nous pouvons aussi remarquer qu'il y'a une bonne concordance entre l'évolution du bitume de l'ECF et celle du bitume de l'émulsion.

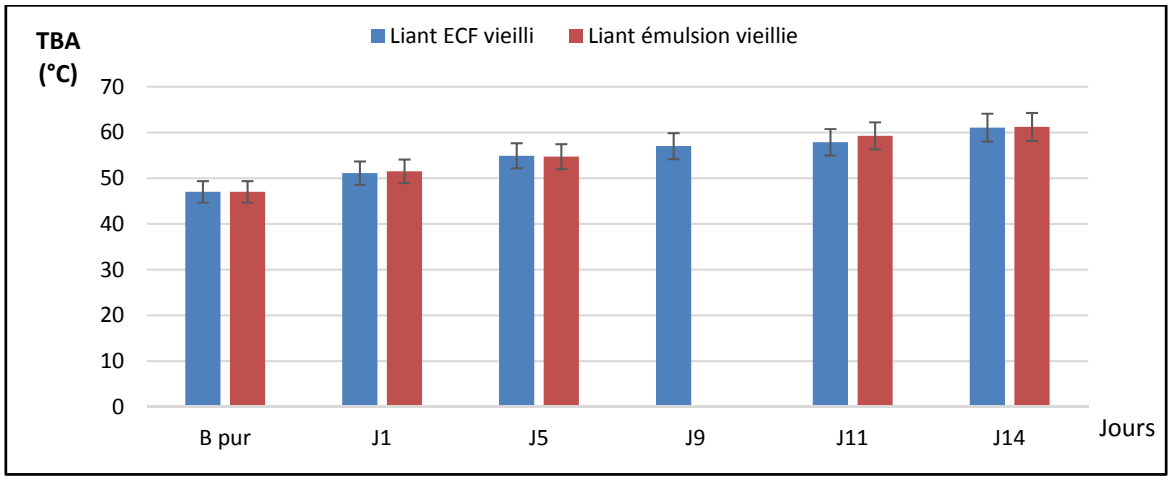


Figure 5.13 Évolution de TBA pour le bitume d'ECF vierge et le bitume d'émulsion pour chaque jour de mûrissement/vieillissement

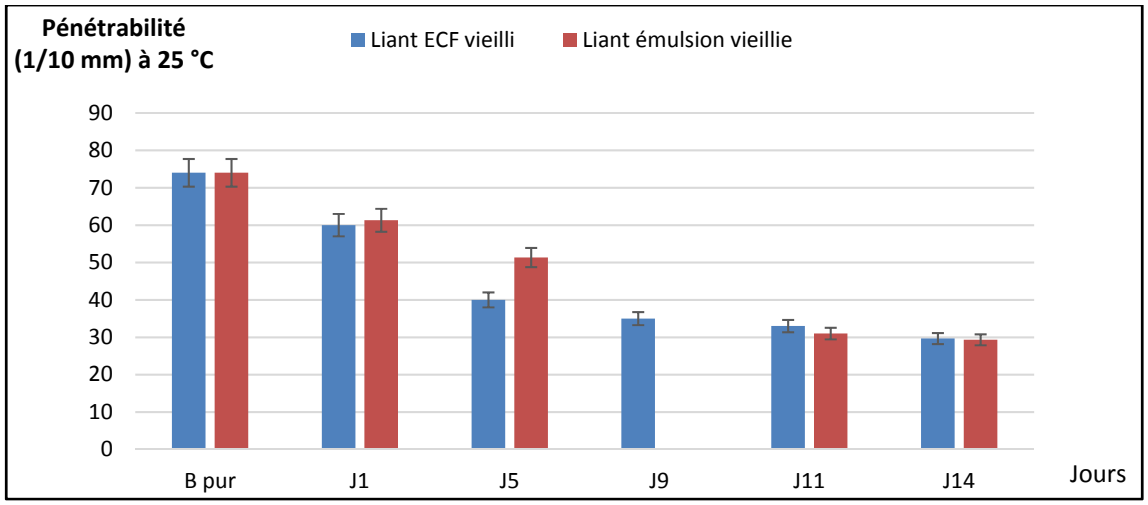


Figure 5.14 Évolution de pénétrabilité pour le bitume d'ECF et le bitume d'émulsion pour chaque jour de mûrissement/vieillissement

Caractérisation conventionnelle sur ECF vierge et ECF recyclé (20 et 50 % de GBR)

Les résultats des essais de température bille-anneau et de pénétrabilité réalisés sur le liant de l'ECF avec 20 et 50 % de GBR à chaque stade sont résumés dans les figures 5.15 à 5.16.

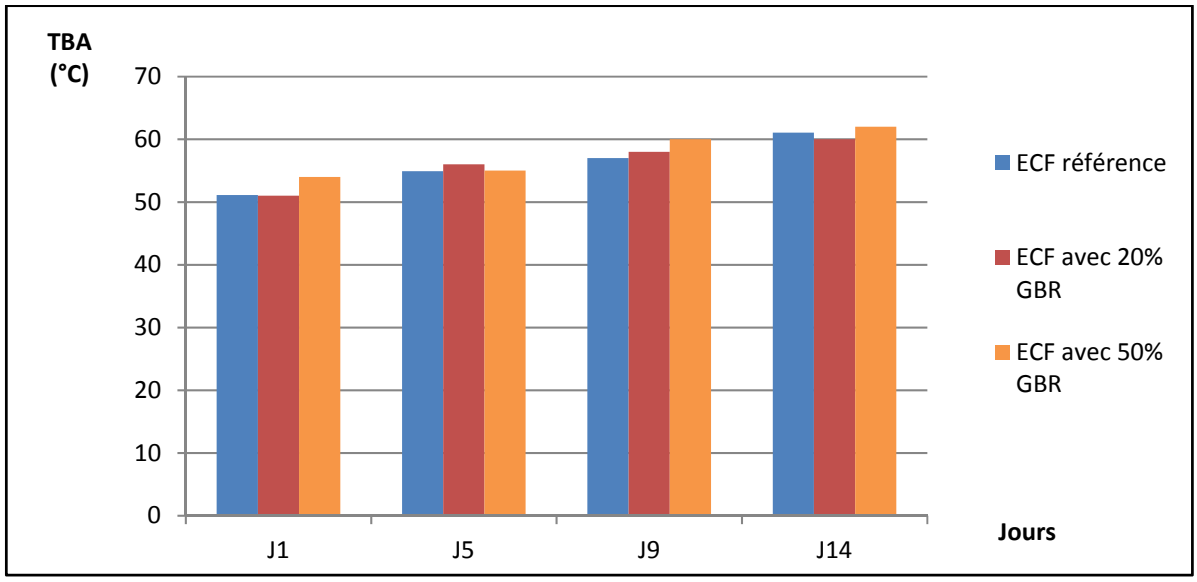


Figure 5.15 Évolution de la TBA pour le bitume d'ECF avec recyclé et d'ECF de référence pour chaque jour de mûrissement/vieillissement

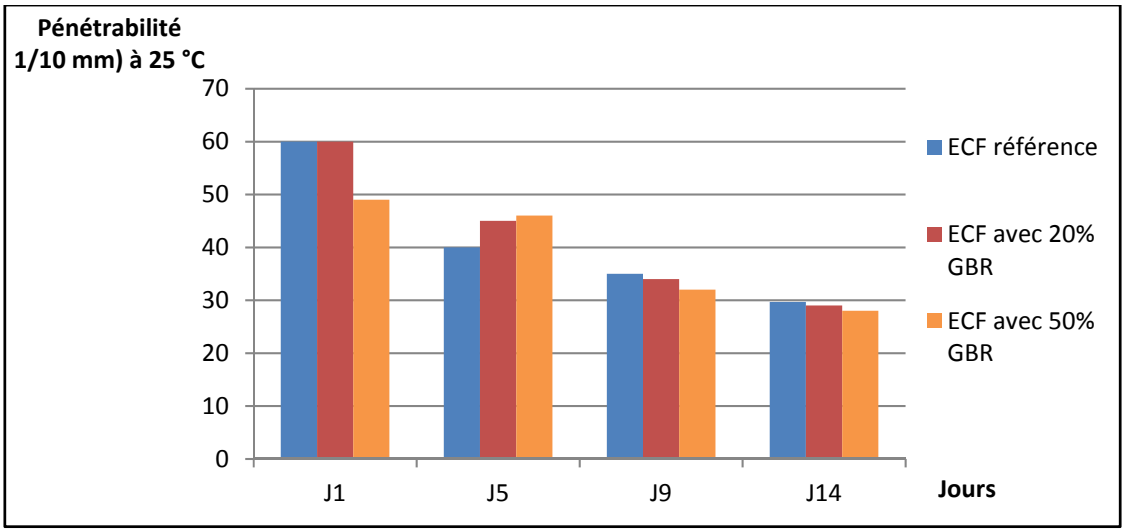


Figure 5.16 Évolution de la pénétrabilité pour le bitume d'ECF avec recyclé et d'ECF de référence pour chaque jour de mûrissement/vieillissement

Sur les deux derniers graphiques (figure 5.15 et figure 5.16), nous pouvons comparer les résultats de TBA et de pénétrabilité sur l'ECF de référence et les ECF avec 20 et 50% de GBR. Nous constatons une évolution de la consistance du liant en fonction du nombre de jours à l'étuve. À chaque stade de vieillissement (nombre de jours de vieillissement), le bitume de l'ECF de référence est moins vieux (dur) que celui de l'ECF avec 20% de recyclé, qui lui aussi est moins vieux que celui de l'ECF avec 50% de recyclé. Cela peut s'expliquer par le fait que les ECF avec 20 et 50% de recyclé contiennent du bitume de GBR qui est très vieux donc contribue à durcir d'avantage le liant final formé. Cependant les résultats du 5ème jour de vieillissement sont aberrants et restent à vérifier. On peut donc conclure qu'il existe un faible écart entre les ECF vierges et les ECF avec 20% GBR. Par ailleurs, ces écarts sont plus importants dans les cas des ECF avec 50% GBR.

Les résultats de pénétrabilité et de TBA obtenu dans cette étude montrent bien que la méthode de vieillissement utilisé dans cette étude influence ces propriétés empiriques. Cependant, la question à poser est-ce que les résultats seront les mêmes pour un vieillissement sur une chaussée en service depuis plusieurs années. En effet, si les produits chimiques formés durant le vieillissement au laboratoire sont les mêmes que ceux formés sur site, il sera possible de valider les conclusions obtenues. Dans la littérature il a été montré que les composés

généralement produits lors du vieillissement des bitumes sont des sulfoxydes, des acides carboxyliques et des cétones. Cependant, le nombre et le type de produits dû au vieillissement oxydatif semblent être directement liés à la composition chimique de l'enrobé. En effet, plus le taux de soufre est élevé dans un bitume, plus la formation de sulfoxyde est élevée (Curtis, Ensley et Epps, 1993; Lesueur, 2002).

Caractérisation rhéologique des liants des ECF vierges et des ECF avec 20 et 50% GBR

Les résultats de caractérisations rhéologiques des liants (ECF de référence, ECF avec 20 et 50 % de GBR, bitume pur et bitume de GBR) sont présentés dans l'annexe 2, qui montrent les courbes du module complexe de cisaillement (G*) en fonction de la fréquence (F) à une température donnée, sur un plan PP8 et PP25.

En analysant les courbes représentant le module complexe (G*) en fonction de la fréquence (F), nous constatons que celles-ci sont superposées dans l'ordre suivant : bitume GBR > bitume J9 50% > bitume J9 20% > bitume ECF de référence > bitume pur. Plus le module complexe est élevé, plus le liant est rigide. Cet ordre définit du même coup celui de la rigidité des différents liants, c'est-à-dire que le bitume de GBR est plus rigide que celui de l'ECF avec 50% de GBR, qui est plus rigide que le bitume de l'ECF avec 20% de GBR et ainsi de suite. Ce phénomène est aussi observé sur les courbes représentant l'angle de phase en fonction de la fréquence, mais à sens inverse, car plus l'angle de phase est faible, plus le liant est rigide.

Contrairement aux essais empiriques (pénétrabilité et TBA), les essais de rhéologie permettent de mesurer des propriétés intrinsèques des liants bitumineux. Ces propriétés étant le module de cisaillement complexe G* et l'angle de phase φ. Toutefois comme pour les essais empiriques l'augmentation de la résistance due au vieillissement au laboratoire nécessite une étude chimique. Il sera toutefois aussi bénéfique d'étudier l'impact de l'eau sur les propriétés rhéologiques des liants.

Caractérisation par spectroscopie infrarouge des ECF vierges et des ECF avec 20 et 50 % GBR

Nous remarquons sur les différents spectres l'apparition d'un pic carbonyle (CO) qui augmente au fur et à mesure que l'échantillon est laissé à l'étuve, allant du 1er au 14ème jour (figure 5.17). Le même phénomène peut être constaté sur les spectres de l'émulsion vieillie. Le pic CO est très peu visible sur le spectre du bitume pur. Ces résultats montrent une oxydation thermique des liants au cours du temps pendant la période de vieillissement à 85°C. Les spectres sont présentés dans l'Annexe 2.

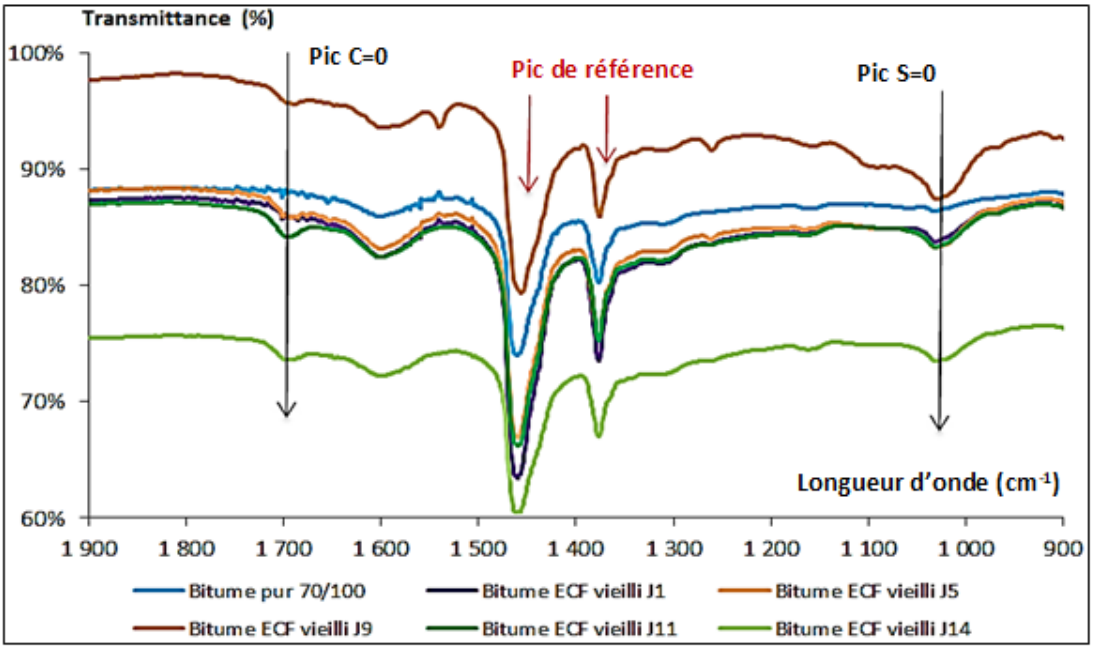


Figure 5.17 Exemple de spectres du bitume de l'ECF de référence vieilli (J1 à J14) après zoom

L'évolution des pics de CO et de SO est un bon indicateur du vieillissement des liants, car elle traduit la formation des produits de vieillissement tels que les acides carboxyliques et les sulfoxydes. Cependant il sera nécessaire de comparer quantitativement cette évolution avec un bitume vieilli sur une chaussée mise en service. Les corrélations obtenues seront très importantes dans la caractérisation de la fatigue des ECF par exemple car ceci permettra de prévoir le comportement de la chaussée vis à vis de la fatigue.

Pour quantifier ces résultats, il nous a fallu calculer les indices d'oxydation pour chaque spectre des bitumes de l'ECF vieilli et de l'émulsion vieillie. Ces résultats sont présentés sur la figure 5.18.

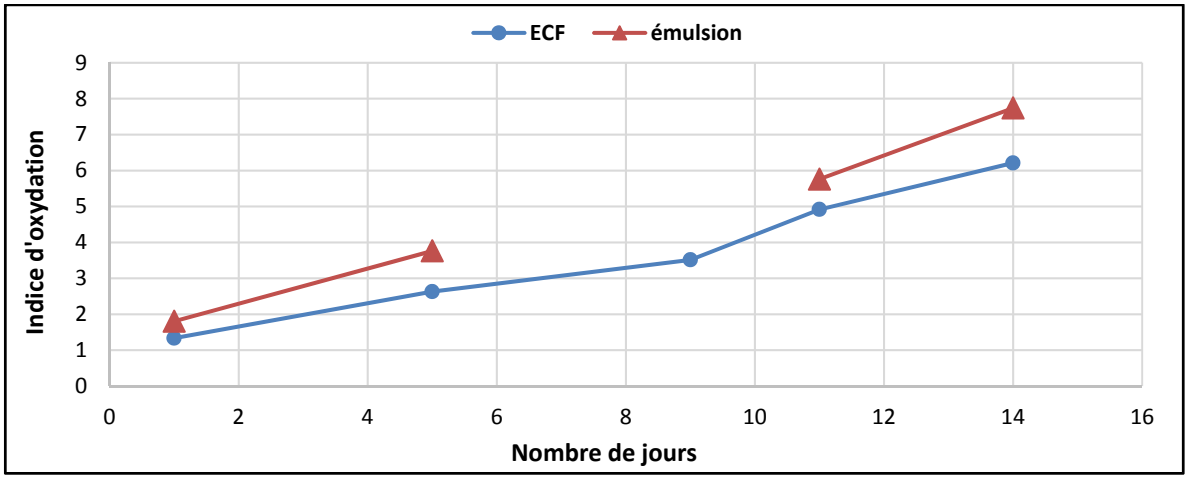


Figure 5.18 Courbes des indices d'oxydation du bitume pour ECF de référence et pour émulsion

En comparant ces indices, nous nous rendons compte que : J1 < J5 < J9 < J11 < J14, ce qui confirme le vieillissement du liant. Sur le graphique, nous pouvons également constater une bonne linéarité sur les courbes. Le vieillissement est légèrement plus important sur émulsion que sur ECF; ce phénomène n'est pas détectable par pénétrabilité et température bille-anneau.

Pour le vieillissement des ECF avec 20 % GBR, les résultats du calcul des indices CO des ECF recyclés à différents stades de vieillissement sont présentés dans le tableau 5.3

Tableau 5.3 Indices d'oxydation des bitumes ECF avec 20 % GBR

Échantillons	Aire pic CO	Aire pic de réf	indice CO
J1	0,07	3,20	2,25
J5	0,11	3,23	3,45
J9	0,21	3,24	6,59
J14	0,28	3,03	9,13

Pour le vieillissement des ECF avec 50 % GBR, les résultats du calcul des indices CO des ECF recyclés à différents stades de vieillissement sont présentés dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4 Indices d'oxydation des bitumes ECF avec 50 % GBR

Échantillons	Aire pic CO	Aire pic de réf	indice CO
J1	0,06	3,22	1,89
J5	0,14	3,28	4,15
J9	0,19	3,32	5,68
J14	0,21	3,21	6,45

Sur les différents spectres de l'ECF avec 20 et 50 % GBR, nous constatons que le pic carbonyle (CO) augmente du 1er au 14ème jour à l'étuve. Ce qui veut dire qu'il y'a une oxydation thermique des liants. Les indices d'oxydations nous permettent ensuite de savoir que dans tous les cas J1 < J5 < J9 < J14 tout comme au niveau de l'ECF de référence.
Il est logique que les indices CO des ECF avec GBR soient plus élevés que les indices C0 des ECF vierges car l'ajout des GBR dans la formulation augmente la teneur en liant déjà oxydé.

De plus, il semble intéressant de signaler que les essais de spectroscopie ont été réalisés sur tout le liant récupéré (c'est-à-dire un mélange homogène entre le liant de GBR et le liant de l'émulsion), cependant, ce n'est pas ainsi que ceci se passe dans le mélange entre les différents

liants. C'est pourquoi il serait important d'utiliser d'autre indicateur afin de différencier l'évolution du liant des GBR de l'évolution du liant de l'émulsion.

5.6.2.2 Extraction séquencée des ECF recyclés après le vieillissement thermique

Afin d'évaluer la contribution des liants vieillis issus des GBR, nous avons effectué des extractions progressives (extraction séquencée) sur les mélanges des ECF recyclés. L'extraction séquencée est une méthode mise au point par Navaro (2011) permettant de savoir s'il y a un mélange ou non entre les bitumes d'un enrobé recyclé (bitume neuf et bitume de GBR). Dans notre démarche de formulation, nous avons tout d'abord fait l'hypothèse comme quoi il n'y a pas d'interaction entre nos deux liants c'est-à-dire le bitume d'apport (sous forme d'émulsion de bitume) et le bitume de GBR. Ce qui signifie que nous considérons le GBR comme un simple caillou. L'extraction séquentielle nous permettrait alors de vérifier cette hypothèse. L'essai a consisté à réaliser des extractions par intermittence (par séquences) sur un même échantillon, de sorte que chaque liant obtenu par extraction partielle représente une épaisseur donnée du bitume d'enrobage.

Pour cela nous avons utilisé un *asphalt analysator* avec des paramètres bien définis qui sont la durée de la dissolution et temps de remplissage du premier et du second cycle.

Les paramètres de l'*asphalt analysator* « durée de la dissolution » et « temps de remplissage du premier et du second cycle » ont été optimisés (comme suite :

- première dissolution : 9 minutes;
- deuxième dissolution : 6 minutes;
- troisième et dernière dissolution : extraction normale.

Trois points au total ont été réalisés pour chaque essai sur un échantillon donné, dont les deux premiers correspondent à de simples dissolutions (imprégnation de l'ECF avec un solvant, le perchloroéthylène qui est ensuite récupéré) et le troisième point qui correspond à une extraction classique. .

Après chaque étape d'extraction, le jus récupéré passe par une étape de concentration (dans un évaporateur rotatif). Le bitume sera ensuite caractérisé (Température de ramollissement, spectroscopie IR, rhéologie). En effet, les quantités de bitume récupéré à chaque extraction étant très faibles, nous n'avons pas pu réaliser d'autres essais de caractérisation.

Les résultats des extractions séquencées réalisées sur les ECF avec recyclé à 20 et 50% sont présentés en Annexe 2. En observant les résultats de TBA, il a été constaté que les couches d'enrobage superficiel sont moins dures que celles qui sont profondes, les résultats de spectroscopie infrarouge ont confirmé cette remarque. Ainsi, il est possible d'affirmer qu'il n'y a pas de diffusion complète du liant neuf vers le granulat, car s'il tel était le cas, le liant devrait être uniforme donc des caractéristiques identiques. Cependant les résultats des troisièmes points que ce soit la TBA ou la spectroscopie infrarouge sont aberrants et restent à vérifier. Les écarts observés sur les troisièmes points de l'extraction séquencée peuvent être expliqués par les conditions de réalisation des essais, à savoir la température ambiante, le solvant utilisé (le perchloroéthylène dont nous ne sommes pas sûrs s'il réagit ou pas avec le bitume), l'*asphalt analysator* et l'évaporateur rotatif qui peuvent éventuellement vieillir d'avantage le liant. Pour conclure, l'essai d'extraction séquencée a permis de montrer la difficulté de définir le degré de participation des deux liants (neuf de l'émulsion et vieilli des GBR) dans la formulation car la consistance du liant évolue. Il devient donc plus complexe de désenrober les granulats. C'est pourquoi, il faudrait re-optimiser les paramètres en utilisant un matériau spécifique.

5.6.2.3 Conclusion des résultats du vieillissement thermique des ECF vierges et de ECF avec des GBR

Le tableau 5.5 montre l'évolution de la classe du liant de l'ECF de référence et des ECF avec recyclé à chaque stade de vieillissement accéléré à l'étuve, à savoir le 1er, le 5ème, le 9ème et le 14ème jour.

Tout d'abord, il est nécessaire de souligner l'importance de la méthodologie définie pour évaluer le vieillissement des ECF vierges et avec GBR dans le temps. Nous avons constaté que

la durée du vieillissement accéléré en laboratoire n'était probablement pas suffisante dans le cas des ECF recyclés, d'où la nécessité de réaliser des essais sur des échantillons du terrain afin de positionner les résultats de laboratoire par rapport aux résultats réels du terrain.

Tableau 5.5 Évolution des classes des liants au cours des différents stades de vieillissement

Matériaux	**Classe du bitume**			
	1er jour de vieillissement	**5ème jour de vieillissement**	**9ème jour de vieillissement**	**14ème jour de vieillissement**
ECF de référence	50/70	35/50	30/45	20/30
ECF avec 20 % GBR	50/70	35/50	30/45	20/30
ECF avec 50 % GBR	35/50	35/50	30/45	20/30
Bitume GBR	10/20			
Bitume pur	70/100			

Sur le tableau 5.5, nous pouvons constater que le bitume qui est initialement de grade 70/100 passe au grade 50/70 après le premier jour de vieillissement, perdant ainsi une classe. Du 1er au 14ème jour, le bitume passe du grade 50/70 à 20/30 en perdant 3 classes. Ce qui signifie que la méthode de vieillissement accéléré (RILEM + LCPC) vieilli bien le liant, car les liants ont perdu 4 classes après 14 jours à l'étuve. La concordance du vieillissement entre les liants de l'émulsion et le liant extrait des ECF a été confirmée par les résultats des TBA et pénétrabilité.

Cependant, il ne faut pas oublier que le mélange entre les liants (GBR et émulsion) ne peut pas être considéré comme homogène du moins au jeune âge, vu la faible température de fabrication des ECF (fabrication à température ambiante).

5.6.3 Étude des résultats du vieillissement photochimique

Rappelons que l'objectif principal de cette partie est de suivre les vieillissements thermique et photochimique des ECF à la même température (44°C) pour avoir une comparaison de ces deux derniers.

L'analyse des résultats est présentée en trois parties sur:

- le liant d'émulsion;
- les liants extraits des ECF vierges;
- les liants extraits des ECF avec GBR.

Après avoir récupéré tous les liants vieillis, une série de caractérisation a été accomplie.

5.6.3.1 À l'échelle de l'émulsion - Résultats de vieillissement photochimique de l'émulsion sur deux épaisseurs différentes

Dans cette partie, nous allons évaluer l'impact de l'épaisseur sur le vieillissement photochimique. Après la préparation des échantillons d'émulsion (avec deux épaisseurs différentes : 3mm et 1,5mm), on a suivi la perte de masse tout le long de vieillissement UV à 44°C. Après la phase de stabilisation (24 heures à 50°C sans UV), 99% de la quantité totale d'eau s'est évaporée. Ensuite, toute l'eau a disparu dès le premier jour et la masse de l'émulsion est devenue stable (voir Annexe 2).

Les résultats des essais de température bille-anneau réalisés sur les liants résiduels des émulsions à chaque stade du vieillissement sont résumés sur la figure 5.19.

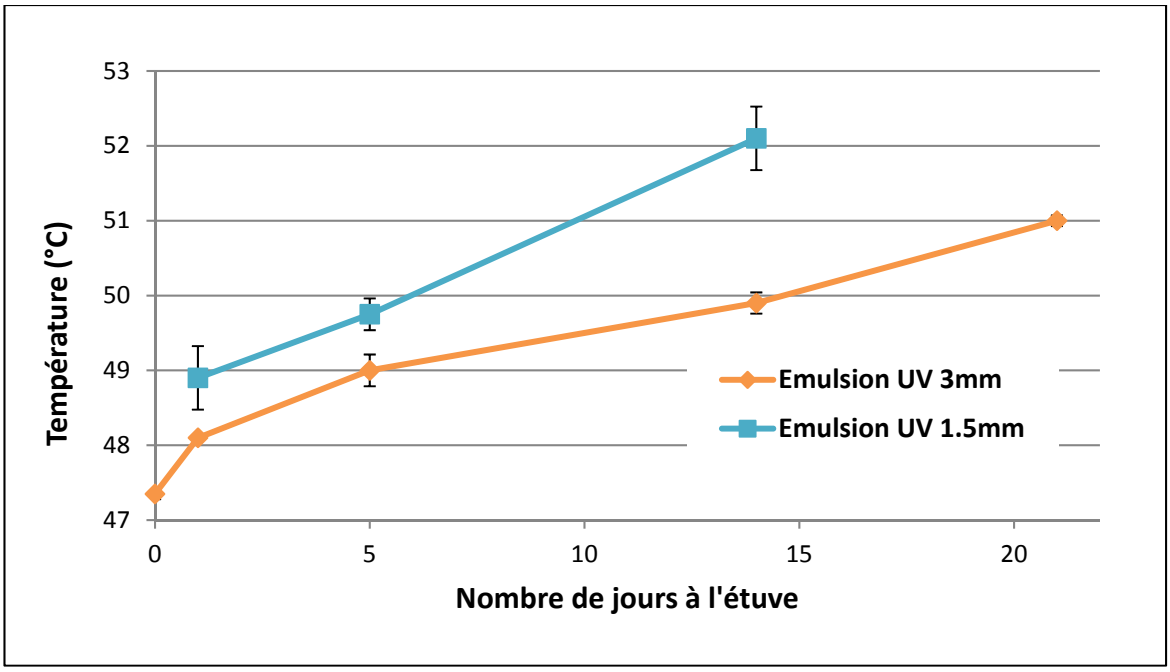


Figure 5.19 Évolution de TBA des liants résiduels des émulsions 3 et 1,5 mm vieillies dans l'enceinte UV

Les résultats montrent une augmentation de la TBA des liants des émulsions au cours du temps : après stabilisation, passage de 47,4°C (J_0) à 51,0°C (J_{14}) pour le liant résiduel de l'émulsion 3mm et de 48,9°C à 52,1°C pour le liant résiduel de l'émulsion 1,5mm. Cette évolution est significative d'un léger durcissement du liant et donc d'un vieillissement. Nous pouvons aussi remarquer que les valeurs de TBA du liant résiduel de l'émulsion 1,5mm sont plus importantes que celles du liant résiduel de l'émulsion 3mm (pour le 14ème jour : 52°C et 50°C respectivement pour le liant des émulsions 1,5 et 3mm). Ces résultats montrent alors que l'épaisseur du bitume influence le vieillissement photochimique : plus cette épaisseur est faible, plus le vieillissement UV est important. La quantité récupérée de bitume de l'émulsion UV 1,5mm est faible ; nous n'avons pas pu effectuer alors la pénétrabilité.

Pour confirmer les résultats de la figure 5,19, on a eu recours à la spectroscopie IR. Les échantillons sont préparés en appliquant un film mince de bitume sur une lame de KBr. Les essais sont effectués 3 fois pour assurer une bonne répétabilité. Les résultats ont été interprétés en utilisant le logiciel Omnic du spectrophotomètre et ils sont présentés sur la figure 5.20.

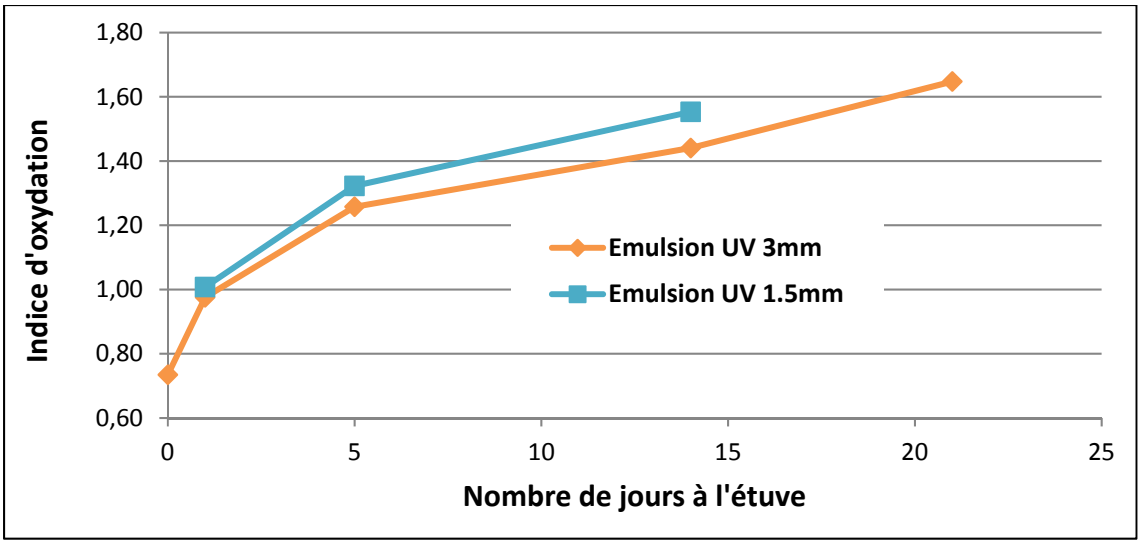


Figure 5.20 Évolution de l'indice d'oxydation des émulsions vieillies UV 3 et 1,5mm

Pour chaque liant, l'indice d'oxydation augmente au cours du temps. Ceci se traduit par un appauvrissement du bitume en aromatiques (cycliques) et un enrichissement en asphaltènes. Ceux-ci caractérisés par une grande masse moléculaire, engendrent l'augmentation de la température de ramollissement du liant constatée et donc son vieillissement. Sur le graphique 5.21, nous pouvons également constater que les indices d'oxydation des émulsions UV 1,5mm sont légèrement plus élevés que ceux des émulsions UV 3mm. Les écarts sont faibles, mais systématiques et en accord avec les résultats de la TBA et confirment que le vieillissement est d'autant plus important que l'épaisseur de film de bitume est faible. En conclusion, nous pouvons dire qu'à la même température (44°C) et pour une durée identique, le vieillissement du bitume dépend principalement de l'épaisseur de liant. Plus cette épaisseur est faible, plus les rayons UV catalysent les réactions d'oxydation des aromatiques pour donner les asphaltènes : la fraction la plus lourde de bitume. Ces réactions engendrent l'augmentation de l'indice d'oxydation avec des vitesses qui dépendent principalement de l'épaisseur du liant bitumineux.

5.6.3.2 Résultats de vieillissement photochimique et thermique de l'émulsion sur une même épaisseur

Dans le but de déterminer l'apport de l'UV par rapport au thermique d'un ECF sur chaussée, nous avons comparé un vieillissement photochimique à un vieillissement thermique des émulsions de 3mm d'épaisseur. Ces essais ont été réalisés dans deux enceintes différentes et notamment l'enceinte thermique est ventilée. Les résultats de la TBA et la pénétrabilité des liants résiduels sont présentés sur la figure 5.21.

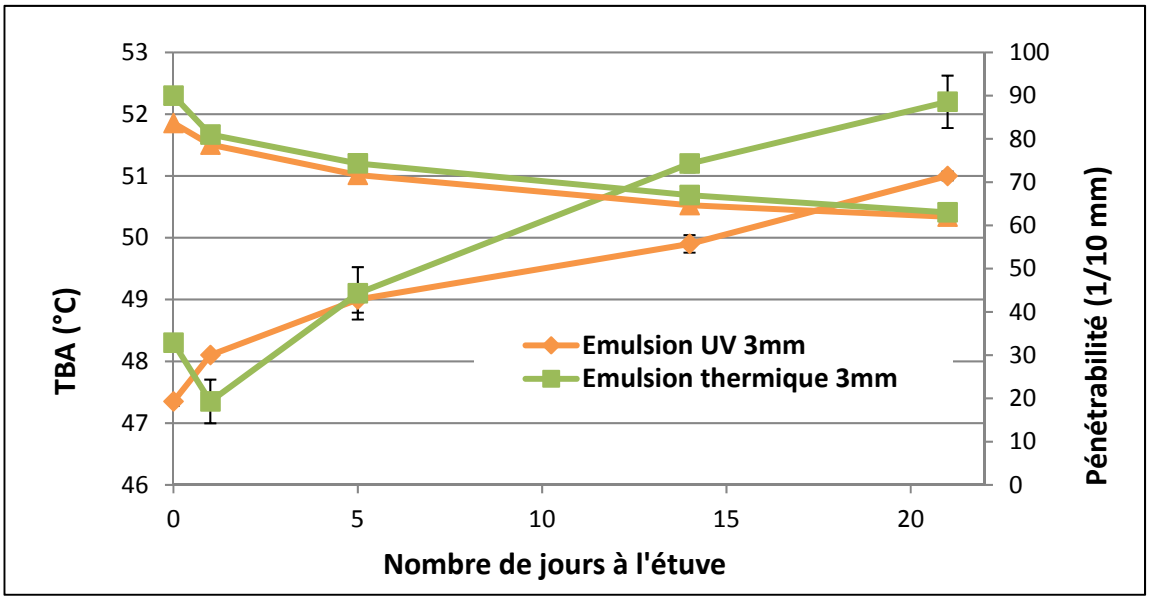


Figure 5.21 Évolution de la pénétrabilité et la TBA des liants résiduels de deux émulsions UV et thermique vieillies de 3mm

Les valeurs de la pénétrabilité montrent une évolution de la consistance de deux liants en fonction du nombre de jours de vieillissement : après stabilisation, elles ont diminué de 90 à 63 1/10 mm et de 84 à 62 1/10 mm respectivement pour l'émulsion thermique et l'émulsion UV. Cette évolution est confirmée par les résultats de la TBA qui diminuent pour les deux liants montrant alors que les deux liants durcissent, donc vieillissent au cours de temps. Les deux bitumes qui étaient de classe 70/100 au départ, sont passés à une classe 50/70 après 21 jours de vieillissement photochimique et thermique. En comparant les deux processus de

vieillissement, nous pouvons remarquer une évolution quasi similaire : un vieillissement à 44°C dans une étuve ventilée ou dans une enceinte UV d'une émulsion bitumineuse influence de la même façon la consistance du liant résiduel sur la durée d'essais réalisés.

Nous avons également caractérisé nos liants résiduels par spectroscopie IR. Les spectres IR présentés sur la figure 5.22 montrent une systématique, mais faible évolution des pics (carbonyles et sulfoxydes) caractéristiques de l'avancement du vieillissement.

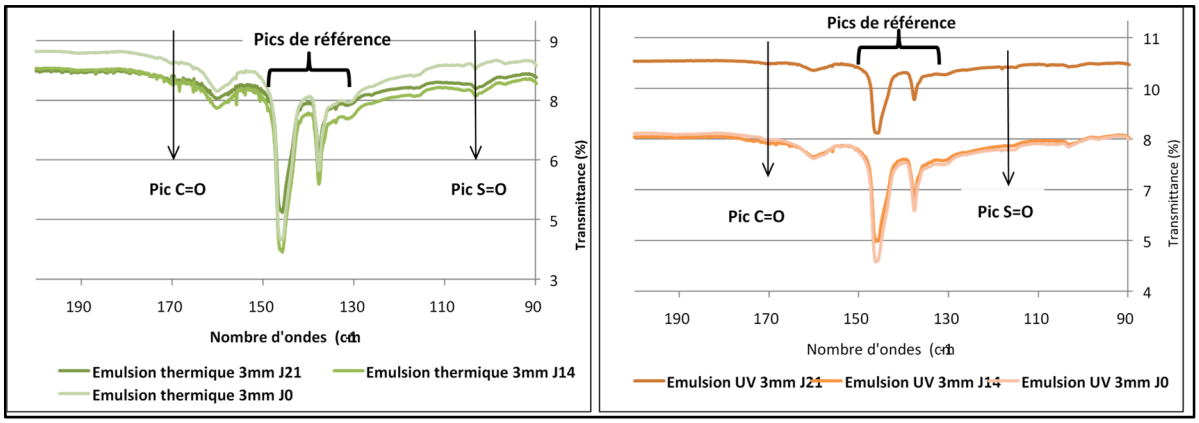


Figure 5.22 Spectres IR des liants résiduels des émulsions UV et thermique vieillies, 3mm d'épaisseur (partie du spectre de 900 à 1900 cm^{-1})

Le calcul des indices carbonyles moyennant le logiciel Omnic est présenté dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6 Évolution de l'indice carbonyle des liants résiduels des émulsions vieillies UV et thermique (épaisseur 3mm)

	J_0	J_1	J_5	J_{14}	J_{21}
Émulsion UV 3mm	0,73	0,98	1,26	1,44	1,65
Émulsion thermique 3mm	0,35	0,95	0,97	0,99	1,42

Pour les deux émulsions, les indices carbonyles (C=O) augmentent au cours du temps. Cela signifie alors que le liant résiduel d'épaisseur 1,8mm (soit 60% de l'émulsion 3mm) a vieilli au cours de 21 jours. Même si les résultats peuvent être considérés identiques entre UV et thermique à chaque échéance, compte tenu de la précision des essais, on constate cependant que le vieillissement photochimique est systématiquement légèrement plus élevé que le vieillissement thermique, à la même température et épaisseur. Nous pouvons donc supposer que l'énergie fournie par l'UV est plus importante que celle fournie par le thermique ce qui engendre une oxydation plus forte pour le premier. En comparant nos valeurs à celles obtenues par le groupe de Mouillet et al. (2014) à la même température, nous pouvons dire que 21 jours ne sont pas suffisants pour remarquer une grande différence entre le vieillissement thermique et le vieillissement photochimique. Cependant, le vieillissement UV demeure plus agressif que le vieillissement thermique à une même température. Ceci a été également confirmé par les résultats obtenus par Mouillet et al. (2014).

Il faudrait probablement aller jusqu'à plus que 66 jours. Nous aurions pu également augmenter la température de vieillissement au-delà de 44°C, mais notre enceinte UV ne permettait pas de dépasser 50°C (Durrieu et al., 2007).

Pour finir cette comparaison entre thermique et photochimique, nous avons effectué des essais de rhéologie. La superposition des courbes maîtresses des liants résiduels de deux émulsions de 3mm d'épaisseur vieillies thermique et aux rayons UV, après 14 jours de vieillissement est présentée sur la figure 5.23.

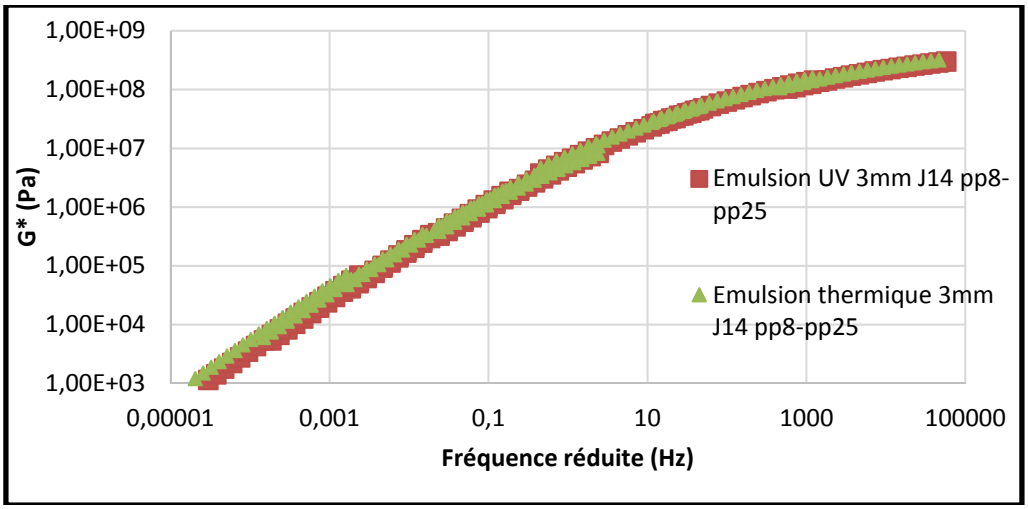


Figure 5.23 Superposition des courbes maîtresses des liants résiduels des émulsions vieillies UV et thermique J14 (épaisseur 3mm)

Quel que soit l'échantillon, nous retrouvons le même comportement viscoélastique général du bitume : le module complexe de cisaillement augmente avec la fréquence. À hautes températures (basses fréquences), nous pouvons constater que les courbes des liants résiduels sont situées entre celles du liant d'apport et du liant des GBR dans l'ordre croissant suivant : liant d'apport, liant résiduel de l'émulsion. UV J14, LR émulsion thermique J_{14} et le liant des GB. L'écart entre le liant d'apport, le liant résiduel d'émulsion UV J_{14} et le liant résiduel de l'émulsion thermique J_{14} est faible (presque négligeable). Ceci montre alors que 14 jours à 44°C ne sont pas suffisants pour changer les propriétés rhéologiques du bitume. Le liant de GBR reste toujours plus rigide que les autres liants. À basses températures (ou hautes fréquences), les différents liants finissent par se superposer : les liants atteignent à très basses températures un module de cisaillement G* maximal. (voir Annexe 2).

À l'échelle des ECF vierges et des ECF avec GBR

L'objectif de cette partie est de faire le lien entre le vieillissement des émulsions et des ECF fabriqués avec et sans GBR (désignés respectivement par ECF recyclés et ECF de référence). Les ECF recyclés sont préparés après calage des formulations et incorporation de 50% (en masse) de GBR. Nous avons également comparé leur vieillissement thermique et

photochimique. Connaissant la teneur en eau de l'ECF après fabrication, nous pouvons facilement suivre son évolution au cours du temps. Toute l'eau disparait pendant le premier jour de vieillissement, période pendant laquelle la masse devient stable jusqu'au 21ème jour. Nous avons pu constater une bonne concordance entre la perte de masse sur l'ECF et sur l'émulsion.

Évaluation de l'évolution des liants d'ECF vierge et ECF recyclé lors du deux vieillissements

Après chaque période de vieillissement (à l'étuve ou dans l'enceinte UV), le liant est extrait et récupéré dans le but de le caractériser. Les essais ont débuté par la détermination de ses paramètres de consistance (pénétrabilité et TBA) comme le montrent les courbes de la figure 5.24 et figure 5.25.

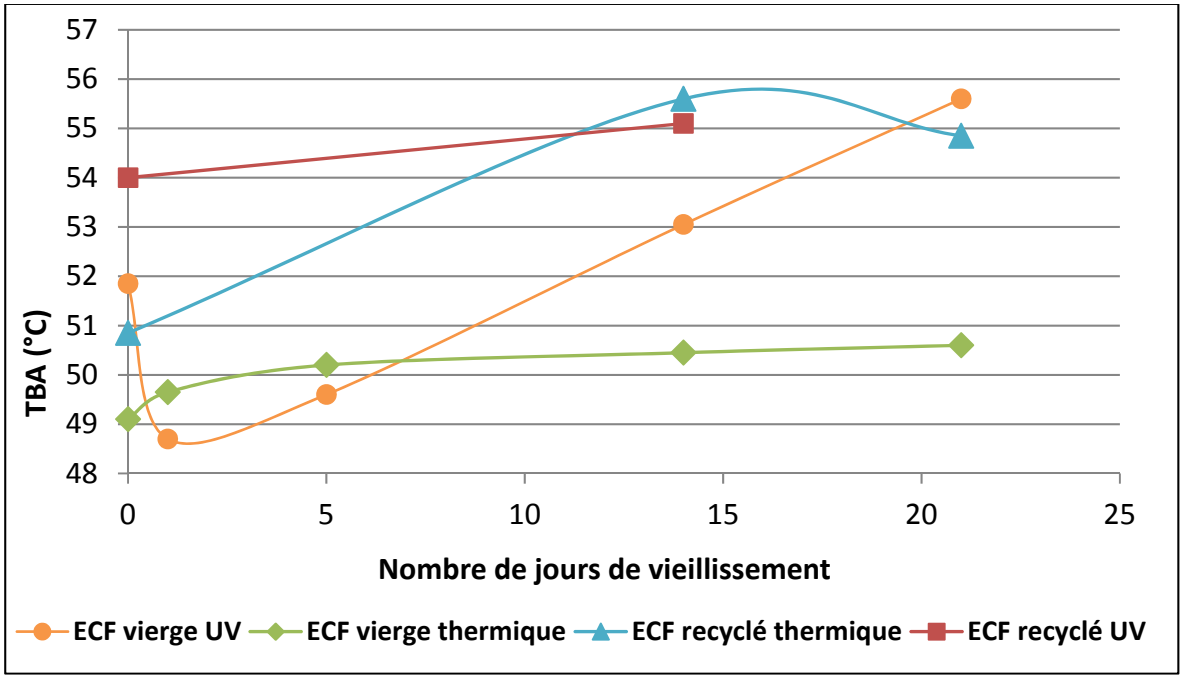


Figure 5.24 Évolution de la TBA des liants extraits des ECF vierges et recyclés (thermique et UV)

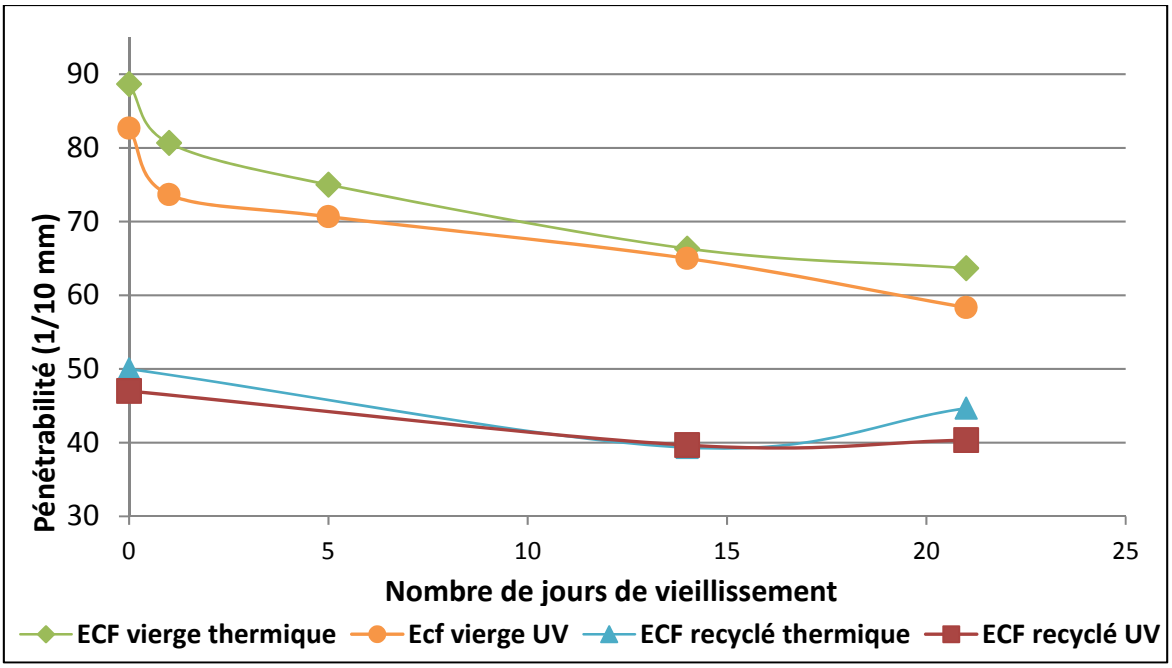


Figure 5.25 Évolution de la pénétrabilité des liants extraits des ECF vierges et recyclés (thermique et UV)

Dans le cas de l'incorporation des GBR dans l'ECF, nous avons récupéré, par une extraction/récupération classique, la totalité du liant (liant provenant de l'émulsion + liant provenant des GBR) qui représente un liant moyen de l'ECF. Une loi de proportionnalité, appelé règle des mélanges est classiquement utilisée pour évaluer les caractéristiques (TBA et pénétrabilité) de ce liant moyen issu du mélange de deux liants bitumineux. Cette loi des mélanges a été appliquée connaissant les caractéristiques du liant initial de l'émulsion et de celles du liant des GBR, dans les proportions du mélange. Ceci permettra de déterminer le pourcentage de bitume vieilli apporté par les GBR et son impact sur l'évolution des performances des mélanges. Il est important de rappeler que compte tenu des teneurs en bitume de GBR plus faible que celle de l'ECF, l'incorporation massique de 50% GBR conduit à une proportion massique de 23% de liant GBR.

Pour les liants issus des ECF avec 50% GBR, nous constatons un léger écart entre les résultats théoriques et ceux obtenus expérimentalement (Tableau 5.7). Cette comparaison a été faite

avant vieillissement des liants. Ces écarts peuvent s'expliquer par le fait que le bitume de l'émulsion a subi une mise en émulsification qui l'a légèrement durci.

Tableau 5.7 Comparaison entre les résultats théoriques (loi des mélanges) et expérimentaux (en laboratoire) des caractéristiques du mélange recyclé liant neuf +liant GBR

Caractéristiques du mélange 77% liant d'apport + 23% GBR	**Pénétrabilité (1/10 mm)**	**TBA (°C)**
Loi de mélange de TOTAL	53	54
Résultats expérimentaux (1er jour du traitement)	47	54

Au cours de vieillissement (thermique et photochimique), les paramètres de consistance des liants évoluent : leurs pénétrabilités diminuent et leurs TBA augmentent. Cette évolution confirme que les liants des ECF durcissent donc vieillissent au cours du temps. À une température de 44°C, les liants extraits des ECF vierges UV et thermique sont passés de la classe 70/100 à la classe 50/70 au bout de 14 jours (Figure 5.24 et 5.25). Pour les ECF vierges, le liant ayant subi le vieillissement photochimique présente des pénétrabilités légèrement inférieures à celui de la thermique. Il semble être plus vieilli que l'ECF vierge thermique, mais les écarts sont très faibles.

Pour les ECF avec 50% recyclés, l'incorporation des GBR a fortement durci le liant récupéré et donc baissé sa pénétrabilité : après l'étape de la stabilisation (24 heures à 50°C), le liant a un grade 35/50. Néanmoins nos résultats sont basés sur un liant moyen (mélangé lors de l'étape d'extraction/récupération), mais nous ne pouvons pas déterminer si le liant d'apport et le liant d'apport de GBR se sont mélangés au cours du vieillissement de l'ECF. Au jeune âge, nous supposons que les deux liants présents ne se sont pas mélangés, car la formulation se réalise à froid ne favorisant pas le mélange. Nous n'avons trouvé aucune étude de référence qui traite le phénomène de vieillissement des ECF recyclés. Pour mieux compléter ces analyses, nous avons eu recours à la spectroscopie IR. Le tableau suivant présente l'écart entre les indices carbonyles des ECF vierges et recyclés, thermiques et photochimiques (Tableau 5.8). En effet, il a été choisi de mesurer la différence entre l'évolution des indices lors du vieillissement

thermique et photochimique afin de mieux visualiser la cinétique de l'évolution de chaque type de vieillissement.

Tableau 5.8 Contribution du vieillissement photochimique par rapport au vieillissement thermique dans les ECF vierges et recyclés

Échantillons	Formules de calcul	J0	J1	J5	J14	J21
ECF vierges	Δ (IC=O UV - IC=O Thermique)	0,07	0,04	0,52	1,02	0,97
ECF recyclés	Δ (IC=O UV - IC=O Thermique)	0,25	-	-	0,32	-
ECF photochimique	Δ (I recyclé- IC=O vierge)	0,5	-	-	0,31	-
ECF thermique	Δ (I recyclé- IC=O vierge)	0,33	-	-	0,86	-

Les écarts entre les indices d'oxydation photochimique et thermique pour les ECF vierges et recyclés sont toujours positifs ; ceci montre que le vieillissement photochimique est légèrement plus important que celui thermique. Ces résultats sont en accord avec les résultats de vieillissement des émulsions. Il est à noter que certains écarts sont dans la reproductibilité de l'essai. Par ailleurs, nous pouvons aussi constater que l'indice $I_{C=O}$ n'a pas augmenté avec l'ajout des GBR (0.5 et 0.75 respectivement pour l'ECF recyclé thermique et photochimique, 4.94 pour le liant des GBR seuls). Ce résultat est surprenant, nous pouvons alors nous interroger sur le mécanisme physico-chimique de mélange entre le liant d'apport et liant des GBR à froid ainsi que sur les interactions liées au passage par le solvant lors de la récupération du liant.

On peut donc conclure que dans le cas des ECF vierges, on remarque une évolution de l'écart entre le vieillissement thermique et le vieillissement photochimique. Cependant, cette évolution est moins évidente dans le cas des ECF recyclés. C'est pourquoi, il faut avoir recours

à d'autres indicateurs afin de mieux visualiser l'évolution des liants des GBR et des liants de l'émulsion.

Dans l'objectif d'étudier le comportement rhéologique des ECF, les courbes maîtresses des liants extraits de différents ECF vierges et recyclés à une température de référence =15°C ont été tracées (Figure 5.26) (voir Annexe 2).

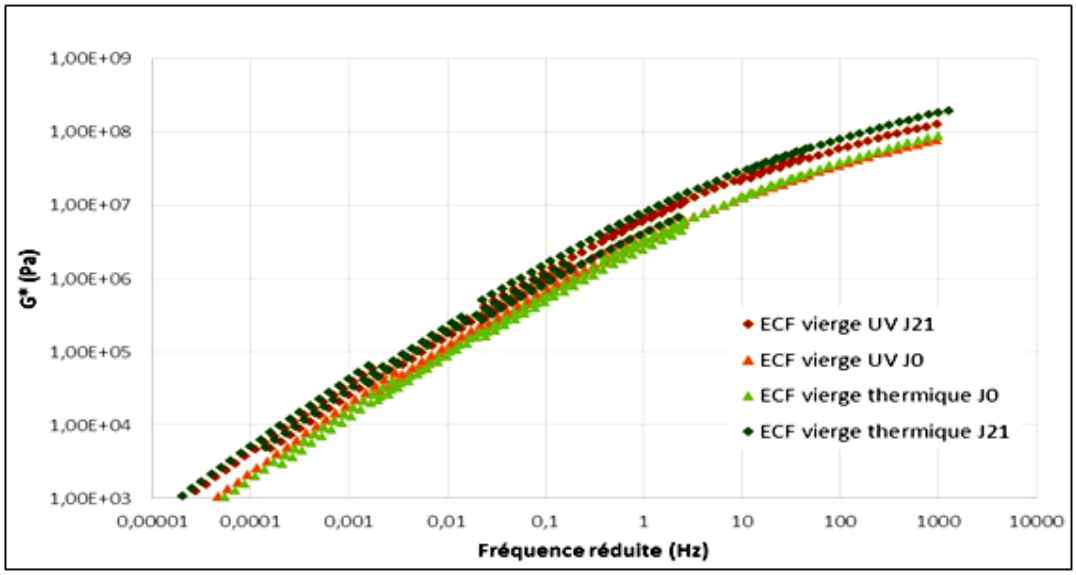


Figure 5.26 Superposition des courbes maîtresses des ECF vierges : thermique et UV avant et après 21 jours de vieillissement à 44 °C

La superposition des courbes maîtresses des ECF vierges UV et thermique montre une évolution dans les propriétés rhéologiques des liants : pour chaque type de vieillissement, après 21 jours, le module complexe augmente donc plus le liant a subi un vieillissement caractérisé par un durcissement. Nous remarquons une superposition des courbes maîtresses des liants extraits des ECF UV et thermique pour chaque jour de vieillissement (pas de différences visibles sur le comportement rhéologique des liants extraits après 21 jours).

Quel que soit l'échantillon, le comportement viscoélastique général du bitume est le même : le module complexe de cisaillement augmente avec la fréquence. En comparant les courbes de

liant recyclé J_0 et de liant vierge J_0, nous remarquons que le premier est situé au-dessus du deuxième. Ceci signifie que le recyclé est plus rigide, ce qui est normal vu que nous avons incorporé des GBR dans la formulation. Pour les faibles valeurs de fréquences (hautes valeurs de températures), nous pouvons observer la superposition de liant des GBR et de l'ECF recyclé thermique J_0. Cette superposition est surprenante vu que le liant issu des GBR doit être le plus vieilli de tous les autres liants. Il a subi un vieillissement naturel sur chaussée : thermique, photochimique, mécanique, etc. Pour pousser notre analyse, nous nous sommes intéressés au comportement à haute température de service de notre matériau plus précisément sa résistance aux déformations permanentes pouvant entrainer un renouvellement de couche. En effet, le système de spécifications basé sur les performances, développé aux États-Unis au début des années 1990 pendant le programme de recherche intitulé *Strategic Highway Research Program* (SHRP) a permis de proposer des critères, essentiellement d´origine rhéologique, pour fixer les limites d´utilisation en termes de température et de trafic maximal et minimals admissibles pour un liant donné (Merbouh, 2010). La figure 5.27 présente le critère SHRP qui permet de déterminer la température seuil qui engendre une déformation permanente de l'enrobé, pour une fréquence de référence (1,585 Hz). La valeur de $G^*/\sin\delta$= 1,00 E+03 représente la valeur limite admissible au phénomène d'orniérage pour un enrobé donné (AI, 1995).

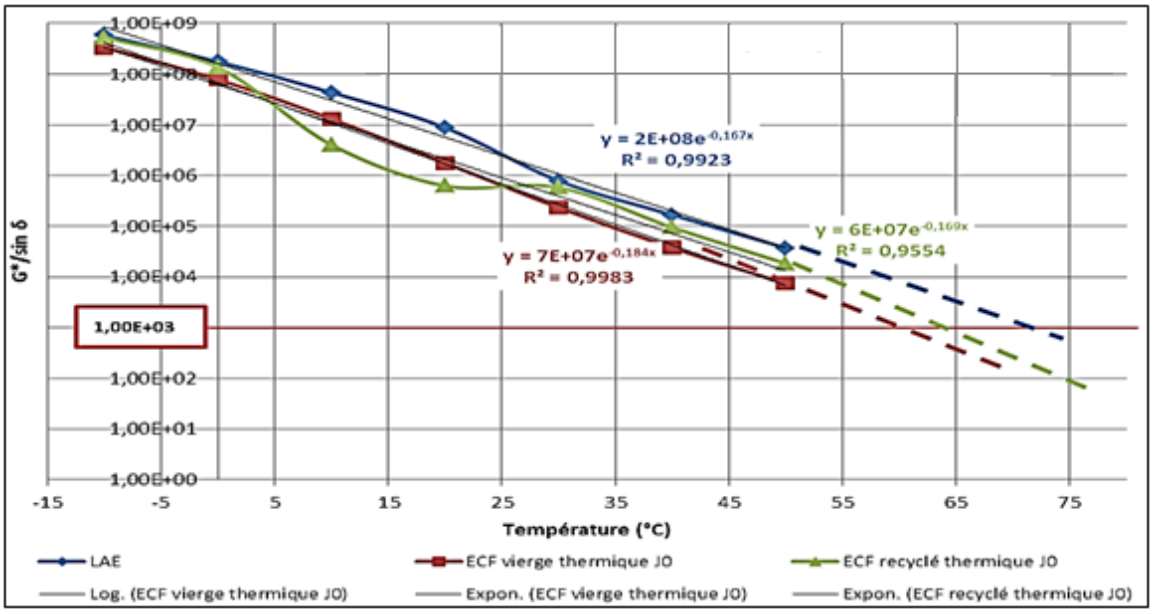


Figure 5.27 Critère de traction SHRP

Par extrapolation, nous obtenons les résultats suivants (Tableau 5.9) :

Tableau 5.9 Température seuil de déformation

Échantillon	**Température seuil de déformation permanente (°C)**
Liant GBR	73,1
ECF recyclé thermique J0	65,1
ECF vierge thermique J0	60,6

Nous pouvons ainsi remarquer que le liant des GBR est logiquement le plus résistant aux déformations permanentes. Celles-ci n'apparaitraient que vers 73°C. Le liant le moins résistant aux déformations est naturellement l'ECF vierge thermique J_0 vu qu'il se déforme d'une façon permanente à partir de 60,6 °C. Le résultat encourageant sur ECF recyclé part de l'hypothèse d'un mélange entre le liant de l'émulsion et liant des GBR, ce qui n'est certainement pas le cas. Un dernier point d'analyse dans la partie du vieillissement photochimique et le

vieillissement thermique a été effectué. Il s'agit de l'extraction séquencée qui a permis d'évaluer le rôle des GBR dans le mélange des ECF (voir la section 5.6.2.2).

Des essais de TBA et de spectroscopie infrarouge sont réalisés sur les liants récupérés afin de connaitre leurs caractéristiques. Les quantités de bitume récupéré à chaque extraction étant très faibles, nous n'avons pas pu réaliser d'autres essais de caractérisation (pénétrabilité). Les pourcentages de désenrobage de chaque couche des ECF recyclés (avec 50% des GBR) thermique et photochimique sont présentés dans le tableau 5.10. Ce dernier représente l'évolution de la consistance du liant en fonction des jours de vieillissement.

Tableau 5.10 Pourcentages de désenrobage des ECF recyclés après des extractions séquencées

	ECF recyclé thermique			**ECF recyclé photochimique**		
	Point 1 (%)	**Point 2 (%)**	**Point 3 (%)**	**Point 1 (%)**	**Point 2 (%)**	**Point 3 (%)**
J0	33	12	55	33	14	53
J14	15	12	73	13	16	72
J21	-	-	-	45	31	24

Tout d'abord, on note une difficulté à avoir 3 points bien répartis et à se positionner toujours au même niveau. En effet, le liant durci et donc change de consistance. En analysant les résultats de TBA dans le tableau 5.11, nous pouvons constater une augmentation des TBA entre les points 1 et 2, et 2 et 3, au jeune âge. Ceci signifie que les liants des couches d'enrobage superficiel sont moins durs que celles qui sont profondes. Par contre cette différence s'atténue dès le J14 pour le vieillissement photochimique et à J21 pour le vieillissement thermique. Ceci s'explique par le vieillissement du bitume de l'émulsion dans le temps.

Tableau 5.11 TBA des liants extrait des ECF recyclés après des extractions séquencées

	ECF recyclé thermique TBA			ECF recyclé photochimique TBA		
	Point 1 (°C)	**Point 2 (°C)**	**Point 3 (°C)**	**Point 1 (°C)**	**Point 2 (°C)**	**Point 3 (°C)**
J0	53	51	61	51	54	57
J14	53	55	59	59	53	59
J21	-	-	-	56	55	56

Les résultats de la spectroscopie IR sont présentés dans le tableau 5.12. On remarque qu'au jeune âge, on n'a pas les mêmes indices d'oxydation, ce qui signifie que le mélange n'est pas encore effectué. Nous ne retrouvons pas les évolutions entre les points 1, 2 et 3 obtenues sur TBA. Nous pouvons également dire qu'à priori, dans nos conditions de vieillissement, il n'y a pas d'interaction entre les deux liants, car s'il tel était le cas, le liant devrait être uniforme donc des caractéristiques identiques. Cependant certains résultats des troisièmes points que ce soit la TBA ou la spectroscopie infrarouge sont aberrants et restent à vérifier.

Tableau 5.12 Indices d'oxydation des liants extraits des ECF recyclés après des extractions séquencées

	ECF recyclé thermique- IR			ECF recyclé photochimique- IR		
	Point 1	**Point 2**	**Point 3**	**Point 1**	**Point 2**	**Point 3**
J0	0,4	-	0,5	0,32	-	0,4
J14	1,3	0,7	1,2	1,52	0,5	1,7
J21	-	-	-	0,9	1	0,6

À l'échelle des carottes Chantier : Calage entre ECF échelle labo et ECF échelle réelle

Des échantillons d'ECF extraits d'un chantier effectué par Probinord il y a 10 ans ont été découpés et préparés pour l'extraction et la récupération (figure 5.28).



Figure 5.28 Échantillons d'ECF extraits d'un chantier de Probinord

Après extraction et récupération, les liants issus des carottes ont été caractérisés comme le montre le tableau 5.13.

Tableau 5.13 Caractérisation des carottes d'ECF

TBA (°C)	59
Pénétrabilité (1/10mm)	25
Indice C=O	4,4

La comparaison de la valeur de pénétrabilité des carottes d'ECF (25 1/10mm) et des ECF (vierge et recyclé, thermique et UV) fabriqués en laboratoire montre qu'après 21 jours de vieillissement à 44°C, on n'a pas encore atteint le même vieillissement que les carottes (âgées d'environ 10 ans). Par contre, on peut également comparer aux résultats de l'étude du vieillissement thermique à 85°C effectuée dans la première partie du chapitre (Tableau 5.14).

Tableau 5.14 Rappel des caractéristiques des liants extraits d'ECF vieillis en laboratoire à 85°C (vieillissement thermique étudié dans la partie 1 du chapitre)

	J1	**J5**	**J9**	**J11**	**J14**
TBA (C°)	51	55	57	58	61
Péné (1/10 mm) à 25 °C	60	40	35	33	30
Ic=o	1,33	2,63	3,52	4,92	6,21

On constate au bout de 14 jours (période définie pour le vieillissement thermique en laboratoire) l'obtention d'un liant avec des caractéristiques comparables à celui extrait de la carotte de chantier (légèrement plus oxydé sur l'échantillon testé en labo).

Cette étude complémentaire qui avait pour objectif de mettre en évidence les effets des rayons ultraviolets arrivant directement sur le matériau de chaussée bitumineuse placée en couche de roulement, comme l'ECF par exemple, comparativement à un simple effet thermique de la chaleur dans la masse du matériau bitumineux, a été effectuée et présentée dans l'Annexe 4. Cette étude a permis également d'évaluer l'influence de divers paramètres tels que la nature du bitume, l'épaisseur du film des échantillons ou encore des durées d'exposition plus importants.

5.7 Conclusion

Cette étude a permis le développement d'une méthodologie de vieillissement thermique et photochimique accéléré en laboratoire sur ECF, qui n'existait pas auparavant. Ces méthodes ont été basées sur des procédures européennes de vieillissement sur liant et sur enrobé qui ont été combinées et adaptés aux ECF.

L'objectif de cette étude a été d'évaluer les performances des ECF vierges et des ECF avec des GBR au cours du temps. Cependant, l'étude de l'évolution du comportement des ECF est complexe vu les différentes contraintes citées dans le chapitre (épaisseur faible de l'ECF,

technique à froid, mélange liant neuf et liant de GBR, dissocié l'action entre le vieillissement thermique du vieillissement UV). Ainsi, afin d'apporter des réponses à toutes ces problématiques, nous étions amenés à travailler sur différentes échelles. Nous avons tout d'abord, étudié le vieillissement thermique à 85°C, ensuite évaluer le vieillissement thermique et photochimique à 44 °C. Enfin, nous comparé les résultats des ECF laboratoires avec des ECF réels prélevés du chantier.

Pour les deux étapes de vieillissements étudiés, nous avons commencé par la caractérisation des matériaux de base (granulats, liant neuf de l'émulsion et liant de GBR). Ensuite, nous avons étudié le comportement des ECF vierges et des ECF recyclés.

Ainsi concernant le vieillissement thermique, la simulation en laboratoire de celui-ci permet ainsi de passer d'un bitume de classe 70/100 au départ, à un bitume de classe 20/30 après 14 jours dans une étuve ventilée, à 85°C. Le bitume a donc perdu 4 classes de consistance. Cette procédure inspirée des méthodes RILEM+LCPC a permis de simuler le vieillissement La TBA, la pénétrabilité, la rhéologie et les pics carbonyle (CO) et sulfoxyde (SO) de la spectroscopie infrarouge confirment bien ces résultats. Ce même phénomène a pu être constaté sur les ECF avec 20, 50 et 100 % GBR. Les formules des ECF avec 50 et 100 % GBR ont été calées avec apport d'additif (fibres de verre fourni par Probinord) et une correction de la granulométrie par des fins calcaires, afin d'augmenter la cohésion. Les analyses effectuées sur les liants extraits de carottes en provenance d'un chantier Probinord datant de 10 ans ont permis de faire une comparaison entre les vieillissements laboratoire et in situ. Les résultats ont montré qu'après 21 jours de vieillissement à 44°C, on n'a pas encore atteint le même vieillissement que les carottes (âgées d'environ 10 ans). Par contre 14 jours à 85°C en vieillissement thermique semblent permettre de simuler le vieillissement in situ d'ECF au bout de 10 ans.

Nous avons pu constater qu'en incorporant une proportion donnée de GBR dans l'ECF (dans notre cas de 20 à 50 %) la proportion de liant apporté par les GBR dans le liant total de l'ECF n'est pas proportionnellement égale aux GBR incorporés dans l'ECF comme cela puisse

paraitre. La proportion de bitume apporté par les GBR est plutôt inférieure à celle de GBR introduit dans l'ECF.

La simulation de l'évolution de l'émulsion a permis de faire une comparaison avec l'évolution de l'ECF ; cette expérience nous a permis de constater une bonne concordance aux différents stades de vieillissement (nombre de jours passés à l'étuve). L'extraction séquencée a permis de comprendre certains phénomènes liés à l'interaction entre le liant d'apport et le liant de GBR tels que l'évolution des liants dans le temps ce qui rend la caractérisation plus complexe (les points définis pour la dissolution ne peuvent pas être un repère de caractérisation puisque la consistance du liant change).

L'étude de l'impact du vieillissement photochimique en comparaison avec le thermique sur des ECF vierges et recyclés a permis de conclure que l'épaisseur de l'émulsion joue un rôle très important dans l'avancement du vieillissement photochimique : les émulsions d'épaisseur 1.5mm ont vieilli plus que les émulsions d'épaisseur 3mm. Ces résultats ont été confirmés par les essais de consistance (TBA et pénétrabilité) ainsi que par spectroscopie IR. La comparaison de deux vieillissements photochimique et thermique a révélé un comportement quasi similaire des liants résiduels qui ont passé de grade 70/100 au grade 50/70 après 21 jours de vieillissement. Néanmoins, le vieillissement photochimique était légèrement plus important que le vieillissement thermique tel qu'il a été démontré par spectroscopie IR et par rhéologie.

La caractérisation des liants extraits des ECF vierges thermique et UV a montré que leurs propriétés sont équivalentes (Δ Pénétrabilité faible). La rhéologie a également confirmé cette conclusion.

L'incorporation des GBR a engendré le changement de la classe de bitume dès le premier jour de vieillissement (35/50). La spectroscopie IR ainsi que la rhéologie ont confirmé que, quel que soit le vieillissement thermique ou photochimique, le liant extrait des ECF recyclés est toujours plus rigide donc plus vieilli que celui extrait des ECF vierges. En se basant sur les

critères SHRP, les ECF thermiques recyclés ne se déforment d'une manière permanente qu'au-delà de 65°C.

Nous avons également optimisé les paramètres de l'extraction séquencée, cette technique qui a permis d'obtenir des informations concernant le double enrobage des ECF recyclés et déterminer ensuite le rôle du liant des GBR à long terme dans le mélange.

Ce travail a montré la complexité de travailler sur le vieillissement photochimique des liants bitumineux, d'une part à cause des préparations expérimentales, mais aussi par la difficulté de le comparer au vieillissement thermique, en utilisant les mêmes indicateurs (Ic=o). De plus, l'incorporation des GBR dans la formulation des ECF rend la situation plus délicate vu qu'on utilise les mêmes indicateurs pour la spectroscopie infrarouge. Il serait important de trouver d'autres indicateurs qui permettent de différencier l'évolution des liants des GBR et les liants de l'émulsion lors des essais de spectroscopie IR.

Pour enrichir cette étude, une étude complémentaire du vieillissement UV et thermique a été effectuée à plus long terme et/ou à une température supérieure à 44°C ce que nous a permis d'accélérer encore plus le processus de vieillissement. Nous avons également évalué le rôle de l'épaisseur de vieillissement UV sur les films de bitume.

CHAPITRE 6

VALORISATION DES GBR DANS LES ECF- INCIDENCE DES CYCLES GEL-DÉGEL SUR LES PERFORMANCES DES ECF

6.1 Introduction

Le rôle d'une chaussée est de supporter le trafic lourd. La structure routière assure la distribution et transmission des contraintes et déformations tolérables au sol support. Cependant, la structure routière est sujette aux aléas climatiques et aux agressions mécaniques.

Dans un contexte climatique plus ou moins rigoureux comme celui de la France, et encore plus particulièrement comme celui du Canada, l'interaction entre la charge et le climat a une grande influence sur la performance des structures de chaussées (Mills et Andrey, 2002)**.** En effet pendant la période de dégel, avec la fonte de la glace, la structure de la chaussée s'affaiblit. Cet affaiblissement la rend fragile à la sollicitation due au trafic et par conséquent entraine l'apparition des divers phénomènes de dégradation, plus particulièrement l'endommagement par fatigue et l'orniérage structural. Les aléas météorologiques sont considérés comme les facteurs majeurs de la plus grande partie des dommages sur les chaussées dans les zones froides (CCLEAR, 2015).

L'absence d'entretien de ces dégradations peut entrainer la ruine de la structure de la chaussée. Parmi les techniques d'entretien, utilisées dans le monde mais plus particulièrement en France, les plus courantes sont encore l'enduit superficiel d'usure (ESU) et l'enrobé coulé à froid (ECF), dans une moindre mesure le retraitement à froid de l'ancienne chaussée, le béton Bitumineux à Froid (BBF), ou encore très fréquemment les enrobés flexibles municipaux.

Le présent travail est centré sur l'effet des sollicitations climatiques et plus particulièrement les incidences des cycles gel/dégel sur la chaussée en général, mais plus particulièrement sur la couche de roulement de chaussée ; il a notamment pour objectif de vérifier en laboratoire si la technique d'ECF résiste ou non aux conditions climatiques sévères. La première partie est

une description du phénomène gel-dégel et ses impacts sur la chaussée. La deuxième partie décrit la démarche expérimentale adoptée. Ensuite, les différents résultats sur les matériaux de base à savoir liants bitumineux, granulats vierges et GBR ainsi que le rôle protecteur des enrobés coulés à froid (ECF) dans un complexe enrobé à chaud + ECF, sont présentés.

Il faut bien noter que si des recherches sont plus classiquement menées au niveau des couches structurelles de chaussées, peu de chercheurs ont étudié l'influence de cycle gel/dégel (CGD) sur la couche de roulement et plus spécifiquement sur les ECF (aucun travail scientifique publié à notre connaissance), ce qui constitue la difficulté, mais aussi l'originalité de ce travail.

6.2 Étude bibliographique sur le phénomène du gel-dégel

6.2.1 Prise en compte du gel dans le dimensionnement des chaussées

Les premières méthodes de conception au gel sont des méthodes empiriques développées dans le but de protéger partiellement la structure de la chaussée des effets des soulèvements différentiels résultant du comportement des sols gélifs. Aujourd'hui, les nouvelles approches intègrent des modèles de calculs mécanistes pour prédire le soulèvement et dimensionner la structure de la chaussée en fonction d'une valeur de soulèvement admissible (St-Laurent, 2006).

6.2.1.1 Méthode empirique

Les méthodes empiriques sont constituées d'une série de mesures préventives qui ont pour objectif de minimiser la dégradation de la chaussée engendrée par le soulèvement dû au gel et de la perte de la capacité portante lors du dégel. Plusieurs méthodes empiriques visant la protection contre les effets du gel existent. Parmi ces différentes méthodes, on trouve la mise hors gel de la structure qui consiste à changer les matériaux gélifs par d'autres non gélifs jusqu'à la profondeur maximale prévue du front de gel permettant ainsi d'obtenir des épaisseurs plus importantes de la structure de la chaussée, une isolation thermique et une stabilisation. Il est également possible de réaliser un calcul de dimensionnement en prenant en

considération la baisse de portance liée aux dommages engendrés par le gel (définir des épaisseurs minimales requises pour garantir la résistance de la chaussée dans ces conditions limites). L'isolation thermique, basée sur l'utilisation des couches thermiques isolantes à savoir polystyrène expansé ou le polystyrène extrudé, le polyuréthane et l'argile expansée, est aussi une possibilité permettant la protection de la chaussée des effets néfastes des cycles gel dégel. Enfin, le traitement par des liants hydrauliques permet d'améliorer la résistance mécanique du sol gélif. En effet, les liants hydrauliques sont capables de réduire la sensibilité au gel du sol gélif (St-Laurent, 2006).

6.2.1.2 Méthode mécaniste empirique

Les méthodes mécanistes-empiriques sont basées sur les caractéristiques physiques et thermiques des sols pour prédire leurs comportements lorsqu'ils sont soumis aux températures de congélation.

Les méthodes mécanistes-empiriques contiennent un modèle de calcul de la profondeur de gel et des soulèvements. Le résultat du calcul est alors comparé à des valeurs empiriques. Au Canada, le logiciel Chaussée 2 (St-Laurent, 2006) offre au concepteur la possibilité de dimensionner la structure de la chaussée afin de contrôler la profondeur de gel. Ceci permettra d'assurer la prise en compte des soulèvements légers pour maintenir un niveau de service ainsi qu'un confort au roulement acceptable, en se basant sur le modèle SSR de Saarelainen en 1992**.**

6.2.2 Analyse du phénomène gel-dégel

6.2.2.1 Effet de la période du gel

La pénétration du gel dans les sols est décrite comme un processus thermodynamique dû au transfert de chaleur entre la chaussée et l'air pendant la période hivernale. Ce processus d'infiltration du gel est aggravé par différents facteurs tels que l'humidité, l'évaporation et la fonte de la neige.

La profondeur de gel est considérée comme un paramètre important à maitriser sur la chaussée. En effet, le gel du sol d'infrastructure est souvent lié à des problèmes de comportement de la chaussée. L'infiltration de gel dans les sols est due à la température de l'air et les propriétés thermiques du sol. Il est également important de souligner d'autres facteurs climatiques accélérant l'introduction du gel dans sols tels que le vent et l'humidité. (Doré et Zubeck, 2009 ; St-Laurent, 2006).

L'apparition des lentilles de glace dans les sols d'infrastructure engendre des soulèvements de la surface de la chaussée. Ces soulèvements de la surface du support sont généralement observés à la fin de la période hivernale (profondeur de gel est maximale). (St-Laurent, 2006).

Selon (Farcette, Doré et Nowamooz 2010), les soulèvements différentiels peuvent être définies comme suit :

- les soulèvements différentiels ordinaires dont la forme est similaire à des bosses;
- les soulèvements différentiels inverses qui consistent à des dépressions dans les surfaces soulevées;
- les ondulations qui se traduisent par des séries de bosses et de creux consécutifs;
- les soulèvements différentiels transversaux.

Ces soulèvements de la surface touchent le confort et la sécurité des voies des usagers de la route et peuvent entrainer, dans des cas extrêmes, la perte de contrôle du véhicule. La Figure 6.1 montre le mécanisme du soulèvement différentiel transversal.

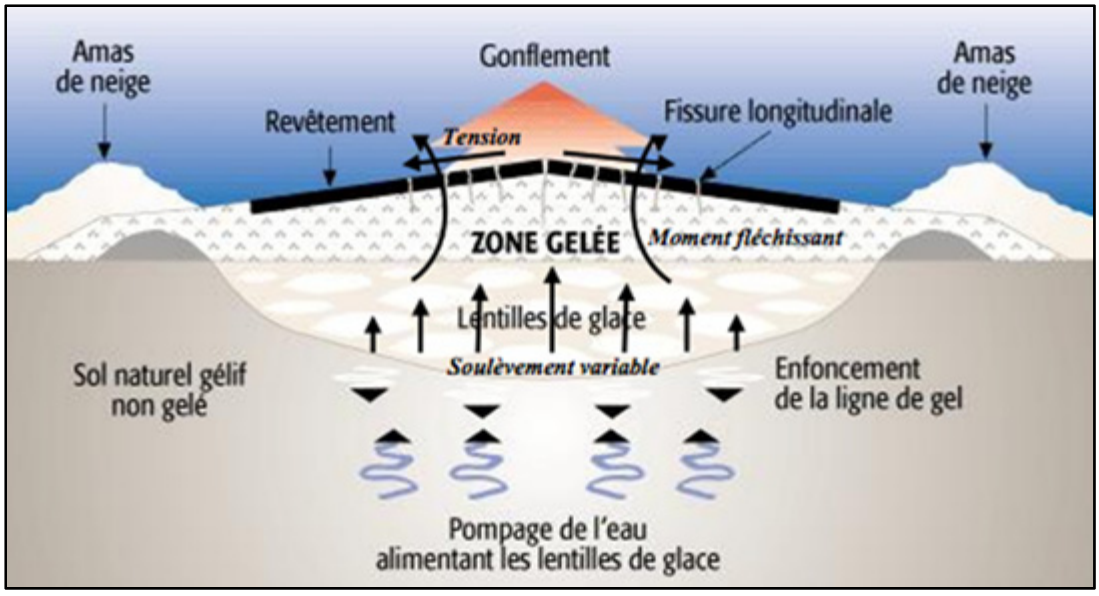


Figure 6.1 Soulèvement de la chaussée sous l'effet du gel
Tirée de Farcette, Doré et Nowamooz (2010)

Pour faire face à la problématique de la perte de portance du sol au dégel, l'ingénieur possède la possibilité d'adapter la structure de façon qu'elle résiste à l'action du gel ou d'essayer de neutraliser l'action du gel ; on retrouve alors entre autres les méthodes empiriques de protection au gel détaillées auparavant.

6.2.2.2 Effet de la période de dégel

La fonte de la neige, dite la période de dégel, conduit à une fragilisation des chaussées. Durant cette période délicate, les matériaux constituant la chaussée perdent de leur cohésion et n'assurent plus leur fonction qui est la capacité de supporter les charges lourdes. Ceci peut entraîner la destruction totale de la route (Figure 6.2).

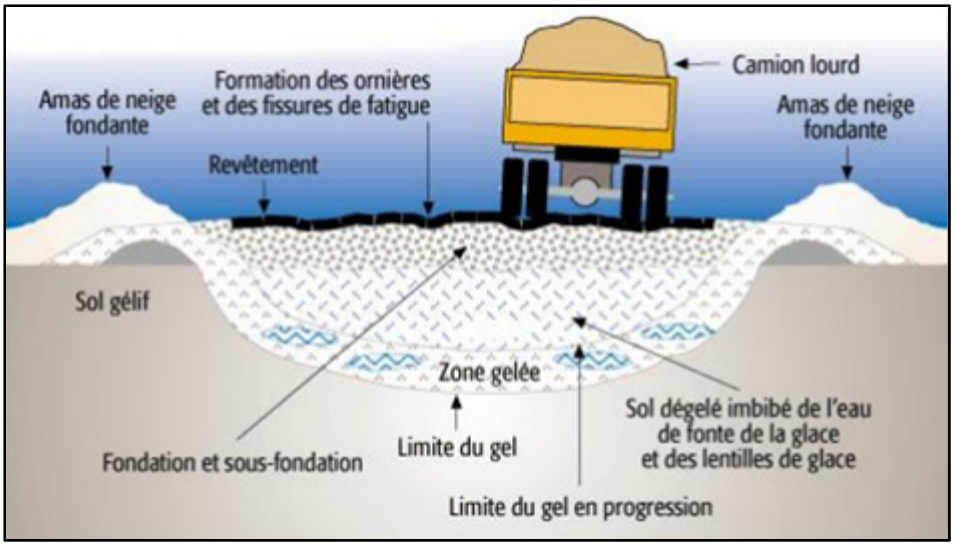


Figure 6.2 Effet de dégel sur la chaussée
Tirée de Farcette, Doré et Nowamooz (2010)

Pendant la phase du dégel, la température augmente ce qui permet à l'isotherme 0°C de s'infiltrer dans la structure routière. Cette pénétration est effectuée à travers un front de dégel supérieur et un front de dégel inférieur. Ceci est dû au réchauffement de la couche de surface (Doré, 1997). L'action du dégel réalisée sur le sol génère comme conséquence une couche affaiblie et saturée de matériau granulaire dégelé présent juste sous la couche du revêtement.

Lors du dégel, les lentilles de glace formées en hiver commencent à fondre à la même vitesse que la progression du front de dégel. L'excès de l'eau interstitielle générée par la fonte de la neige est incapable d'être drainée rapidement, ce qui entraine la baisse de la résistance au cisaillement du matériau.

La quantité d'eau excédentaire existante suite à la fonte des lentilles de glace contribue à la formation d'une zone avec une teneur en eau plus élevée que celles avant gel provoquant ainsi un gonflement du sol. Si l'eau reste piégée (non évacuée), le sol va rester gelé et imperméable. Si le sol devient saturé en eau, sa limite de liquidité peut être dépassée. Ceci a pour conséquence une perte de toute consistance et donc une chute de la résistance de la structure de chaussée à supporter les charges appliquées par les véhicules (Doré et Zubeck, 2009).

Selon Lamothe (2014), l'entretien hivernal des chaussées requièrent l'utilisation de produits de déglaçage dont leur utilité sur site est fortement liée à leur concentration. Cependant, il existe des produits de déglaçage tel que le chlorure de sodium (NaCl) qui ne peuvent être utilisés qu'en présence d'eau afin de démarrer le processus de fonte de la glace. La quantité d'eau disponible dans les mélanges influence l'action de ces produits. Selon leur concentration, les sels de déverglace sont efficaces des températures allant de -3 à -12°C et de -12 à -20°C respectivement. Au-delà de ces températures, il faut utiliser des abrasifs. Les produits de déglaçage servent à diminuer le point de congélation de l'eau (Bouey et Gelin, 1991; Gelin, 1989).

6.2.2.3 Cycle de gel dégel

L'hiver est une période plus ou moins délicate pour les chaussées routières en fonction des régions et pays. La variation de température est essentiellement le principal facteur de l'apparition des cycles gels dégels. Ces derniers entrainent des dégradations sévères sur des ouvrages telles les routes. Il est donc commun d'avoir des nids-de-poule, des fissures et autres dégâts liés au gel sur les routes dans les endroits froids. De nombreuses études antérieures ont été menées sur les dégradations dues au phénomène du gel dégel durant ces dernières décennies (Doré et Zubeck, 2009 ; Lamothe, Perraton et Di Benedetto, 2016).

Le mécanisme des cycles gel dégel dans les enrobés se traduit par une infiltration d'eau à l'intérieur des vides de l'enrobé. L'impact de cette infiltration d'eau est aggravé par la variation de l'amplitude de la température (passage des valeurs positives aux valeurs négatives). Le changement de volume du mélange (causé par l'expansion des molécules de l'eau qui se transforme en glace à basse température) ainsi que la variation de la température sont les principaux facteurs de dégradations des chaussées lors des cycles gel dégel (Goh et You 2012). La transformation de l'eau en glace engendre une modification dans la distribution des vides dans le mélange ce qui entraine la dilatation de la chaussée ainsi que la fragilisation du sol support.

Deux solutions sont envisageables afin d'éviter la dégradation de la chaussée sous l'influence des cycles de gel-dégel :

- utiliser un sel de déverglaçage pour ralentir la formation de la glace (cette technique peut être efficace, mais des phénomènes peuvent être observés liés à leur utilisation);
- empêcher l'eau de pénétrer à l'intérieur du sol. L'utilisation de la technique ECF pourrait permettre d'y répondre.

Le travail expérimental de cette partie est ainsi axé sur l'étude de l'influence du phénomène de gel-dégel sur la durabilité des ECF, ainsi d'évaluer son rôle protecteur de la couche inférieure de la chaussée.

Compte tenu de la bibliographie effectuée, nous tenterons de répondre à ces interrogations :

- quel est l'impact des cycles gel-dégel sur les matériaux constituant un ECF : le liant seul, les granulats (vierges/GBR), et sur les ECF ?
- les sels de déverglaçage ont-ils une influence sur les propriétés des matériaux ?
- l'ECF peut-il protéger des couches inférieures de la chaussée, préalablement ornièrées ?

6.2.3 Démarche expérimentale pour l'étude du phénomène gel-dégel

6.2.3.1 Méthodologie adoptée

Afin d'atteindre les objectifs fixés, nous avons défini une démarche expérimentale en deux étapes principales:

- à l'échelle de l'ECF seul afin de définir déjà l'impact de gel-dégel sur ce matériau fini : le travail sera mené d'une part sur les matériaux de base (granulats vierges, GBR, et émulsion), et d'autre part sur les ECF à base de granulats neufs appelés par la suite ECF vierge et sur ECF avec granulats neufs et 50% GBR appelé ECF+GBR;
- à l'échelle d'un complexe ECF+ enrobé bitumineux afin d'évaluer le rôle protecteur ou non des ECF lorsqu'ils sont appliqués sur un enrobé ornièré. Pour cela, le travail a été mené

sur un matériau bicouche de 10 cm composé d'un enrobé de 8 cm surmonté d'un ECF de 2 cm.

Les principales étapes expérimentales sont les suivantes : formulation, stabilisation, essais de gel-dégel, abrasion, extraction, caractérisation et orniérage.

6.2.3.2 Formulation, préparation et conditionnement des différents ECF

Tous les matériaux, utilisés dans cette partie, sont fournis par l'entreprise Probinord. Les propriétés de ces matériaux sont détaillées dans le chapitre 3 (section : matériaux employés pour les essais en France). Les formulations des ECF utilisées pour ce chapitre sont rappelées dans l'Annexe 1.

En fonction du type d'échantillon à tester, des masses plus ou moins importantes d'ECF sont coulées (figure 6.3) :

- 800g pour les galettes ECF destinées à l'essai d'abrasion (à droite A);
- 3500g pour le coulage des ECF sur enrobés bitumineux (essai orniérage) (à gauche b).

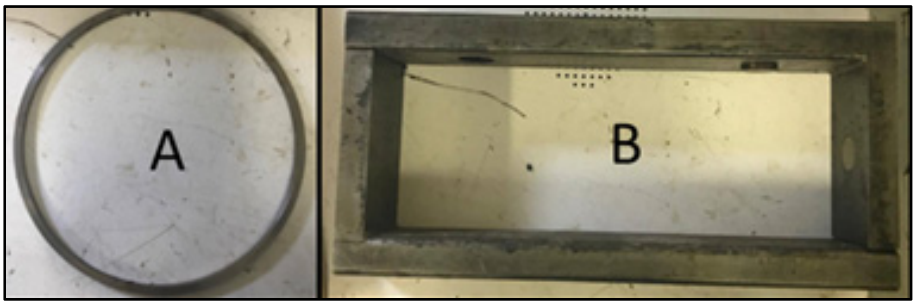


Figure 6.3 Moules utilisés pour la fabrication des ECF,
A) pour l'essai de l'abrasion, B) pour l'essai de l'orniérage

La figure 6.4 présente les échantillons d'ECF réalisés pour les essais d'abrasion et les essais d'orniérage après la réalisation des cycles gel dégel.



Figure 6.4 Échantillons fabriqués : à droite) complexes ECF + enrobé à chaud, à gauche) galettes d'ECF vierge

Suite à la formulation, une étape de stabilisation est primordiale pour permettre aux matériaux ECF de murir rapidement et notamment permettre le départ de l'eau et d'éventuelles fractions volatiles. Elle consiste à mettre les échantillons dans une étuve pendant 24 heures à 50°C. La stabilisation est suivie par une mesure de la perte de masse permettant le contrôle quantitatif de l'évaporation totale de l'eau.

Il est à noter que nous avons constaté qu'on atteint une masse constante après le premier jour du conditionnement pour l'émulsion et l'ECF vierge. Pour l'ECF+GBR il a fallu les stabiliser pendant deux jours afin d'obtenir une masse constante au cours du temps. Ceci est pourrait être expliquée par une probable existence d'eau piégée dans les GBR.

6.2.3.3 Fabrication des supports enrobés

Les enrobés à chaud sont fournis par l'entreprise Probinord. Il s'agit d'une formulation de BBSG 0/10 (enrobé pour couche de roulement avec un bitume 35/50) avec des matériaux Voutré selon la fiche technique fournie par Probinord (Annexe 3).
Deux types de plaques ont été fabriqués :

- des plaques avec un pourcentage de vide de 10%, en limite haute des spécifications du BBSG, pour faciliter la pénétration de l'eau et se placer dans des conditions sévères, tout en restant conforme aux exigences normatives;
- des plaques avec un pourcentage de vide de 15%, soit 5% au-dessus des spécifications pour favoriser une infiltration et gélification de l'eau dans le support.

Les plaques d'enrobés à chaud sont de 8 cm d'épaisseur, et fabriquées de façon à pouvoir couler l'ECF sur 2cm ensuite et ainsi concevoir le complexe. Pour garantir une bonne maitrise du compactage avec la table de compactage MLPC, une cale en bois de 2cm d'épaisseur est disposée au fond du moule. Un orniérage est réalisé sur la plaque d'enrobé seule dans le but de provoquer une déformation (dégradation) du support ; puis la cale en bois est enlevée et ensuite nous coulons l'ECF vierge ou ECF + GBR pour l'obtention d'un complexe sur 10 cm. Enfin le complexe est stabilisé à 50°C pendant 24h ou 48h pour ECF+GBR.

6.2.4 Essai de gel-dégel

Il n'existe pas d'essai normalisé sur la tenue aux essais de gel-dégel, mais plusieurs normes sont à notre disposition. Il a donc fallu définir une procédure interne représentative au mieux de conditions réelles, mais adaptées au matériel disponible.

Pour cela, nous avons adapté la norme spécifique aux granulats (NF EN 1367-1)**.** Par contre, nous n'avons pas pu faire le palier autour de 0°C, car notre enceinte ne permet pas la programmation de trois paliers. Le nombre de cycles que nous avons défini est 10 cycles ce qui correspond à une année hivernale en France. Des essais complémentaires ont été menés sur certains échantillons (enrobé à 15% de vides) sur 20 cycles pour sévériser les essais. Le cycle gel-dégel que nous avons réalisé est représenté dans la figure 6.5.

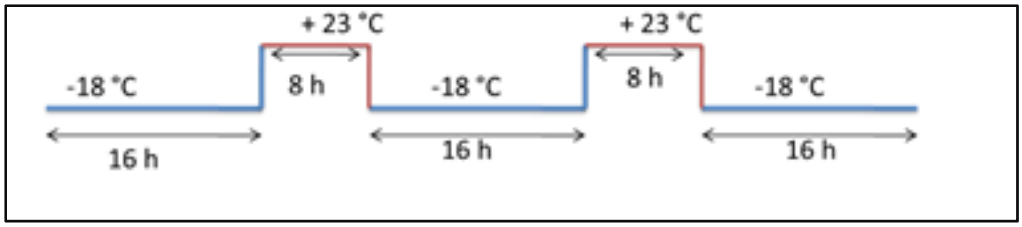


Figure 6.5 Description des cycles pour la réalisation des essais de gel-dégel

L'enceinte thermique disponible au laboratoire est une *Tenney Environmental*, modèle T10C, de volume interne 2 x 0,69 x 0,71 m^3 avec une puissance de compresseur de 2,5kW. La plage de température de l'enceinte s'échelonne de -20°C à +60°C. L'enceinte est ainsi programmée pour atteindre deux paliers de température : +23 °C et -18°C. La température est maintenue pendant respectivement 8h et 16h. Dans tous les cas, la durée pour passer d'un palier de température à un autre est non réglable et a été mesurée (19 min), ce qui équivaut à un taux refroidissement / Réchauffement de l'air de 2.2°C/min.

Pour nos différents échantillons, trois conditions de conservation pendant la réalisation des cycles de gel-dégel ont été retenues et le tableau 6.1 résume les différents essais réalisés :

- conservation dans l'air;
- conservation dans de l'eau;
- conservation dans eau + sel de déverglaçage (2% en masse).

Cette dernière condition a pour objectif de ralentir la gélification de l'eau ou de fondre le verglas. Le sel de déverglaçage a été fourni par Probinord. Le dosage est de 2% en pourcentage massique dans l'eau.

Le nombre d'échantillons est de deux galettes en parallèle par condition et par type d'ECF soit au total 12 échantillons dont six galettes pour réaliser l'essai de l'abrasion et six galettes qui subissent une étape d'extraction et de récupération afin de caractériser le liant bitumineux.

Tableau 6.1 Synthèse des différents essais réalisés sur nos matériaux

Matériaux	**Essais de gel dégel avec conservations**			**Essais de caractérisation avant et après CGD**		
	Air	**Eau**	**Eau+ sel**	**Orniérage**	**Abrasion**	**Caractérisation liant (TBA/rhéologie)**
Granulats	x	x				
GBR	x	x				x
Bitume pur et additivé	x	x				x
Émulsion	x	x	x			x
ECF	x	x	x		x	x
ECF+GBR	x	x	x		x	
Enrobé support	x	x	x	x		
Complexe ECF	x	x	x	x		

6.2.5 Moyens de caractérisation

6.2.5.1 Au niveau des granulats vierges et GBR

Deux approches sont identifiées pour évaluer la sensibilité au gel: la perte de masse et l'observation visuelle.

Perte de masse

Pour évaluer la perte en masse des échantillons nous calculons le coefficient de perte en masse (F) donné par la relation suivante 6.1.

$$F = (M_1 - M_2)/M_1 \quad (6.1)$$

M_1 : la masse sèche initiale avant le cycle gel-dégel.
M_2 : la masse sèche initiale après le cycle gel-dégel.

Observation visuelle

Cette caractérisation a pour objectif d'évaluer visuellement l'évolution de forme des échantillons (notamment la cassure de certains qui conduirait à une évolution de la granulométrie).

6.2.5.2 Au niveau du liant bitumineux

Nous avons trois types d'échantillons à caractériser (avant et après CGDG):

- le liant bitumineux seul ayant servi à fabriquer l'émulsion;
- le liant bitumineux récupéré de l'émulsion après murissement à l'air libre;
- les liants bitumineux extraits des GBR, ECF fabriqués et conditionnés.

Dans ce dernier cas, nous devons d'abord séparer le bitume des granulats. Le processus est réalisé en deux étapes, dont la première consiste à séparer le bitume des granulats au moyen d'un lavage par solvant puis centrifugation, et la seconde à le récupérer par séparation du solvant à l'aide d'un évaporateur rotatif.

Après extraction et récupération du liant bitumineux, les différents essais réalisés afin de le caractériser sont les suivants (voir chapitre 5) :

- pénétrabilité NF EN 1426;
- point de ramollissement NF EN 1427;
- module complexe et de l'angle de phase NF EN 14770.

6.2.5.3 Au niveau des ECF

Peu d'essais de caractérisation existent au niveau des ECF. L'essai d'abrasion a été retenu pour évaluer l'adhésion superficielle des granulats selon la norme NF EN 12274-5. Par type de conditionnement gel-dégel, deux galettes d'ECF sont réalisées. Une fois les cycles de gel-dégel terminés, une observation visuelle est réalisée. Une galette sera réservée à l'analyse du liant bitumineux et une autre galette subira un essai d'abrasion. L'essai consiste en une action d'abrasion réalisée au moyen d'un cylindre de caoutchouc dur, qui exerce une pression de frottement imprimée selon un mouvement de rotation planétaire. Cette pression est appliquée pendant 5 min, à la surface de l'échantillon du matériau bitumineux coulé à froid, préalablement préparé, mûri en étuve et humidifié par immersion. Cet essai ressemble à l'essai de l'abrasion de l'ISSA, détaillé dans le chapitre 2.

6.2.5.4 Au niveau des complexes enrobés à chaud+ ECF

Une fois les cycles de gel-dégel réalisés sur les complexes, une observation visuelle est faite sur les différents échantillons. Puis sont réalisés des essais d'orniérage d'une part sur deux plaques de référence (enrobés seuls sans ECF) et d'autre part sur les complexes enrobés à chaud pré-orniérés + ECF. Le passage d'une roue chargée simulant un trafic lourd est réalisé à 60°C à une fréquence de 1Hz et permet de déterminer la résistance aux déformations permanentes du matériau. Le nombre de cycles peut aller jusqu'à 100 000.
Il est à noter que les essais d'orniérage ont été réalisés conformément à la norme pratiquée sur les enrobés classiques à savoir 60°C.

6.3 Résultats expérimentaux et discussion

6.3.1 Observation visuelle des granulats vierges et GBR

L'essai de gel-dégel est réalisé sur des granulats sans tamisage de l'échantillon, et selon la norme NF EN 1367-1. Il consiste à imbiber un échantillon de granulats dans l'eau pendant 24h, puis lui faire subir les 10 cycles gel-dégel. À l'issue de ces cycles, la résistance au gel des

gravillons est caractérisée par leur perte de masse en fin d'essai. Il convient d'évaluer visuellement la variation de la taille des granulats. Le coefficient de perte en masse F est calculé à partir de la masse des granulats avant (M_0) et après (M_1) de l'essai gel-dégel et par l'équation 6.2**.** Le coefficient de perte en masse doit être inférieur à 2% de la masse totale. Le même essai a été réalisé sur les GBR.

$$F= 100\ (1 - M_1/M_0) \tag{6.2}$$

Pour les deux échantillons (échantillons vierges avant et après CGD), il n'y a eu aucune perte de masse après 10 cycles de gel-dégel. Des photos des échantillons sont montrées à la Figure 6.6.

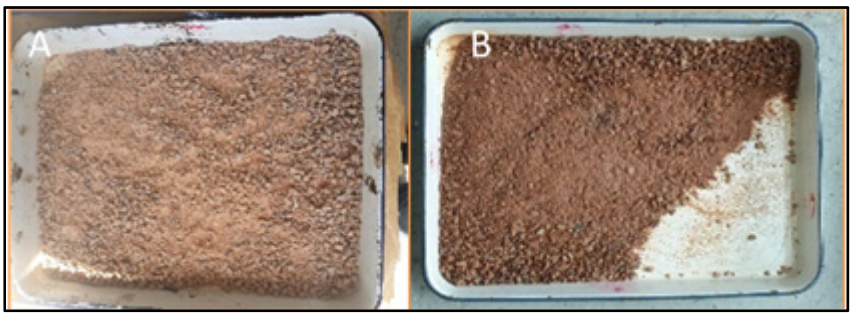


Figure 6.6 Granulats vierge : A) avant CGD m1= 988g B) après CGD m2= 992 g

Nous avons remarqué que le coefficient de perte en masse ne varie pas ni pour les granulats vierges ni pour les GBR. Ces échantillons respectent le critère de perte de masse inférieure à 2%, et ils présentent une très faible sensibilité pour une exposition à 10 cycles de gel-dégel en présence de l'eau ; ceci permet de conclure au caractère non gélif des granulats testés. La figure 6.6 ne montre pas d'altération visuelle des granulats vierges après 10 cycles de gel-dégel qui sont d'après notre étude bibliographique, une durée suffisante pour une éventuelle fragmentation des granulats.

6.3.2 Analyse des liants après cycle gel-dégel (CGD)

6.3.2.1 Au niveau du bitume pur et bitume additivé

Nous avons étudié l'influence des cycles gel-dégel sur le bitume pur et le bitume additivé (bitume polymère) pour deux épaisseurs différentes (1 mm et 3 mm) sachant que 1mm est une épaisseur proche de celle du liant dans l'ECF et 3 mm l'épaisseur permettant de recueillir suffisamment de liant pour travailler. Le bitume additivé est utilisé pour la fabrication de l'émulsion bitumineuse employée pour la formulation des ECF. Dans cette étape, nous avons procédé à la détermination des paramètres conventionnels de ces deux bitumes, à savoir la pénétrabilité et la température de ramollissement. La température de ramollissement bille anneau (TBA) et la pénétrabilité caractérisent de manière indirecte la susceptibilité thermique du matériau. En effet, la TBA augmente lorsque la dureté du bitume augmente (faibles valeurs de pénétrabilité). Dans certains cas, ce durcissement engendre un changement de la classe du bitume. Les résultats sont donnés sur la figure 6.7. Il est à noter que la répétabilité de l'essai est de 1°C et la reproductibilité est de 2°C.

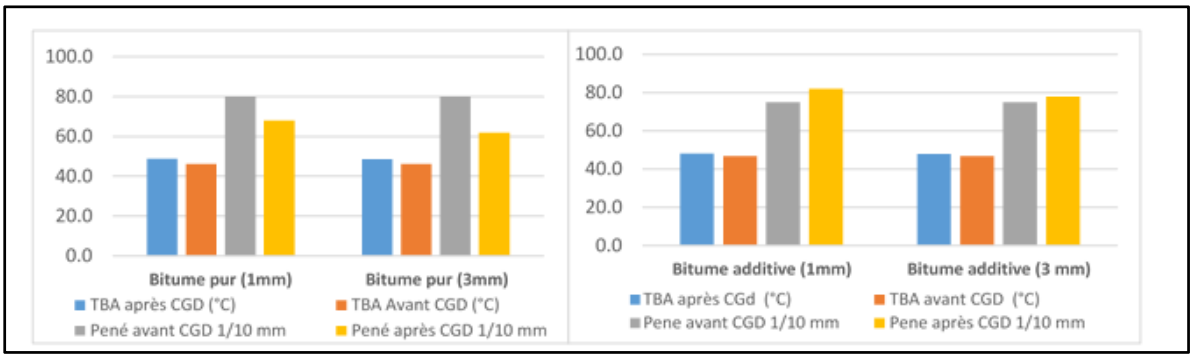


Figure 6.7 Évolution de la TBA et pénétrabilité sur le bitume pur et bitume additivé après et avant CGD

Pour les échantillons de 1 ou 3 mm d'épaisseur, on peut constater :

- avant l'essai de gel-dégel les deux bitumes, additivé et pur sont de grade 70/100 conformément aux valeurs de la fiche technique donnée par le fournisseur ;

- après l'essai de gel-dégel, on note un durcissement des liants qui se traduit par des légères variations des températures de ramollissement et de la pénétrabilité, mais peu significatives, attribuées au réchauffage des liants.

Ces résultats semblent montrer que l'essai de gel-dégel réalisé n'a pas un effet significatif sur le comportement des liants. Les bitumes n'ont pas changé de classe, et donc ils ne sont pas fragilisés.

6.3.2.2 Au niveau du liant de l'émulsion et des GBR

Les échantillons d'émulsion sont préparés de façon à récupérer 1mm d'épaisseur de liant bitumineux après stabilisation 24°C à 50°C. Nous avons suivi la perte de masse en eau contenue dans l'émulsion et constaté qu'elle était totale au bout des 24h. Si

En parallèle nous avons préparé deux échantillons de GBR qui ont subi une étape de séchage (24 heures à 40°C). Une fois ces étapes terminées, nous avons réalisé les cycles gel-dégel sur nos échantillons en les conditionnant soit dans l'air, l'eau, ou dans sel + eau (2% en masse). Les résultats de TBA et de pénétrabilité sont présentés sur la Figure 6.8. Nous remarquons qu'avant les cycles gel-dégel, le bitume issu de l'émulsion et le liant des GBR sont respectivement de classe 70/100 et 10/20. Cette différence de grade est liée au vieillissement du liant dans les GBR. Après les cycles gel-dégels, les classes des deux bitumes n'ont pas changé, quelles que soient les conditions de conservation.

Les résultats de TBA et de la pénétrabilité sont cohérents entre eux excepté pour le bitume de l'émulsion conditionné dans le sel + eau (figure 6.8). En effet, on constate une légère augmentation de la pénétrabilité, autrement dit le bitume devient plus mou. Ce résultat n'est pas confirmé par la TBA et le comportement rhéologique (aucune évolution sur ces deux caractéristiques) et donc peut être attribué à une mesure aberrante. L'essai n'a pas été répété par faute de temps.

Les matériaux bitumineux présentent une susceptibilité thermique et cinétique, qui se traduit par une évolution du module complexe en fonction de la température et la fréquence de sollicitation. Cette propriété leur provient du comportement rhéologique du bitume caractérisé par la combinaison de comportements visqueux et élastique.

Pour affiner l'étude sur nos échantillons, nous avons donc étudié leurs modules complexes qui, contrairement aux essais conventionnels (TBA, pénétrabilité) réalisés à une seule température, sont mesurés sur une gamme de températures plus vaste. L'évolution du module complexe en fonction de la fréquence réduite est représentée par les courbes maitresses.

Ces essais du module complexe ont été réalisés à différentes températures et avec différentes géométries. La procédure d'essai du module complexe est identique à celle utilisée dans les autres parties (chapitre 5). Pour le plan PP8, les températures suivantes dans le sens décroissant ont été testées : de 30°C à - 10°C par pas de 10°C. Par contre pour le plan PP25, nous avons considéré les températures suivantes dans le sens croissant : de 30 °C à 60 °C par pas de 10°C.

Les courbes maitresses construites (Figure 6.9 et 6.10) ont la même allure classique : elles présentent une bonne continuité sans vagues spécifiques, caractéristique d'une bonne homogénéité de bitume sur toute la gamme de températures et fréquences. Nous remarquons que toutes les courbes maitresses du bitume de l'émulsion se superposent, quelles que soient les conditions de conservation (air, eau, sel, avant ou après les cycles gel-dégel). Ceci permet de confirmer la conclusion précédente tirée des résultats des essais plus conventionnels (TBA et pénétrabilité). Les cycles gel-dégel ont peu d'influence sur le bitume de l'émulsion et sur le liant des GBR. Nous pouvons également constater sur les graphiques que les modules complexes du bitume des GBR sont plus élevés que ceux du bitume de l'émulsion d'ECF, ce qui est normal : ceci montre que le bitume des GBR est très rigide (dur), donc très vieux.

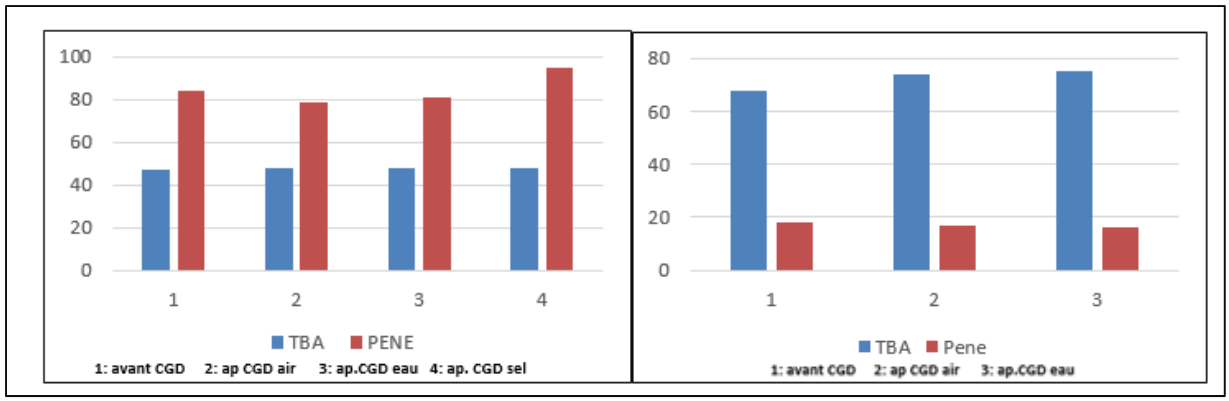


Figure 6.8 Résultats de TBA et de pénétrabilité sur le liant résiduel de l'émulsion et sur le liant de GBR

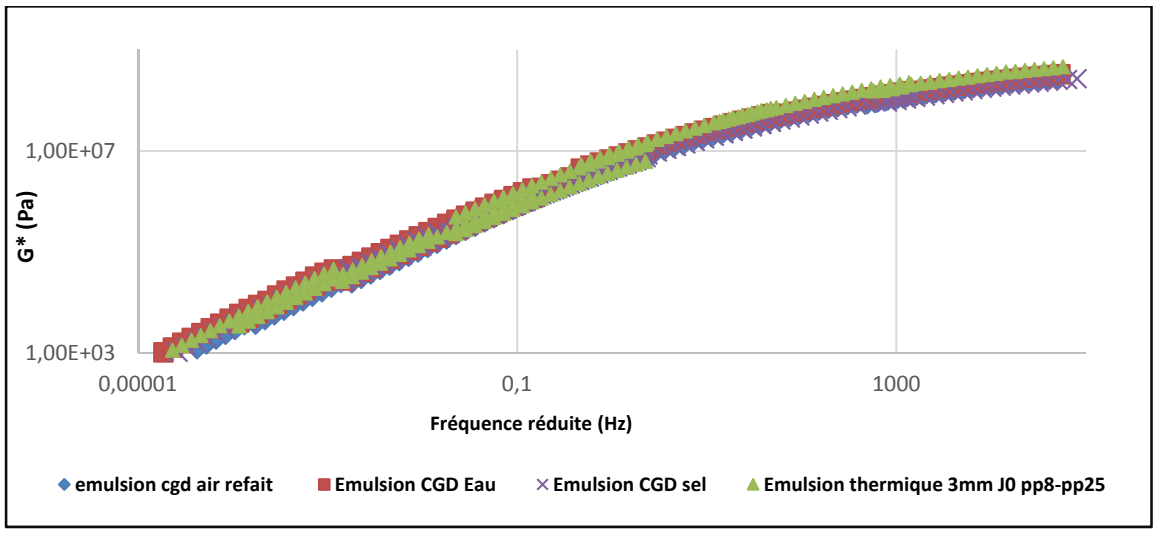


Figure 6.9 Résultats de module complexe de l'émulsion avant et après cycle gel dégel

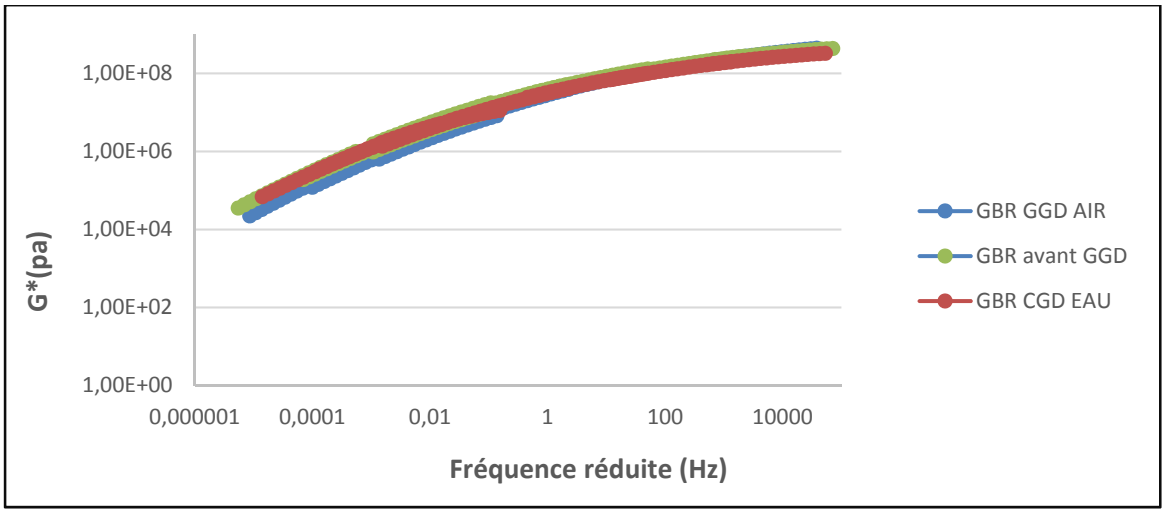


Figure 6.10 Essais de de module complexe des GBR avant et après cycle gel dégel

6.3.2.3 Au niveau des liants extraits des galettes d'ECF

Le but de cette partie est de faire le lien entre l'évolution du comportement du bitume de l'émulsion seul et celui récupéré dans les galettes des ECF fabriqués avec et sans GBR (désignés respectivement par ECF + GBR et ECF vierge), avant les cycles de gel dégel, mais aussi après cycles de gel-dégel dans les différentes conditions de conditionnement.

Après formulation des galettes d'ECF, une étape de stabilisation est réalisée pour éliminer l'eau présente dans l'émulsion (ECF Vierge : à 50°C pendant 24 heures, ECF+ GBR : 50°C pendent 48 h). Si une bonne concordance entre la perte de masse sur l'ECF vierge est constatée, on note la nécessité de prolonger la stabilisation de 24h avec les GBR, liée certainement à une partie d'eau piégée dans les GBR. Ensuite, les galettes stabilisées sont conditionnées dans l'air, eau et solution saline (2%) pour subir les essais de gel-dégel.

Nous avons déterminé le point de ramollissement (TBA) sur les différents liants et ils sont présentés sur les figures 6.12 et 6.13.

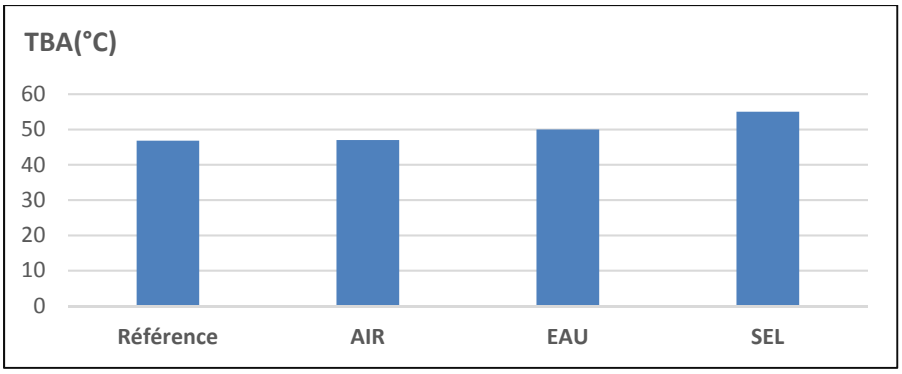


Figure 6.11 TBA sur ECF vierge après 10 CGD

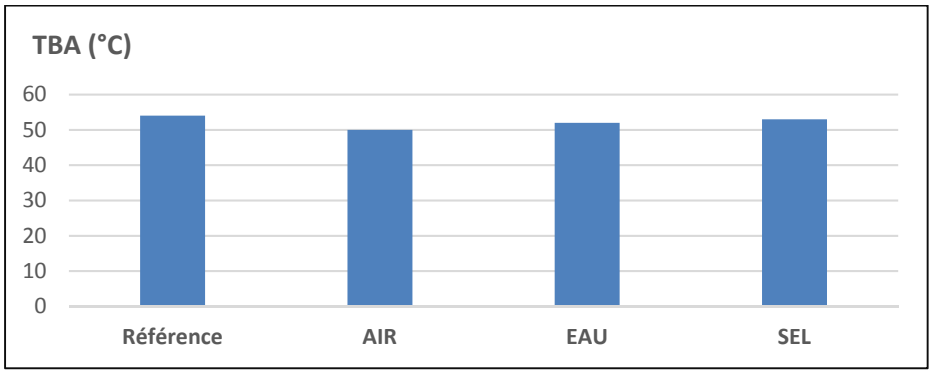


Figure 6.12 TBA sur ECF+GBR après 10 CGD

Dans le cas des ECF formulés avec les GBR, nous avons récupéré, par une extraction/récupération classique, la totalité du liant (liant provenant de l'émulsion + liant provenant des GBR) qui représente un liant moyen de l'ECF.

Par ailleurs, une loi de proportionnalité a été utilisée pour évaluer les caractéristiques (TBA et pénétrabilité) de ce liant moyen issu du mélange de deux liants bitumineux dans le cas d'un mélange homogène (norme NF EN 13108).

Nos résultats montrent une faible évolution après les cycles de gel-dégel des points de ramollissement des liants des ECF avec et sans GBR:

- pour les ECF vierges, légère augmentation de la TBA dans l'eau et dans le sel. Mais les écarts sont très faibles, et la classe du bitume ne change pas (70/100);

- pour les ECF avec GBR, pas d'évolution significative.

Contrairement aux résultats obtenus lors de l'étude du vieillissement thermique et photochimique (chapitre 5), on n'a pas remarqué de concordance entre les résultats obtenus pour les galettes des ECF et ceux des liants seuls.

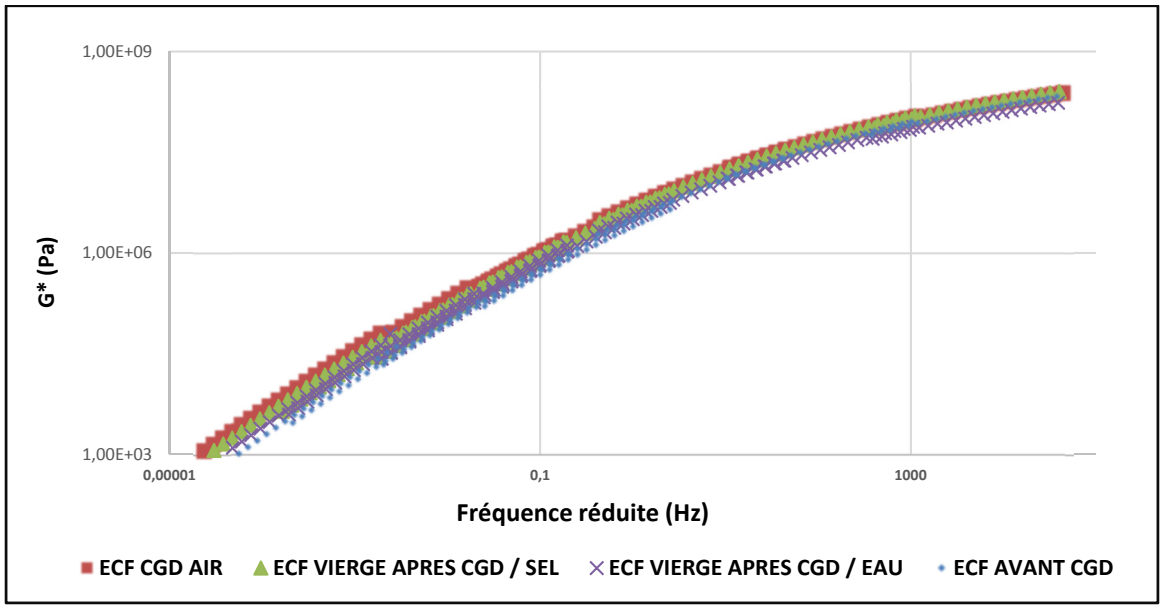


Figure 6.13 Courbe maitresse ECF Vierge et avec GBR avant et après CGD

Dans l'objectif de compléter cette analyse, le comportement rhéologique des liants extraits de différents ECF a été déterminé en appliquant la procédure présentée précédemment. Les courbes maîtresses obtenues sont présentées sur la Figure 6.14 pour les ECF vierges et la Figure 6.15 pour les ECF avec GBR.

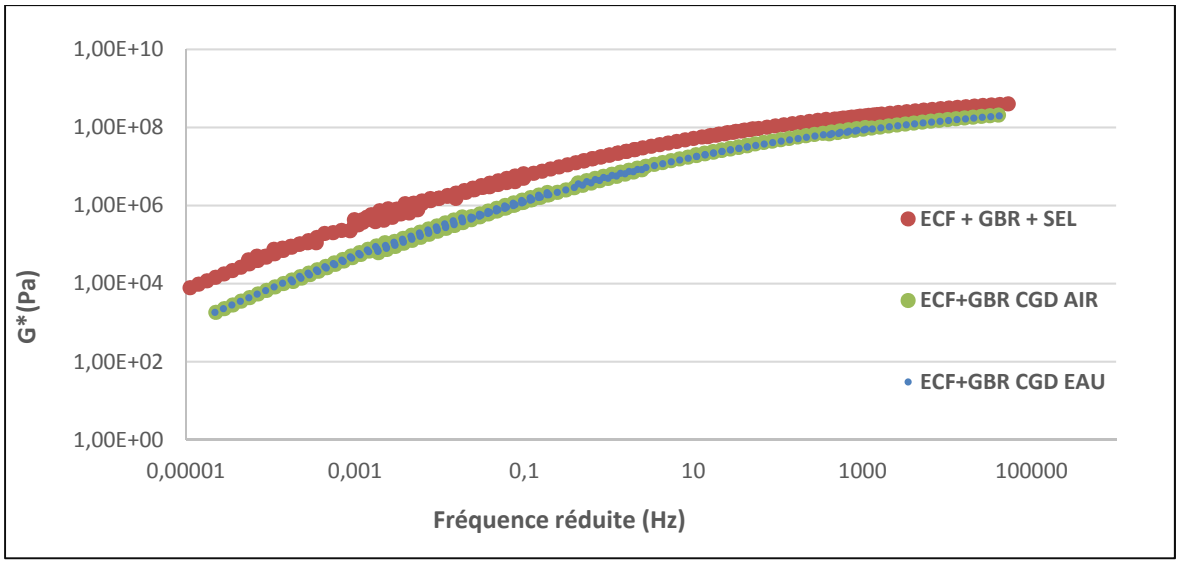


Figure 6.14 Courbe maitresse ECF+GBR

Pour ECF vierge, on note une bonne superposition des courbes de module complexe significative d'une faible évolution des liants. On constate cependant que les modules plus élevés sont obtenus pour le liant extrait d'ECF conditionné à l'air libre, et les plus faibles pour le liant extrait d'ECF conditionné dans l'eau. Ces différences ne sont pas visibles sur les mesures de TBA.

Pour ECF + GBR de la figure 6.15, à faibles fréquences (hautes valeurs de températures), nous pouvons observer la superposition des courbes maitresses d'ECF conditionné dans l'air et dans l'eau. Par contre, pour le liant d'ECF + GBR conditionné dans la solution saline la courbe maitresse se situe au-dessous des autres courbes maitresses, cela signifie que le liant a durci après les cycles gel-dégel. On peut s'interroger sur les interactions du sel et liant bitumineux lors de la récupération délicate du liant. Cependant, cette variation dans le comportement des ECF conditionnés dans l'eau saline n'a pas été constatée lors de l'analyse des résultats des TBA.

La comparaison des courbes maitresses de liant ECF + GBR et ECF vierge permet de vérifier que le liant extrait de l'ECF+ GBR est légèrement plus rigide que celui extrait de l'ECF vierge, mais la différence n'est pas très grande (Figure 6.16).

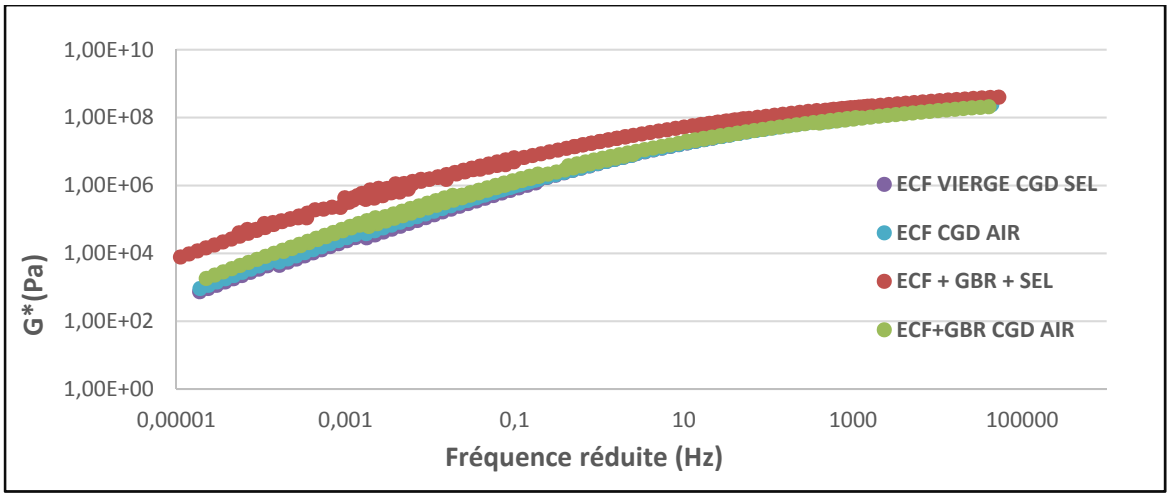


Figure 6.15 Comparaison du comportement rhéologique des liants des ECF vierge et ECF avec GBR

6.3.3 Caractérisation au niveau des ECF

Pour analyser le comportement des ECF, deux essais courants en technique routière sont menés :

- essai d'abrasion, classique sur les galettes d'ECF;
- essai d'orniérage, non réalisé sur ECF trop mince, mais appliqué au complexe enrobé + ECF.

6.3.3.1 Essai d'abrasion

L'essai d'abrasion est une simulation de la résistance des matériaux à l'arrachement sous trafic, et qui caractérise l'effort tangentiel supporté par le matériau. L'essai est exécuté selon la norme NF EN 12274-5. Cet essai d'abrasion, ou dit d'usure, est inspiré de l'essai américain ISSA TB 100, décrit dans le chapitre 2 (Section 2.3.2.3). L'essai d'usure permet de déterminer la perte de matériau (abrasion) des enrobés coulés à froid (ECF) après le passage d'un patin sur des galettes ayant subies l'influence des cycles de gel-dégel. Avant l'essai d'abrasion, les galettes d'ECF sont conditionnées à une température de 60°C pendant au moins 15 min, puis mises

dans l'eau à température ambiante pendant une heure. L'essai d'abrasion est appliqué dans des conditions humides (galettes d'ECF immergées dans l'eau à 25°C). Les résultats sont présentés dans le Tableau 6.3.

Tableau 6.2 essai de l'abrasion sur les galettes d'ECF sans et avec GBR

	Avant cycles GD		**Après Cycles GD**					
			Air		**eau**		**Solution saline**	
Échantillons	**ECF vierge**	**ECF+GBR**	**ECF vierge**	**ECF+ GBR**	**ECF vierge**	**ECF+ GBR**	**ECF vierge**	**ECF+ GBR**
Masse initiale (g)	811.4	825.1	831	842	833	838	831	839
Masse après abrasion (g)	727,8	823.4	644,9	742	772	813,8	760,7	805,8
perte en masse (g)	83,6	1,7	115,8	100	61	24,1	70,3	33,2
Pourcentage de perte en masse %	9,4	0,2	14	11,8	7,3	2,8	8,4	3,9

Il est à noter qu'une seule galette par mélange a été réalisée ce qui conduit à analyser avec prudence les résultats du tableau 6.3 compte tenu de la dispersion des résultats. Pour les matériaux de références, le pourcentage de perte en masse des ECF vierges est supérieur à la valeur limite spécifiée (4%), et est également plus important que celui des ECF + GBR (0,2%) qui ont un très bon comportement. Ceci peut être expliqué par la présence de fibres de verre qui tendent à améliorer la résistante du matériau.

Pour les échantillons qui ont subi les cycles de gel-dégel, la perte en masse des ECF vierges, après l'abrasion évolue peu, quel que soit le conditionnement (air, eau, solution saline) : 14%, 7,3% et 8,4%. Les écarts sont faibles compte tenu de la dispersion classique de ces essais.

Pour les ECF + GBR, après les cycles de gel-dégel le pourcentage de perte en masse est inférieur à la spécification de la norme (4%), pour les échantillons conditionnés dans l'eau et

l'eau saline, mais supérieure pour l'échantillon conditionné dans l'air. Il demeure délicat de tirer des conclusions sur la seule base de ces résultats (1 seule galette). Cependant on peut affirmer que dans l'ensemble ils peuvent être considérés comme encourageants, car les évolutions sont très minimes après les cycles de gel-dégel dans tous les cas.

Par ailleurs on peut noter la très bonne tenue à l'abrasion avec les ECF+ GBR comparativement aux ECF vierges. Ceci peut s'expliquer par la présence des fibres de verre ajoutées pour garantir la bonne montée en cohésion des mélanges.

6.3.3.2 Orniérage

En premier lieu, une étude a été effectuée sur l'influence des cycles de gel-dégel sur la tenue à l'orniérage des enrobés à chaud qui serviront de supports pour les ECF. En second lieu, nous avons évalué le rôle protecteur des ECF sans et avec GBR. Des essais complémentaires d'orniérage ont été réalisés dans le chapitre 7 et ont servi à évaluer la résistance des ECF vierges et ECF avec GBR aux déformations permanentes.

6.3.3.3 Déroulement de l'essai de l'orniérage

L'essai d'orniérage pratiqué dans cette étude est réalisé sur un appareil MLPC (Figure 7.3) grand modèle normalisé selon la norme européenne (NF EN 12 697-22). L'essai consiste à appliquer une charge roulante de 5kN gonflée à 6 MPa sur l'échantillon à 60°C pendant 30 000 cycles à une fréquence de 1 Hz. Les échantillons testés sont des plaques de dimensions 180 mm x 50 mm x 450 mm d'épaisseur. Le passage répété de la roue sur la plaque engendre la formation d'une ornière. On mesure l'évolution de la profondeur de l'ornière, définie en pour cent de l'épaisseur initiale de l'échantillon testé en fonction du nombre de cycles de chargement appliqués. La profondeur d'ornière est mesurée à 15 points différents sur la surface après un nombre défini de passe (1000, 3000…30 000 cycles).

Plaque de référence

Les résultats des essais sont présents dans la Figure 6.17. Rappelons que la fiche technique fournie par Probinord annonçait 3.3% d'ornière à 30 000 cycles avec un % de vide à 60 girations en PCG de 9,5% (soit proche des 10% visé dans notre expérimentation). Il faut noter également qu'il a fallu réchauffer cet enrobé en étuve à haute température (160°C) pour pouvoir le compacter, ce qui a pu contribuer à durcir légèrement le bitume.

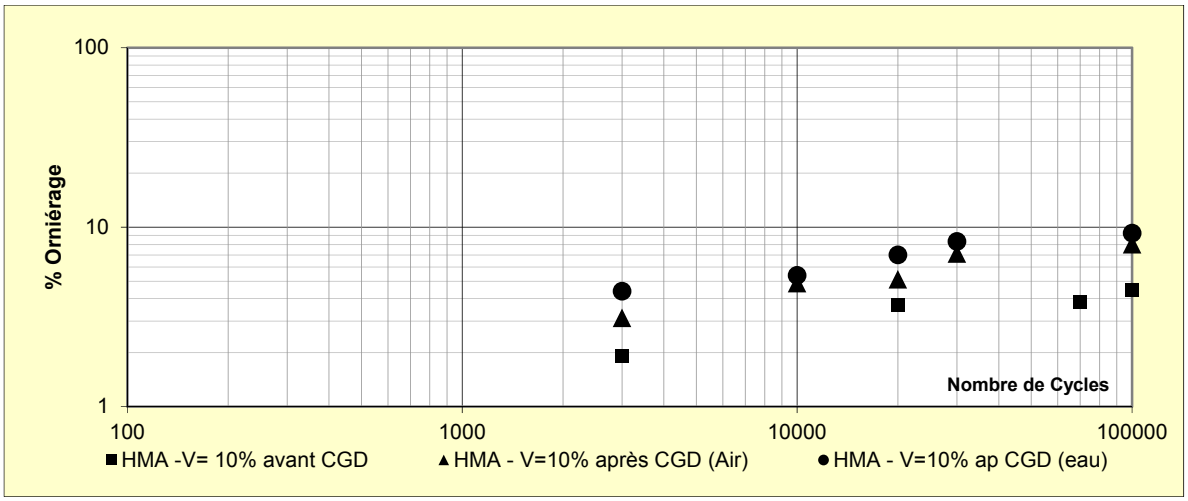


Figure 6.16 Essai de l'orniérage à 60°C sur les plaques d'enrobés à chaud (HMA) à 10% de vides avant et après CGD

Nous retrouvons à 30000 cycles les résultats annoncés par la fiche technique. L'enrobé proposé à une faible sensibilité à l'orniérage (< 5% à 100 000 cycles). Les cycles de gel-dégel semblent augmenter un peu la sensibilité à l'orniérage de l'enrobé bitumineux, mais le résultat reste très acceptable avec moins de 10% d'ornière à 100 000 cycles tant dans l'air que dans l'eau. Les pentes d'évolution restent très faibles. L'enrobé à 10% de vide est donc très peu sensible à l'orniérage initialement, ce qui n'est pas idéal dans le cas de notre étude.

Plaque à chaud 10% de vide + ECF

Des complexes plaque enrobé à chaud et ECF (avec et sans GBR) ont été fabriqués afin d'évaluer le rôle éventuellement protecteur des ECF une fois à subi les cycles de gel-dégel. Les enrobés à chaud ont une teneur en vide de 10 %. Tout d'abord l'ECF est coulé sur la plaque d'enrobé à chaud ornièrée au préalable ensuite, une stabilisation de l'ECF est réalisée par passage en étuve à 50°C pendant 24h à 48h (contrôle par pesée de l'eau évaporée). Puis, l'essai de gel-dégel est réalisé dans l'air et dans de l'eau salée. Le complexe enrobé à chaud +ECF subit ensuite l'essai d'orniérage à 60°C. Les résultats d'orniérage des ECF vierge et avec GBR sont présentés dans les Figures 6.18 et 6.19.

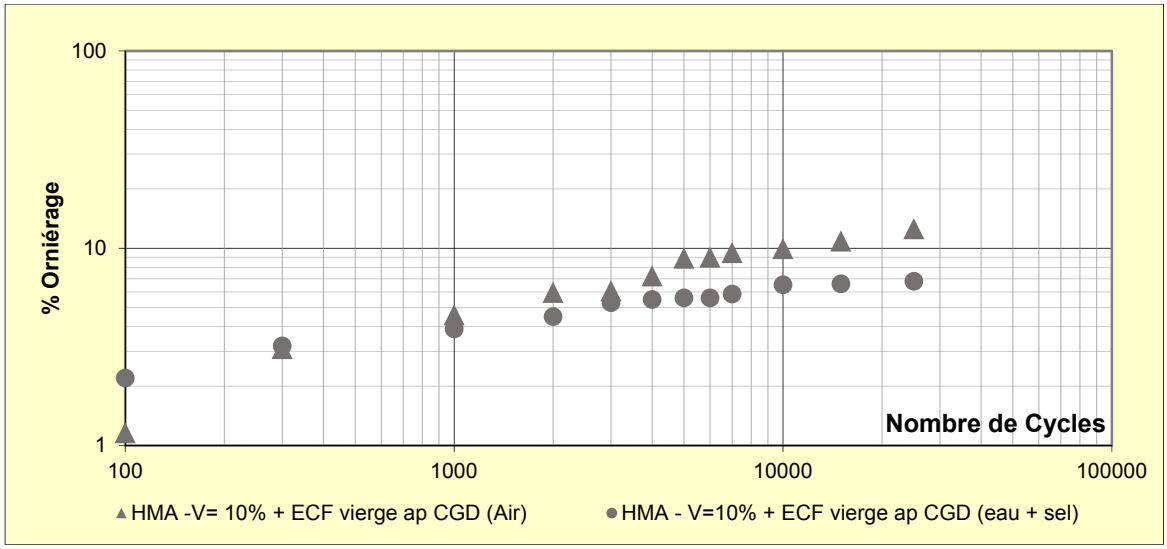


Figure 6.17 Évolution de l'orniérage à 60°C sur les complexes HMA à 10% vides (pré-ornièrés) + ECF vierge après CGD

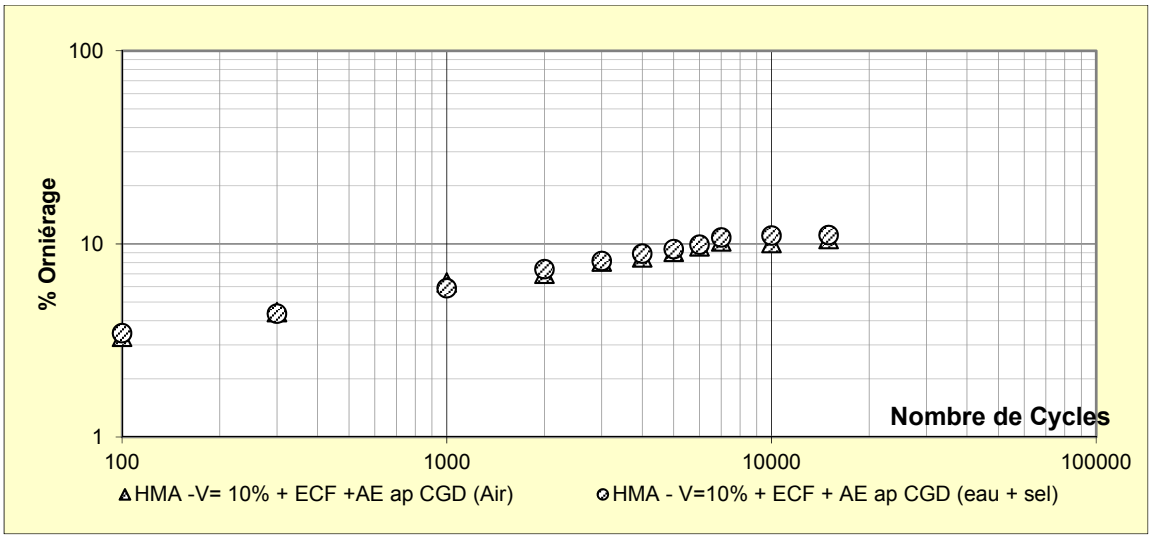


Figure 6.18 Évolution de l'orniérage à 60°C sur les complexes HMA à10% vides (pré-ornierés) + ECF + GBR après CGD

Il est à noter que visuellement on a pu observer des ornières sur toutes les plaques avec ECF, ce qui explique que les essais ont été arrêtés à moins de 30 000 cycles à chaque fois. Les pourcentages d'ornière restent < 10% ce qui représente 1 cm sur une plaque de 10 cm, mais pratiquement toute l'épaisseur d'ECF appliqué.

Il faut rappeler qu'aucun vieillissement préalable sur les ECF n'a été pratiqué ; seule l'étape de murissement/stabilisation a été réalisée, qui conduit juste à évaporer l'eau présente. Les caractéristiques du liant bitumineux ont peu évolué (TBA ~50°C selon les résultats précédents et donc < à la température d'essai d'orniérage de 60°C. Ces différentes remarques expliquent le comportement des complexes testés. Si l'on compare les différents niveaux de conditionnement et formulations, on constate une différence de comportement entre eau salée et air pour les ECF vierge avec un meilleur comportement dans l'eau salée qu'il est difficile actuellement d'expliquer si ce n'est des interactions entre eau+ sel. Les complexes avec ECF + GBR présentent un comportement similaire avec une amorce d'ornière un peu plus rapide (> 5% dès 1000 cycles).

Plaque à chaud 15% de vide + ECF

Pour sévériser notre essai et notamment sensibiliser plus les supports enrobés au phénomène de gel-dégel, nous avons réalisé des plaques avec des % de vides plus importants à savoir 15% (Figure 6.20).

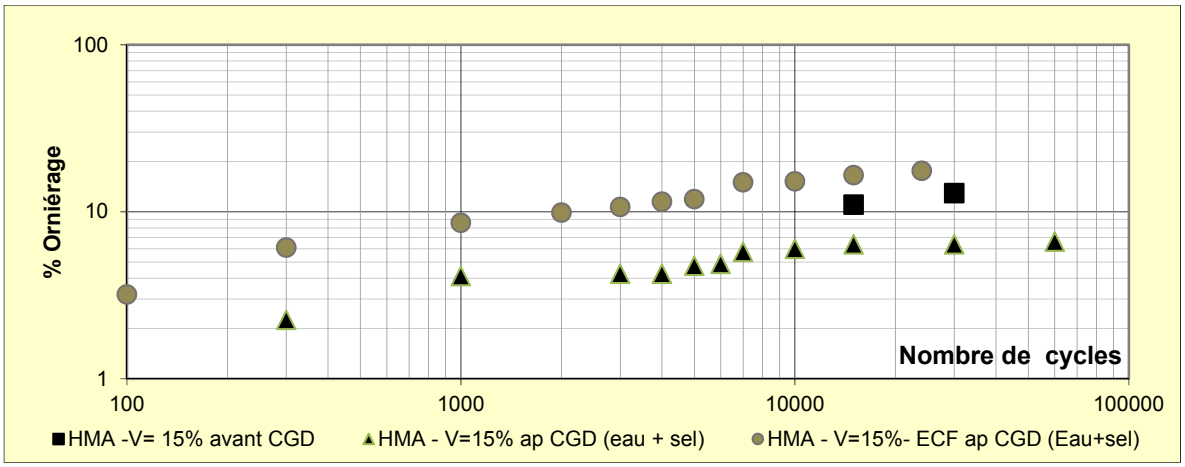


Figure 6.19 Évolution de l'orniérage à 60°C sur les HMA sans ECF à 15% de vide avant et après CGD et sur complexe avec ECF après CGD (eau + sel)

On peut noter que le % vide influe sur le pourcentage d'ornière de l'enrobé avant les cycles de gel-dégel avec un pourcentage 13% à 30 000 cycles au lieu d'un pourcentage < 4% avec 10% de vide. Par contre après les cycles de gel dégel dans l'eau salée, les plaques d'enrobés seules ont des comportements similaires à 10 ou 15% de vide (6.4% d'ornière à 30 000 cycles pour 15% de vide et 6.8% à 25000 cycles pour 10% de vide). Ces essais sont faits sur des plaques non ornierés préalablement. Lorsqu'on protège l'enrobé orniéré avec l'ECF, le comportement sur enrobé semble se retrouver sur l'ECF : le complexe enrobé à 15% + ECF ornière plus que le complexe enrobé à 10% + ECF. Tous les essais d'orniérage n'ont fait l'objet que d'un essai par condition d'essai.

6.4 Conclusion

L'étude de l'incidence de gel-dégel sur les enrobés coulés à froid avait pour but d'évaluer le comportement des ECF lorsque la température passe des valeurs positives aux valeurs négatives (phénomène de gel-dégel). Il avait pour but également d'étudier ce comportement avec des GBR dans les ECF pour ainsi apporter des éléments de réponse aux services routiers pour la gestion du réseau routier en période de dégel. Pour atteindre ces objectifs, nous avons mené tout d'abord une recherche bibliographique pour identifier les facteurs conduisant aux dégradations des chaussées et plus particulièrement en période hivernale. Il ressort que si des travaux ont été menés sur des enrobés bitumineux, aucune étude n'a été trouvée sur le comportement des ECF. On peut noter ainsi l'importance du passage des températures négatives aux positives et la nécessité de bien analyser la phase gel, mais aussi la phase dégel. La nature des sels de déverglaçage doit par ailleurs être considérée. Avec les conditions opératoires disponibles, un protocole de conditionnement gel/dégel d'échantillons a été défini, permettant de travailler à différentes échelles du matériau.

Les résultats à l'échelle des granulats, GBR, liants bitumineux, émulsion de bitume montrent que les cycles de gel dégel n'ont pas d'incidence sur les matériaux de base des ECF. Les modules complexes des liants avant et après les cycles de gel-dégels traduisent un comportement similaire quel que soit le type de conditionnement (Air, solution saline, eau) sauf dans le cas des ECF+ GBR conditionnées dans la solution saline, le liant est devenu plus rigide que les autres liants, mais ce résultat reste à vérifier. Les essais d'abrasion semblent montrer que l'utilisation des GBR ne diminuent pas voire améliorent la résistance à l'abrasion des ECF quel que soit le type de conditionnement. Ce comportement s'explique par la présence de fibres dans les ECF recyclés.

En conclusion, nous n'avons pas pu observer d'effet des cycles de gel dégel sur les propriétés des ECF seuls par les seules caractéristiques mesurées (principalement sur liant bitumineux et abrasion).

Au niveau des complexes enrobés à chaud +ECF, on peut noter que :

- l'enrobé support choisi ne présentait pas une grande sensibilité à l'orniérage. Cependant l'augmentation de la teneur en vide a un effet non négligeable sur la tenue à l'orniérage;
- les complexes enrobés +ECF sans et avec des GBR, dans l'air ou dans l'eau salée présentent des comportements comparables et sensibles vis-vis de l'orniérage et ainsi dans nos conditions d'essais nous n'avons pas démontré l'effet protecteur des ECF, car le liant présent dans l'ECF est trop mou. Une phase de vieillissement aurait été plus réaliste.

Ce travail a permis d'identifier des perspectives éventuelles à cette étude, telles que :

- la réalisation d'essais d'orniérage sur complexe à des températures plus basses (adaptée au grade PG du bitume) ou la réalisation d'une phase de vieillissement avant orniérage;
- la mesure de l'adhésion liant-granulat et liant- GBR par l'adaptation d'essais d'adhésivité passive;
- l'évaluation de la nature et teneur en sel;
- l'augmentation du nombre de cycles de gel-dégels ou la modification des températures maxi (40 ou 60°C pour simuler une phase été);
- le choix d'un support (enrobé) plus sensible au phénomène d'orniérage.

CHAPITRE 7

IMPACT DU VIEILLISSEMENT THERMIQUE SUR LA RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE D'ENROBÉS À CHAUD ORNIÉRÉS ET RHÉABILITÉS À L'ECF

7.1 Introduction

De par sa position en couche de roulement de la chaussée, l'ECF est directement sollicité par le trafic routier (effort de traction, compression et cisaillement) et les conditions climatiques (fluctuations de la température, rayons UV du soleil, pluie...). Ainsi, chaque formule d'ECF, outre le fait d'être conforme aux spécifications de l'ISSA, doit résister aux contraintes du trafic et du climat sur une période définie afin d'assurer la sécurité et le confort des usagers.

Les travaux effectués au chapitre 4 ont démontré la validité des formulations d'ECF avec des GBR. Cependant, bien que le recyclage des GBR dans les ECF soit une solution très favorable au respect des exigences du management du développement durable, des questions subsistent quant à l'impact de ces GBR sur les performances mécaniques de l'ECF recyclé tout au long de sa durée de vie.

En effet, les résultats des études du chapitre 4 portants sur la formulation des ECF avec des GBR au jeune âge restent insuffisants pour la prise de décision. C'est ainsi que plusieurs autres défis restent à être relevés, comme celui de l'évaluation de la résistance aux déformations permanentes des ECF. Il a été avancé que l'ECF vierge peut présenter une solution pour la correction des défauts légers liés à l'orniérage à petit rayon. Cependant, il doit être appliqué en plusieurs couches (ISSA, 2005e; Robati, 2014b).

Afin de vérifier cet aspect sur les ECF formulés avec du GBR, le chapitre présent est consacré à l'étude de la résistance à l'orniérage d'une chaussée protégée par une couche d'ECF. Cette étude a été menée en deux parties : sur des ECF vierges et sur des ECF recyclés dans des conditions de mûrissement et de vieillissements bien définies.

7.2 Orniérage des ECF

L'orniérage est un phénomène de déformation irréversible de la chaussée dont la cause primaire est le trafic (Aidara, 2016; Corté et Di Benedetto, 2004a; Meunier, 2012) associé à une température élevée.

L'analyse des diverses coupes transversales des chaussées ornièrées a montré qu'il existe deux principales sources pour les déformations permanentes de la surface qui sont (Corté et Di Benedetto, 2004a; Meunier, 2012) :

- soit le tassement des couches dites structurelles de matériaux non liés. Ces ornières se manifestent en surface par des ornières dites à grand rayon;
- soit la déformation des couches bitumeuses supérieures (proche de la surface de la chaussée). Il s'agit de formation des ornières à petit rayon avec ou sans bourrelets latéraux.

Les sollicitations mécaniques, responsables du phénomène d'orniérage sont complexes et se transmettent par l'effet des charges et décharges à chaque passage de roue et la variation des trajets de chargement selon la cote considérée dans la structure de la route (Figure 7.1). D'une manière plus simple, lorsqu'une structure de chaussée est soumise à un trafic routier, les couches bitumineuses (couche de roulement et/ou couche de base) sont sollicitées en traction et en compression répétées (Proteau et Lavoie, 2014), voir Figure 7.1. Le comportement d'un enrobé en déformation sous l'effet d'un chargement (pneumatique) est divisé en une composante réversible et une composante non-réversible (Corté et Di Benedetto, 2004a; Meunier, 2012).

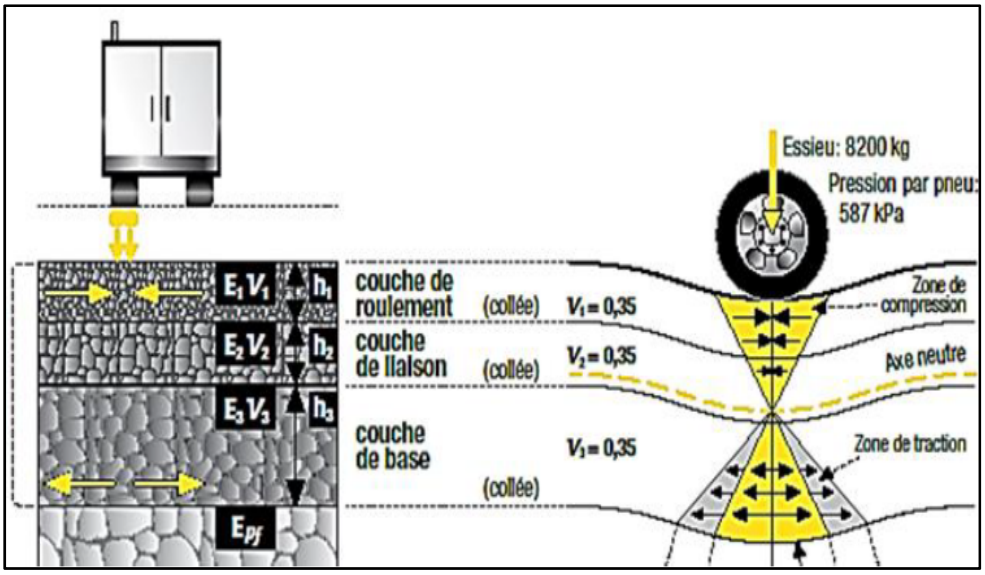


Figure 7.1 Différentes sollicitations induites par le trafic.
Tirée de Techno-bitume (2014)

Le comportement mécanique d'un enrobé bitumineux est lié au comportement rhéologique du liant. En effet, les bitumes sont des matériaux viscoélastiques et thermo susceptibles dont la rhéologie est similaire à un fluide aux hautes températures ou aux faibles fréquences (Corté et Di Benedetto, 2004a).

Ainsi, lorsque les propriétés fluides du liant s'accentuent, l'enrobé bitumineux devient sensible aux déformations permanentes et notamment l'orniérage. Il faut également souligner que le déplacement irréversible du squelette minéral n'est effectué que lorsque la nature du liant l'autorise (Aidara, 2016; Corté et Di Benedetto, 2004a; Olard , Noël et Loup, 2006).

Plus la viscosité du liant est faible (taux de chargement bas, haute température), plus la sensibilité des enrobés aux déformations permanentes est importante. Dans les structures de chaussée, elles sont mesurées par des essais rhéologiques (module de déformation permanente) ou par des essais de simulation de l'orniérage sur chaussée (Corté et Di Benedetto, 2004a; Lesueur, 2002).

Outre les sollicitations mécaniques, les fluctuations de la température et les infiltrations d'eau représentent également une cause primaire des dégradations routières (Corté et Di Benedetto, 2004a; Meunier, 2012). Ces paramètres affectent la chaussée et contribuent à affecter également la portance de sol, ce qui engendre la dégradation de la structure routière.

L'orniérage des couches bitumineuses est l'un des types de dégradation les plus rencontrés sur les chaussées. Lorsque la détérioration de la chaussée atteint une certaine ampleur, la sécurité des usagers est menacée. L'objectif des procédures de formulations des matériaux de chaussée est d'assurer une certaine résistance de ces matériaux par rapport aux dégradations des chaussées (orniérage, fissuration, fatigue, etc.) (Aidara, 2016) d'où la nécessité de l'entretien des chaussées. Cette politique d'entretien permet de proposer une stratégie de préservation à long terme qui améliore la performance des chaussées en utilisant un ensemble intégré et rentable de pratiques qui prolongent la durée de vie des chaussées, améliorent la sécurité et répondent aux attentes des automobilistes (Beaulieu 2011). De plus, les différentes dégradations présentes conduisent les agences de gestion des infrastructures routières à utiliser différentes méthodes en choisissant si possible la meilleure méthode d'entretien au meilleur moment (Uzarowski et Bashir, 2007).

La technique des ECF a fait ses preuves dans le domaine de la réparation des défauts liés au trafic (Kucharek et al., 2010). Appliqués en plusieurs couches, les ECF sont capables de corriger des défauts plus profonds dépassant les 20 mm (Lebec, 2014).

D'autres travaux menés en laboratoire sur des plaques d'ECF seuls ont démontré que les ECF avec une granulométrie grossière (LG) sont moins susceptibles à l'orniérage que les ECF avec une granulométrie fine (UG) (Robati, 2014a) (Figure 7.2). Sur la figure 7.2, la résistance à l'orniérage des ECF de granularités différentes est présentée (Robati, 2014a).

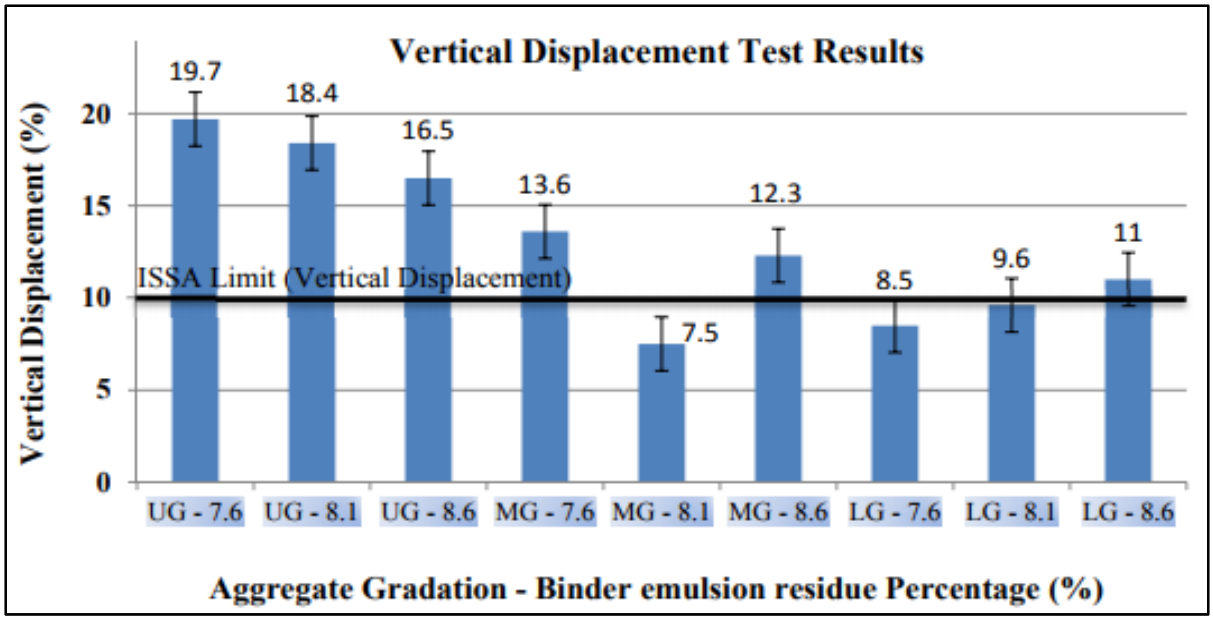


Figure 7.2 Résultats des essais d'orniérage sur différentes granularités d'ECF
Tirée de Robati (2014a)

Il a été également expliqué que les mélanges d'ECF formulés avec 100% de GBR répondent aux spécifications de l'essai de déplacement ISSA TB 147 (*Multilayer Loaded Wheel Test*) tandis que les ECF fabriqués avec des bardeaux d'asphalte (*Reclaimed Asphalte Shingle RAS*) présentent une baisse de résistance à l'orniérage si le % de RAS dépasse 10% ((ISSA, 2005b; Robati, 2014a). Il est à noter que les bardeaux d'asphalte sont essentiellement constitués de granulats fins. Or, des études antérieures faites par Aidara (2016); et Corté et Di Benedetto (2004a), ont montré que la résistance à l'orniérage est directement liée à l'ossature minérale des granulats (AIPCR, 2003a).

Il semble judicieux de rappeler que même si les ECF peuvent apporter un meilleur état à la chaussée défectueuse (orniérage à petit rayon), il ne peuvent pas corriger les déformations profondes (Pittenger et al., 2014).

Le phénomène d'orniérage est également influencé par d'autres paramètres dont on cite : la température, durée d'exposition aux sollicitations, et l'épaisseur du film de liant (Corté et Di Benedetto, 2004a). Il est donc intéressant d'étudier l'impact du vieillissement sur l'orniérage.

Le vieillissement des enrobés bitumineux résulte des réactions d'oxydation. Cette oxydation rend le liant bitumineux plus dur et plus fragile. Le durcissement des liants a un impact sur le comportement des revêtements à savoir sa résistance aux déformations permanentes, à l'usure… En effet, le vieillissement des liants se traduit par une augmentation de sa viscosité et peut entrainer une modification du comportement viscoélastique et conduit donc à un comportement viscoplastique(Merbouh, 2010). Il est donc important de s'interroger sur la résistance des enrobés vieillis à l'orniérage puisque ce dernier est fortement influencé par la nature du liant. En effet, des études antérieures ont montré que les liants durs et moins susceptibles à la température résistent mieux à l'orniérage, mais sont moins résistant à la fatigue (Vanelstraete et Francken, 1995).

7.3 Procédure expérimentale de mesure de l'orniérage des plaques d'enrobés à chaud revêtues à l'ECF

Ce travail a consisté à effectuer des essais d'orniérage sur des plaques d'enrobés à chaud seules puis sur des plaques d'enrobés à chaud préalablement ornièrées puis réparées avec une couche d'ECF.

Les trois types de structures testés sont :

- les plaques d'enrobé à chaud seul;
- une série de ces mêmes plaques pré-ornièrées à 30 000 cycles puis corrigées avec une couche d'ECF formulé avec des granulats vierges;
- une série de ces mêmes plaques pré-ornièrées à 30000 cycles puis corrigées avec une couche d'ECF formulé avec des GBR. Toutes les structures testées ont subi une étape de stabilisation et une étape de vieillissement.

L'étape de stabilisation consiste à mettre les plaques dans une étuve pendant 24 heures à 50°C dans le but d'évacuer l'eau et les fractions volatiles. Pour simuler le vieillissement thermique (Cf. chapitre vieillissement), les plaques enrobés à chaud et les complexes enrobés à chaud et ECF avec et sans GBR, sont placés dans une étuve ventilée, à une température de 85°C, pendant une durée allant de 2 ou 5 jours. Le protocole de stabilisation et vieillissement

thermique accéléré en laboratoire a été calé sur les travaux réalisés à l'IRC et des procédures européennes (Garfa, 2016; LCPC, 1987). L'évolution des ECF coulés sur les plaques d'enrobés à chaud a été évaluée par des mesures de profondeurs d'ornière en fonction du nombre de cycles de sollicitations.

7.3.1 Matériaux et formulation

Les matériaux utilisés pour cette étude ainsi que leur origine et leur composition, sont présentés dans le chapitre matériaux et sont ceux d'origine canadienne (granulats vierges, émulsion cationique CQS-1HP, dope ADP1, fibres, etc..). La formulation et la fabrication des ECF étudiés ont été réalisées conformément au protocole présenté dans le chapitre 3 matériaux de formulation.

Pour la fabrication des ECF recyclés, une formulation avec 50% GBR, suite à une recomposition, a été déterminée et des fibres de verre ont été également ajoutées afin d'améliorer la cohésion entre liant et granulats recyclés. La validation de la formulation de l'ECF a été réalisée avec les essais de cohésion, d'abrasion, déplacement et le *Hilt Cohesion Test* (Garfa, 2016; ISSA, 2005a). Les enrobés á chaud (ESG 10), utilisés dans cette étude comme plaque de support, ont été fabriqués avec un bitume de grade PG 70-28 (à une teneur massique de 5,1%) et des granulats de dimensions allant de 0 à 10 mm. La teneur en vide des plaques d'enrobés à chaud est de 5%. La formulation des enrobés à chaud a été calée sur les formulations utilisées au sein du laboratoire LCBM. Les plaques d'enrobés à chaud seules ont été mûries pendant 14 jours au laboratoire puis ornièrées jusqu'à 30000 cycles à l'aide du l'orniéreur MLPC avant la pose de l'ECF vierge ou recyclé.

7.3.2 Fabrication des plaques d'enrobés ornières et réhabilités à l'orniérage

Dans cette étude, des plaques d'enrobés de 50 mm d'épaisseur ont été confectionnés et ont subi un orniérage préalable à l'orniéreur MLPC pendant 30000 cycles avant d'être « corrigées » par un ECF pour simuler une réhabilitation sur chaussée. Il est à noter que pour maintenir un complexe d'enrobé à chaud+ ECF à 50 mm d'épaisseur, on a été amené à découper 15 mm des

plaques d'enrobés à chaud avant l'orniérage initial (plaque d'enrobé à chaud seules). Lors de l'essai d'orniérage des enrobés à chaud seuls, une cale a été mise au fond du moule afin de pouvoir réaliser l'essai. L'épaisseur de 15 mm coupée de l'épaisseur des plaques enrobés à chaud correspond à l'épaisseur de l'ECF.

Avant le coulage de l'ECF vierge ou recyclé, la première étape a consisté à nettoyer les plaques support, placées à température ambiante, afin d'enlever les poussières ou les granulats rejetés lors de l'orniérage initial (pré-orniérage des plaques d'enrobés à chaud seules). Ensuite, l'ECF a été coulé et étalé sur toute la surface à revêtir.

Ces plaques corrigées à l'ECF vierge et recyclé sont ensuite stabilisées dans une étuve pendant 24 heures à 50°C dans le but d'évacuer l'eau et les fractions volatiles des ECF. La stabilisation est vérifiée par une mesure de la perte de masse.

On atteint une masse constante après le premier jour du conditionnement. Pour simuler le vieillissement thermique (Cf. chapitre 5), les complexes enrobés à chaud et ECF avec et sans GBR, sont placés dans une étuve ventilée, à une température de 85°C, pendant une durée allant de 2 ou 5 jours afin de simuler le vieillissement sur site.

Le complexe enrobé à chaud et ECF a une épaisseur totale de 50 mm avec une épaisseur d'ECF d'environ 15 mm. Des petites variations des épaisseurs d'ECF coulées sur les plaques d'enrobés à chauds sont observées. Ceci est dû aux différences entre les profondeurs d'orniérage des plaques d'enrobé à chaud, testées seules sans ECF. De ce fait, les épaisseurs des couches d'ECF coulés sur les plaques d'enrobés sont respectivement, 17,5 mm pour les plaques muries pendant 24h à 50°C sans vieillissement, 17,2 mm pour les plaques muries pendant 24h à 50°C et vieillies pendant 2 jours à 85°C et 17,1 mm pour les plaques muries pendant 24h à 50°C et vieillies pendant 5 jours à 85°C. L'évolution de la profondeur de l'ornière est suivie et mesurée en pourcentage de l'épaisseur initiale du matériau en fonction du nombre de cycles de chargement.

7.3.3 Déroulement de l'essai de l'orniérage

L'essai d'orniérage pratiqué dans cette étude est réalisé sur un appareil MLPC (Figure 7.3) grand modèle normalisé selon la norme européenne (NF EN 12 697-22) (Afnor, 2002). Le descriptif de l'essai est détaillé dans le chapitre 6 (section 6.3.3.3).

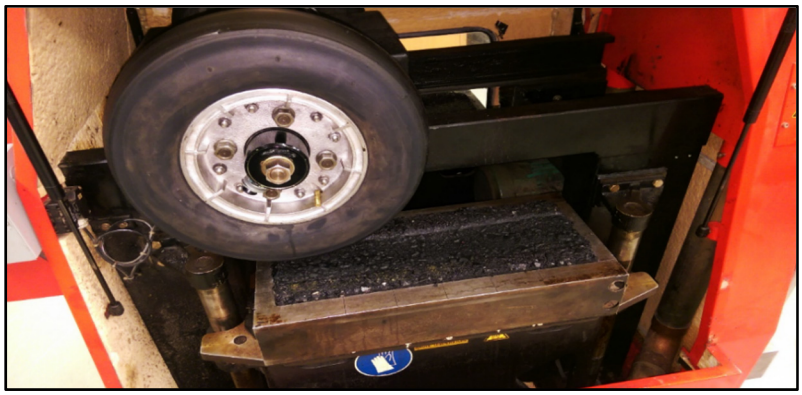


Figure 7.3 Essai d'orniérage à l'orniéreur MLPC
Tirée de Corté et Di Benedetto (2004a)

Rappelons que trois types de structures ont été testés à l'essai d'orniérage et sont présentées dans le tableau 7.1.

Tableau 7.1 Les types de structures testés d'orniérage

Structure testée à l'orniérage	Condition murissement /vieillissement
Plaque enrobé à chaud seul (servie comme référence)	• orniérage après 24h à 60°C • orniérage après 24h à 50°C +2 jours à 85°C • orniérage après 24h à 50°C + 5 jours à 85°C
Complexe enrobé à chaud ornière + ECF vierge	• orniérage après 24h à 60°C • orniérage après 24h à 50°C +2 jours à 85°C • orniérage après 24h à 50°C + 5 jours à 85°C
Complexe enrobé à chaud ornière + ECF recyclé	• orniérage après 24h à 60°C • orniérage après 24h à 50°C +2 jours à 85°C • orniérage après 24h à 50°C + 5 jours à 85°C

Les différents résultats de ces trois structures ont permis de comparer l'évolution à l'orniérage des plaques d'enrobés à chaud réhabilités ou non avec de l'ECF formulés avec des granulats vierges ou recyclés, également après différentes étapes de vieillissement. Tous les essais d'orniérage ont été effectués à 60°C. (Figure 7.4 et Figure 7.5).

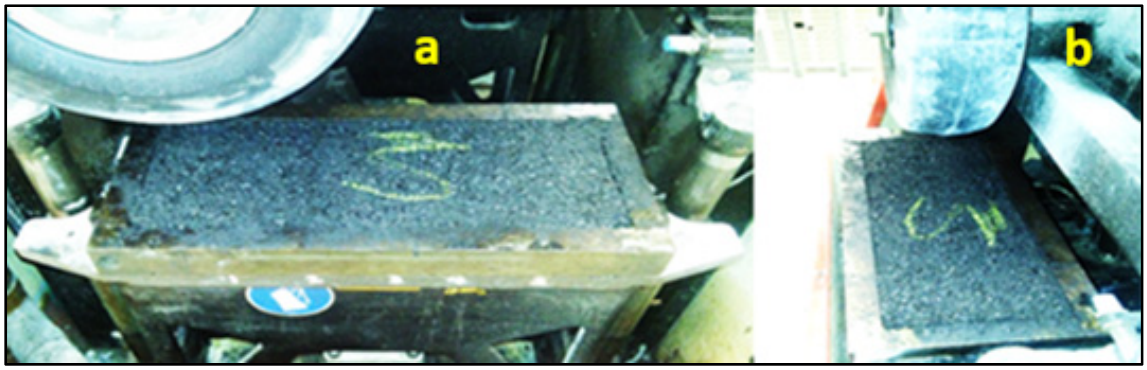


Figure 7.4 Photo de plaques d'enrobé ornières et réhabilitées à l'ECF avant à l'essai d'orniérage à 30 000 cycles



Figure 7.5 Plaques d'enrobé ornières et réhabilitées à l'ECF après à l'essai d'orniérage à 30000 cycles. (a) Plaque d'enrobés à chaud avant orniérage; (b) Plaque d'enrobés à chaud avant orniérage; (c) Plaque d'enrobés à chaud après 10 000 cycles d'orniérage et (d) Plaque d'enrobés à chaud après 30 000 cycles d'orniérage

7.4 Discussion des résultats

L'interprétation des résultats a été réalisée en deux parties :

- les enrobés à chaud seuls;
- les complexes enrobés à chaud + ECF vierge ou recyclé.

7.4.1 Résultats des essais d'orniérage sur les plaques d'enrobés à chaud

L'analyse de l'impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des enrobés sur le tableau 7.2 a montré que plus les températures et durées de vieillissement des plaques d'enrobés à chaud sont importantes, plus leur résistance à l'orniérage est élevée. En effet, sur la figure 7.6, on observe bien que l'enrobé muri et vieilli 5 jours (ornière de 5,94 %) présente une résistance à l'orniérage à 30 000 cycles, supérieure à celle de l'enrobé muri et vieilli 2j ornière de 6,3%, elle-même supérieure à celle de l'enrobé muri seulement 24h (ornière de 7.22%). On peut supposer et expliquer ce phénomène par un durcissement plus important du liant des enrobés avec des vieillissements plus longs, conduisant à une résistance à l'orniérage plus élevée. En effet, le vieillissement effectué à 85°C à l'étuve ventilée entraine une oxydation accélérée du bitume de l'enrobé et un durcissement de celui-ci.

Tableau 7.2 Évolution de la profondeur d'ornière des enrobés à chaud en fonction des conditions de vieillissement

	Pourcentage d'orniérage (%)		
Nombre de cycle	**Enrobé à chaud muri 24h à 50°C**	**Enrobé à chaud muri 24h à 50°C et vieilli 2j à 85°C**	**Enrobé à chaud muri 24h à 50°C et vieilli 5j à 85°C**
1000	3,5	1,7	2,3
2000	4,5	2,7	3,3
3000	5,5	3,7	4,3
10000	6,5	5,3	5,1
30000	7,2	6,3	5,9

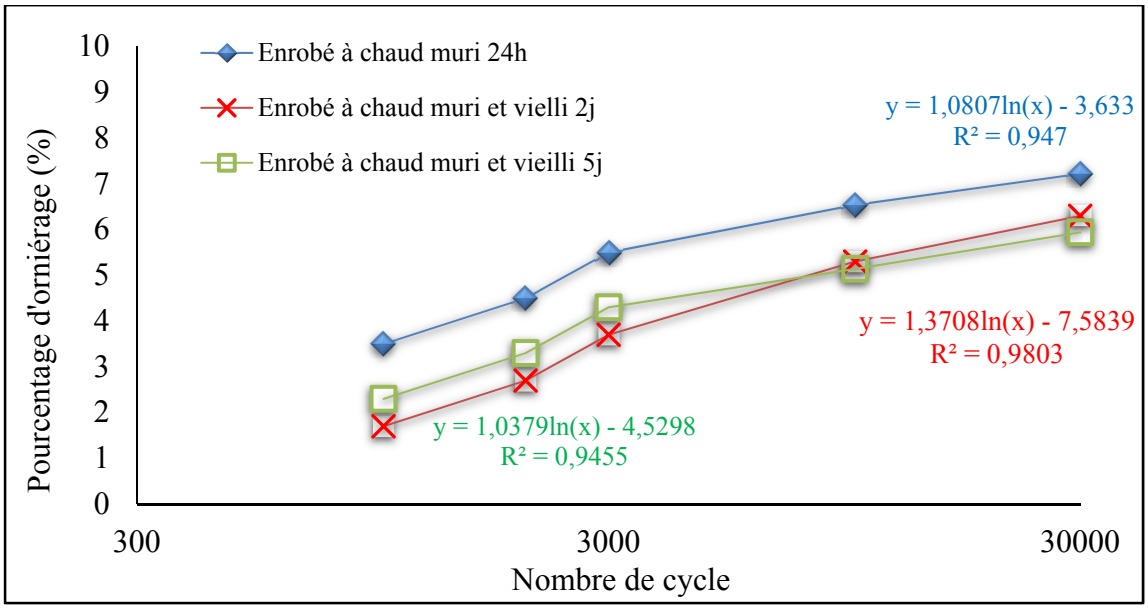


Figure 7.6 Impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage

Vu que le même type d'enrobé est testé, les valeurs d'orniérage initiales devraient être assez proches. Cependant des différences sont observées dès le début. Ce qui confirme le durcissement du liant dû au processus de murissement-vieillissement.

7.4.2 Résultats des essais de l'orniérage des couples enrobé à chaud+ ECF

L'analyse de l'impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des couples enrobé à chaud /ECF vierge et des couples enrobé à chaud /ECF recyclé présentés sur les figure 7.7 et 7.8 en comparaison avec l'orniérage des plaques d'enrobé à chaud seules, a montré que comme pour les plaques d'enrobé à chaud, plus le temps de vieillissement des plaques d'enrobés à chaud corrigées à l'ECF était important, plus leur résistance à l'orniérage augmentait.

Les figures 7.7 et 7.8 présentent l'ensemble des complexes enrobés à chaud + ECF vierge et enrobé à chaud + ECF recyclé respectivement. Les courbes sont composées de deux parties. Une première partie qui représente le pré-orniérage des plaques d'enrobés à chaud seules avant la réparation avec de l'ECF vierges ou recyclés. La deuxième partie des courbes a permis de

montrer l'évolution du comportement, vis à vis de l'orniérage, des plaques après leurs corrections avec de l'ECF. Étant donné que les ECF vierges et recyclés ont été coulés sur des plaques pré-orniérées, les courbes des complexes ont débuté à 30 000 cycles. Les courbes d'enrobés à chaud seuls et des complexes ont été comparées pour chaque condition de mûrissement /vieillissement.

Dans un premier temps, le mécanisme d'orniérage de l'enrobé à chaud de surface de type ESG-10 sur une durée de vie de 20 ans a été évalué. Il s'agit des trois phases habituelles : augmentation rapide du pourcentage de l'orniérage, stabilisation (faible évolution du taux de l'orniérage) et augmentation du pourcentage de l'orniérage avec un taux plus grand.

Ensuite, nous avons ajouté une couche d'ECF (100% vierge) à la fin de la durée de vie du revêtement (couche de roulement ESG10) et qui est de 20 ans. Le tableau 7.3 regroupe les résultats des essais d'orniérage sur le complexe enrobé à chaud + ECF vierge.

Nous sommes donc dans la phase 3 où le taux d'orniérage augmente plus rapidement que la phase 2 (phase durant laquelle l'ECF devrait être posé). On pourrait donc conclure que la correction de la couche de surface par ECF (100% vierge) ne serait pas utile dans ce cas !

Cependant, on observe une évolution de 1,26 % du pourcentage d'orniérage dans le cas du mûrissement 24h à 50°C par rapport à la plaque d'enrobé à chaud. Ceci indique qu'après les 30 000 cycles, sur l'épaisseur de 17 mm de la couche d'ECF, la dégradation due à l'orniérage est au niveau des ECF. Dans le cas du mûrissement 24h à 50°C et vieillissement 2j à 85 °C, l'évolution de l'orniérage est 0,9 %. Dans ce cas également, on remarque que le phénomène d'orniérage est au niveau de la couche d'ECF. Ainsi, on observe une amélioration du comportement des couches des ECF vis-à-vis de l'orniérage. Ceci s'explique par le rôle qu'a joué le vieillissement à l'étuve sur les complexes.

Pour le troisième cas (24h à 50°C et vieillissement 5j à 85 °C), l'évolution observée est de 0,59%. L'effet de vieillissement est remarquable dans ce cas. L'ECF a durci après 5 jours à l'étuve et donc il devient plus résistant au phénomène d'orniérage.

Tableau 7.3 Évolution de la profondeur d'ornière des couples enrobés à chaud + ECF vierge en fonction des conditions de vieillissement

	Pourcentage d'orniérage (%)		
Nombre de cycle	**Enrobé à chaud + ECF vierge muri 24h à 50°C**	**Enrobé à chaud+ ECF vierge muri 24h à 50°C et vieilli 2j à 85°C**	**Enrobé à chaud+ ECF vierge muri 24h à 50°C et vieilli 5j à 85°C**
31000	2,6	3,5	4,9
32000	5,5	6,2	5,3
33000	7,3	6,4	5,6
40000	7,8	6,5	6,1
60000	8,5	7,2	6,5

Ces constations permettent de conclure que, même si l'ECF aurait dû être posé sur les enrobés à chaud avant leur fin de vie (c'est-à-dire sur une période allant de 8 à 12 ans sur une durée de vie de 20 ans), le coulage d'ECF a été bénéfique. Il a permis de retarder la dégradation de la couche support. Ceci nous mène à souligner un point intéressant lors l'évaluation de l'orniérage pour tous les enrobés (à chaud ou ECF) qui est l'impact du temps du vieillissement sur l'orniérage. En effet, la résistance à l'orniérage diminue si le temps de vieillissement augmente.

Le vieillissement effectué à 85°C à l'étuve ventilée entraine une oxydation accélérée du bitume de l'ECF ce qui engendre un durcissement de celui-ci. En comparaison avec les plaques d'enrobé à chaud prises individuellement, les pourcentages d'orniérage sont plus importants chez les couples enrobé/ECF.

En effet, les plaques d'enrobé à chaud étant préalablement ornièrées (pré-orniérage), elles sont très susceptibles à la déformation permanente, car leur pourcentage de vide ayant fortement

diminué lors des premiers essais. Lors des essais d'orniérage des enrobés bitumineux, les granulats subissent des rotations et des translations dues aux mouvements de la roue de l'orniéreur MLPC. Ces phénomènes ont pour but de réorganiser l'enrobé bitumineux afin de réduire ses vides. Une fois que le matériau est totalement réorganisé, le phénomène d'orniérage devient alors possible (Corté et Di Benedetto, 2004a; LCPC, 1994a).

Mais le coulage de l'ECF même s'il redonne une seconde vie à la plaque d'enrobé bitumineux, il ne serait pas aussi performant qu'une plaque d'enrobé neuve. On peut considérer que le couple enrobé/ECF a une mémoire de déformation due à l'orniérage initial de la plaque d'enrobé. La couche d'ECF a quand même permis de retarder le phénomène d'orniérage et donc prolonger la durée de vie de la chaussée.

Dans un premier temps, l'ECF corrige l'orniérage initial de la plaque, puis il apporte un renforcement de 15mm d'épaisseur permettant ainsi à l'ensemble d'être performant. Il faut noter toutefois qu'il est nécessaire que l'ECF soit de bonne qualité, c'est-à-dire qu'il répond aux spécifications de l'ISSA et qu'ils ne subissent pas d'été caniculaire avant d'être bien stabilisés. En comparant aux exigences de la norme NF EN 13108-1, qui est la norme de spécification des enrobés bitumineux, tous les couples (enrobé à chaud = ECF vierge ou ECF avec GBR) sont conformes : Tous les couples enrobé à chaud /ECF ont des pourcentages d'orniérage inférieurs à 10% à 30 000 cycles. Les mêmes tendances sont observées sur les résultats les couples enrobés à chaud /ECF recyclés en comparaison avec les plaques d'enrobés à chaud seules.

Pour les supports corrigés avec des ECF recyclés, l'ajout des ECF a permis également une meilleure résistance à l'orniérage. Ceci est probablement dû à l'ajout des fibres et GBR dans notre ECF. Ainsi, on observe une évolution de 0,32 % du pourcentage d'orniérage dans le cas du mûrissement 24h à 50°C par rapport à la plaque d'enrobé à chaud. Ceci indique qu'après les 30 000 cycles, sur l'épaisseur de 17 mm de la couche d'ECF, la dégradation due à l'orniérage est au niveau des ECF. De plus, on remarque que la couche d'ECF résiste à

l'orniérage. Ceci peut être lié à l'ajout, dans la formulation des ECF avec GBR, des fibres qui confèrent à l'ECF un comportent plus rigide et résistant.

Dans le cas du mûrissement 24h à 50°C et vieillissement 2j à 85 °C, l'évolution de l'orniérage est 0,3 %. Dans ce cas également, on remarque que c'est la couche d'ECF qui a ornièré. Nous notons également une amélioration de la résistance à l'orniérage due au durcissement de la couche d'ECF suite au vieillissement à l'étuve.

Pour le troisième cas (24h à 50°C et vieillissement 5j à 85 °C), l'évolution observée est de 0,07%. L'effet de vieillissement est encore une fois remarquable dans ce cas des ECF recyclé. L'ECF devient plus rigide après 5 jours à l'étuve et présente donc une bonne résistance au phénomène d'orniérage.

Pour conclure, la correction des plaques d'enrobés à chaud avec des couches d'ECF vierges ou des ECF avec GBR, a permis d'améliorer et donc prolonger la durée de vie de la chaussée en retardant le phénomène d'orniérage.

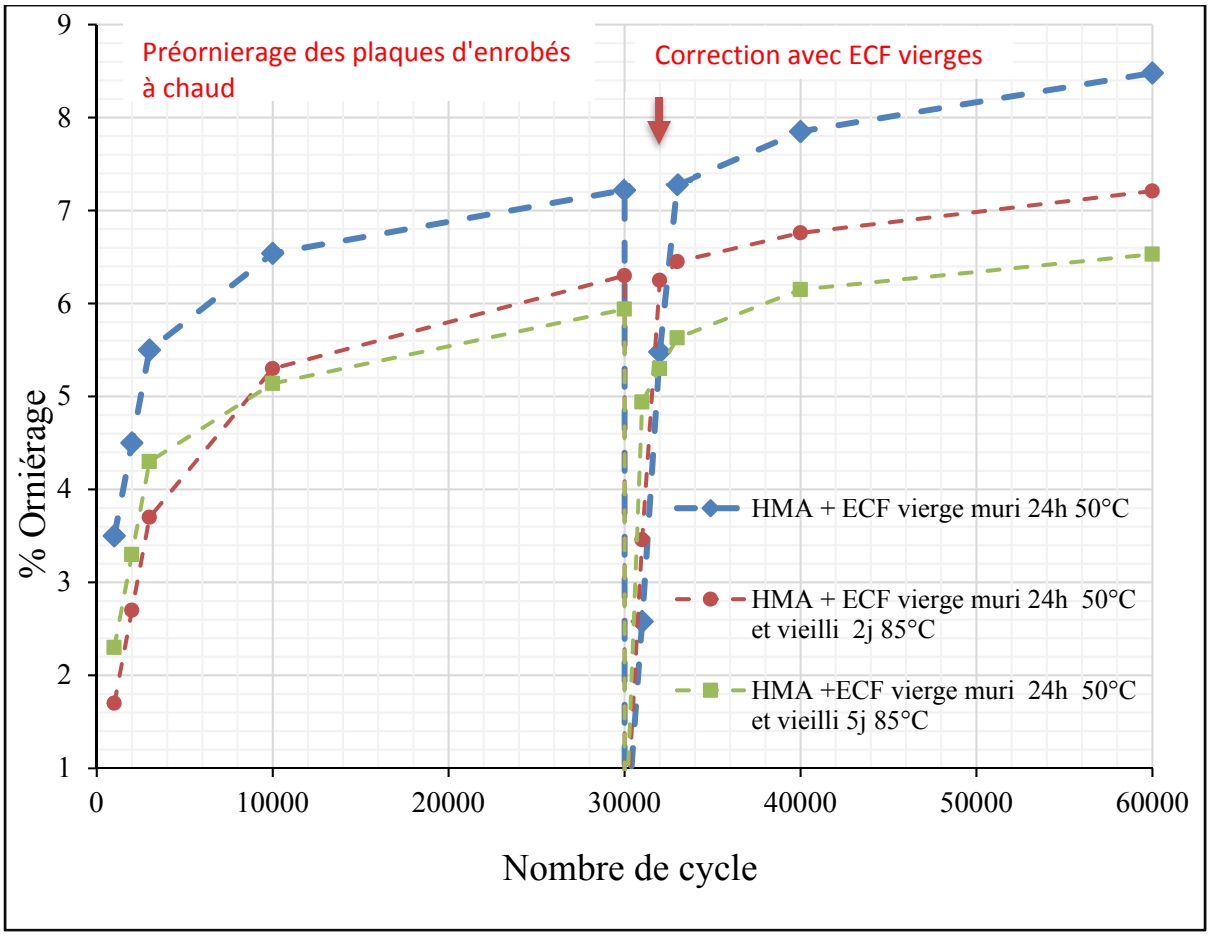


Figure 7.7 Impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des couples enrobé à chaud /ECF vierges

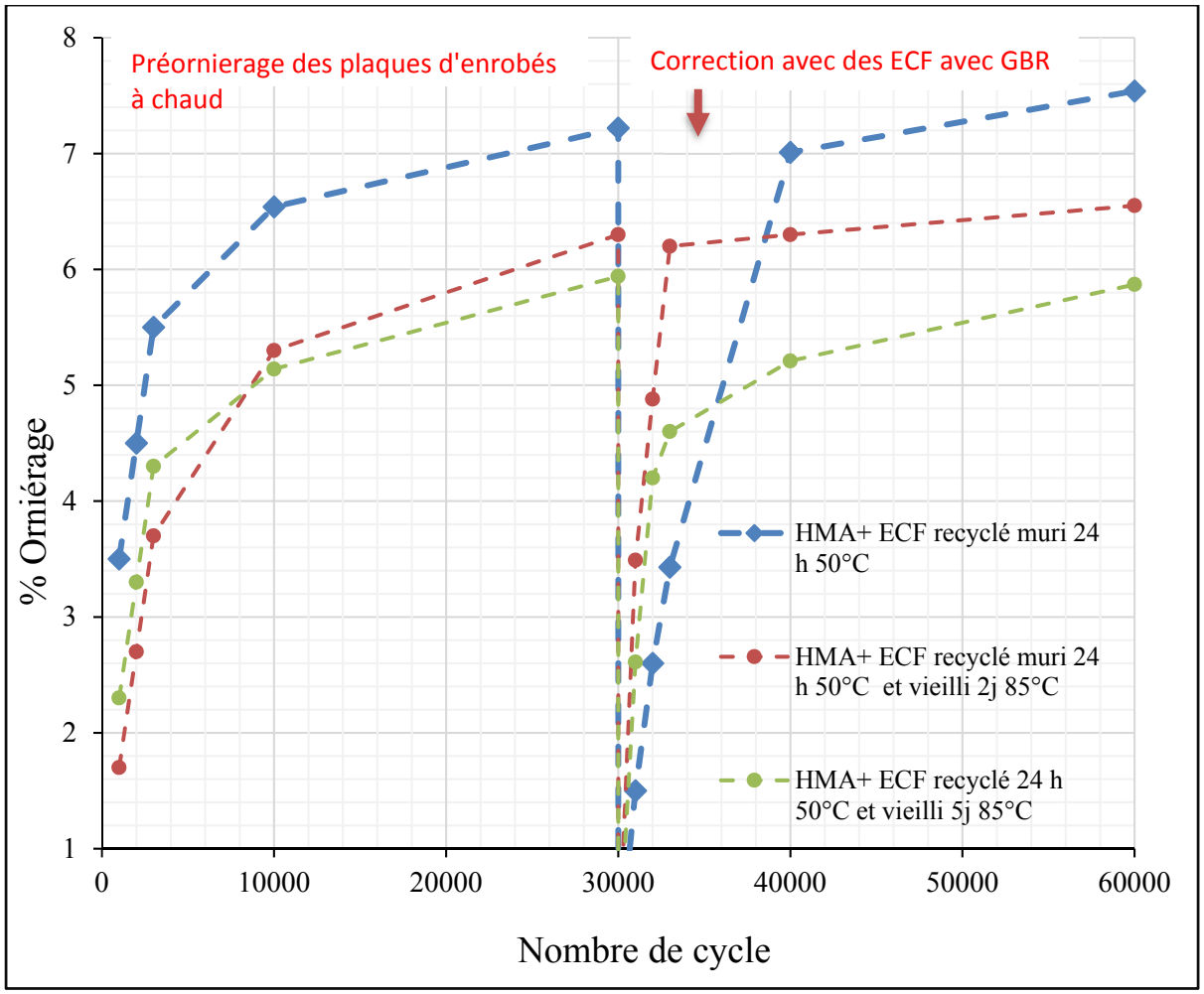


Figure 7.8 Impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des couples enrobé à chaud / ECF recyclés

Il est aussi important de comparer maintenant les résultats d'orniérages obtenus entre les plaques coulées avec de l'ECF vierge et les plaques coulées avec de l'ECF recyclé. La Figure 7.9 montre, indépendamment de la présence du GBR, que les couples d'ECF Vierge et ECF avec GBR vieillis 5 jours à 85°C sont les couples qui présentent les meilleures résistances à l'orniérage. Cependant, pour les mêmes conditions de vieillissement (24h à 50°C ou 2 jours à 85°C, etc.), les plaques revêtues avec de l'ECF recyclé présentent de meilleures résistances à l'orniérage (figure 7.9). Ceci s'explique par le fait que dans le cas du couple enrobé à chaud/ECF recyclé un gain de vieillissement est observé à cause du liant vieilli issu des GBR

et des fibres de verre présentes dans les formulations des ECF recyclés (Cf. chapitre vieillissement). Notons qu'à 85°C, on peut déjà considérer que le liant des GBR et le liant d'ajout subissent un mélange. Cependant, il faut se poser la question sur l'homogénéité du mélange obtenu. Les résultats de l'extraction séquencée réalisée sur les ECF avec GBR dans le chapitre 5 n'ont pas été concluants sur l'homogénéité entre les liants issus des GBR et les liants de l'émulsion. Par ailleurs, on peut supposer qu'à 85 °C et à long terme, le mélange entre les différents liants devient possible.

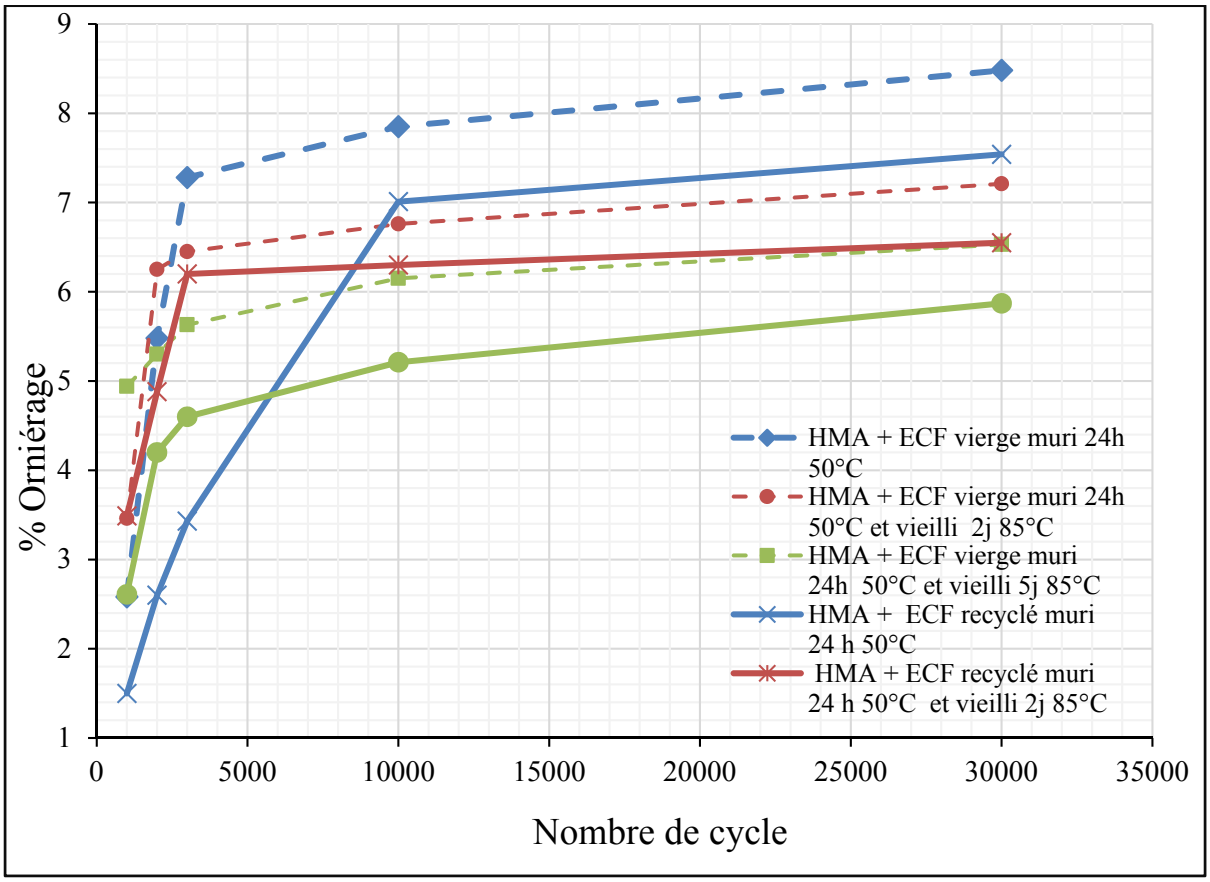


Figure 7.9 Impact du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des couples enrobé à chaud /ECF vierges et des couples enrobé à chaud/ECF recyclé

7.5 Prédiction de l'orniérage du couple enrobé à chaud + ECF

Le logiciel de statistique Mini TAB a été utilisé comme moyen pour valider l'approche expérimentale. Il a permis grâce à ses fonctions de prédire un modèle d'orniérage pour les plaques à chaud réhabilitées avec de l'ECF.

Statistiquement, la validation du modèle s'effectuera à travers le coefficient de détermination ajusté R^2_a et le rapport entre l'erreur standard Se et la déviation standard Sy. Ces paramètres sont définis par les équations 7.1, 7.2 et 7.3 (Hastie, Tibshirani et Friedman, 2002; Nisbet , Elder et Miner, 2009).

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(y-\hat{y})^2}{(x-k)}} \tag{7.1}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum(Y-\bar{Y})^2}{(x-1)}} \tag{7.2}$$

Où x est taille de l'échantillon ; k est le nombre de variables indépendantes dans le modèle ; Y : valeurs testées; y : valeurs testées ; $\hat{Y}$: valeurs prédites et $\bar{y}$ est la valeur moyenne du module dynamique testé. Plus la valeur de S_e/S_y est faible, plus la prédiction sera bonne et précise. Le coefficient de détermination R^2 est défini par l'équation 7.3.

$$R^2_a = 1 - \frac{(x-1)\times(1-R^2)}{x-k-1} \tag{7.3}$$

7.5.1 Développement du modèle

Afin de déterminer les paramètres à choisir pour le développement du modèle de prédiction de l'orniérage, il est toujours important de définir une matrice de corrélation. Ceci permettra d'éviter les phénomènes de multi colinéarité.

Le tableau 7.4 présente la matrice de corrélation des variables prédicteurs. Dans le tableau 7.4 au niveau de chaque cellule, deux valeurs sont observées à savoir : la valeur supérieure représente le coefficient de corrélation tandis que la valeur inférieure correspond au p-value. La valeur p (en anglais p-value), parfois aussi appelée p-valeur, est la probabilité d'obtenir la même valeur (ou une valeur encore plus extrême) du test si l'hypothèse nulle était vraie (Genovese, Roeder et Wasserman, 2006).

L'analyse de la matrice de corrélation présentée dans le tableau 7.4 montre que le pourcentage de granulats, le pourcentage de ciment et le temps de mûrissement ne sont pas significatifs par rapport au pourcentage d'orniérage. En effet, ils présentent des faibles coefficients de corrélation et des $P > 0{,}5$. Ainsi, dans la prédiction du pourcentage d'orniérage ces paramètres ne seront pas pris en compte.

Les paramètres de prédiction considérés sont le nombre de cycles, le pourcentage d'eau d'apport et l'état d'orniérage de la chaussée. Ces paramètres ont été pris en compte pour le développement du modèle sur la matrice de corrélation, car ils présentent des p value < 0.05 et des coefficients de corrélation élevés.

L'analyse de la régression linéaire a montré que le calcul statistique ne pouvait pas estimer le pourcentage d'émulsion de bitume, de dope, des GBR, de fibre et de filler, d'où leur suppression. Il ne reste ainsi que trois variables, dont le nombre de cycles, l'état d'orniérage initial et le pourcentage d'eau d'apport. Avant le développement du modèle, la base des données des essais de laboratoire sur les plaques d'orniérage a été divisée en deux parties. La première partie d'essai a servi au développement du modèle et la deuxième série d'essais a permis sa validation.

Tableau 7.4 Matrice de corrélation du modèle de prédiction de l'orniérage des enrobé à chaud/ ECF

	Nombre de cycle	Granulats (%)	Eau d'apport (%)	Émulsion de bitume (%)	Dope (%)	Ciment (%)	RAP (%)	Filler (%)	Fibre (%)	Temps de mûrissement	État d'orniérage
Nombre de cycle	1,000 0,000										
Granulats (%)	-0,054 0,709	1,000 0,000									
Eau d'apport (%)	0,054 0,709	-1,000 *	1,000 0,000								
Émulsion de bitume (%)	0,054 0,709	-1,000 *	-1,000 *	1,000 0,000							
Dope (%)	0,054 0,709	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	1,000 0,000						
Ciment (%)	* *	* *	* *	* *	* *	1,000 0,000					
GBR (%)	0,054 0,709	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	* *	1,000 0,000				
Filler (%)	0,054 0,709	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	* *	-1,000 *	1,000 0,000			
Fibre (%)	0,054 0,709	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	-1,000 *	* *	-1,000 *	-1,000 *	1,000 0,000		
Temps de vieillissement	-0,064 0,657	0,023 0,873	-0,023 0,873	-0,023 0,873	-0,023 0,873	* *	-0,023 0,873	-0,023 0,873	-0,023 0,873	1,000 0,000	
État d'orniérage	0,774 0,000	-0,081 0,570	0,081 0,570	0,081 0,570	0,081 0,570	* *	0,081 0,570	0,081 0,570	0,081 0,570	-0,240 0,090	1,000 0,000
Pourcentage d'orniérage	0,528 0,000	-0,333 0,017	0,333 0,017	0,333 0,017	0,333 0,017	* *	0,333 0,017	0,333 0,017	0,333 0,017	-0,514 0,000	0,757 0,000

D'où le développement du modèle (Équation 7.4).

$$(\%)\ \text{Orniérage} = -1.1-(0{,}000024 \times \text{Nombre de cycle}) + (0{,}24 \times (\%)\ \text{Eau}) + (0{,}991 \times (\%)\ \text{Orniérage HMA}) \quad (7.4)$$

La figure 7.10 montre une corrélation moyenne entre les valeurs d'orniérage prédites et les valeurs d'orniérage mesurées à l'orniéreur MLP. En effet, un coefficient de détermination ajusté (moyen à élevé) de $R^2 = 0,65$ est obtenu avec une dispersion moyenne de $S_e/S_y = 0,73$.

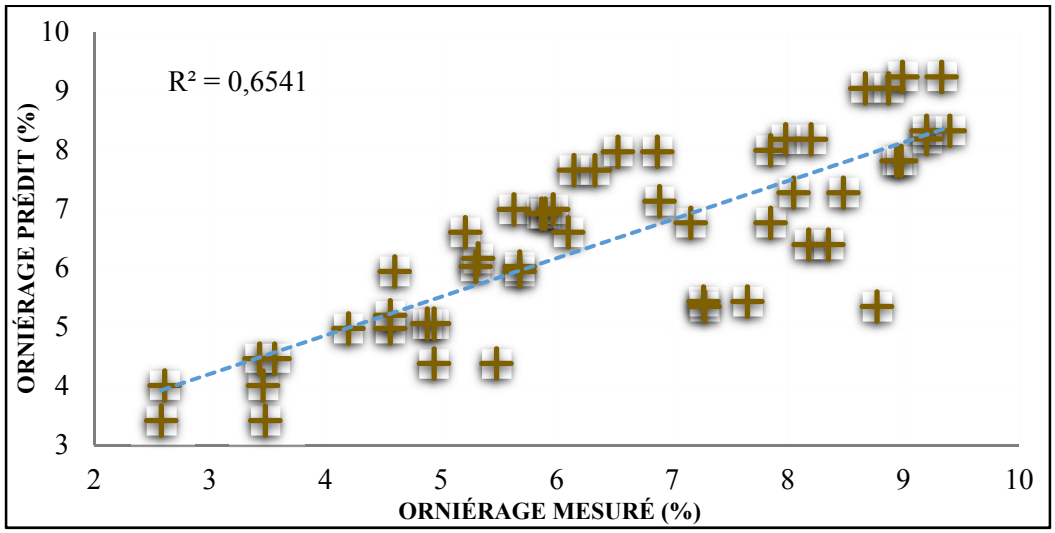


Figure 7.10 Valeurs d'orniérage prédites Vs valeurs d'orniérage mesurées

L'analyse de la variance montre que les paramètres état d'orniérage, pourcentage d'eau d'apport et le nombre de cycles sont significatifs dans le modèle de prédiction de l'orniérage ($p<0.05$). L'analyse de la variance montre également que la variable état d'orniérage initial de la chaussée a une valeur p plus significative que la variable pourcentage d'eau d'apport.

Ainsi, cette dernière influence moins le comportement du modèle. Le nombre de cycles est le paramètre le moins significatif du modèle, son p-value n'est pas significatif. Cependant, il reste un paramètre important dans la prédiction de l'orniérage. On remarque également que le degré de liberté de l'erreur est à plus de 3 fois le degré de liberté de la régression ce qui signifie que le modèle développé est valide. Donc, on peut dire que les nombres d'essais réalisés permettent d'estimer les coefficients du modèle. Notons aussi que le p-value de l'inadéquation de l'ajustement est nul ce qui confirme que le modèle est adéquat (tableau 7.5).

Tableau 7.5 Analyse de la variance des variables de prédiction du modèle

Source	Dégrée de la liberté	Somme des valeurs ajustées au carrée	Moyenne des valeurs ajustées au carrée	Valeur F(test de fisher)	Valeur p (test de student)
Régression	3	123,713	41,2375	29,60	0,000
Nombre de cycle MLPC	1	1,451	1,4511	1,04	0,0313
Eau (%)	1	13,930	13,9305	10,00	0,003
Orniérage de la chaussée	1	53,390	53,3903	38	0,000
Erreur	47	65,484	1,3903	-	-
Inadéquation de l'ajustement	24	61,663	2,5693	15,47	0,000
Erreur pure	23	3,820	0,166	-	-
Total	50	189,196	-	-	-

7.6 Conclusion

Ce chapitre de la thèse a permis de montrer que le vieillissement thermique à l'étuve a un impact sur la résistance à la déformation permanente des complexes enrobés bitumineux/ECF vierges et des couples enrobés bitumineux/ECF recyclés.

Il a été démontré que dans les deux cas (plaques corrigées ave ECF vierge ou avec ECF recyclé), le coulage des ECF sur les supports à chaud a permis d'améliorer la résistance è l'orniérage et ainsi retarder la dégradation de la couche support. En effet, l'étude de l'influence du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des enrobés à chaud a montré que leur résistance à l'orniérage augmentait avec le temps de vieillissement à l'étuve ventilée à une température de 85°C à condition que le couple enrobé/ECF soit bien stabilisé avec une mise en œuvre assez éloignée de l'été caniculaire.

Ces phénomènes sont essentiellement dus à l'oxydation des liants bitumineux contenus dans ces matériaux et entrainant leur durcissement. De plus, un phénomène de mémoire (sommation) de l'orniérage initial de l'enrobé bitumineux est observé. En effet, les orniérages secondaires observés sur les couples enrobé/ECF sont plus rapides que l'orniérage initial de la plaque d'enrobé. Cependant, ceci n'a pas eu d'impact sur la résistance à l'orniérage puisqu'un meilleur comportement a été observé après le coulage des ECF sur les supports à chaud. L'ECF vierge ou recyclé a contribué à redonner une nouvelle vie au revêtement. L'évolution de l'orniérage des complexes enrobés + ECF vierge ou recyclé a été au niveau de la couche d'ECF. La couche d'ECF est susceptible de disparaitre après un certain nombre de cycles d'orniérage. De plus, l'évolution de l'orniérage des ECF suit une tendance similaire à celle des plaques des enrobés à chaud.

L'étude a également permis de comparer le comportement des ECF vierges et recyclées à l'orniérage après le vieillissement à l'étuve. L'ajout des GBR et des fibres dans la formulation a amélioré la résistance des supports corrigés avec les ECF recyclés à l'orniérage. Le liant vieilli des GBR ainsi que les fibres ont conféré au complexe HMA + ECF recyclé un comportement plus rigide. D'où, une meilleure résistance au phénomène d'orniérage a été constatée. Il a été également déduit, indépendant de la présence ou non des GBR dans les formulations des ECF, que plus le temps de vieillissement est important, meilleure est la résistance à l'orniérage.

L'étude a également permis de développer un nouveau modèle qui permet la prédiction du comportement des ECF au phénomène de l'orniérage. Ce modèle a permis de souligner les paramètres les plus impactant sur de la prédiction du comportement des ECF à l'orniérage.
Il a été montré que les paramètres état d'orniérage et pourcentage d'eau d'apport sont significatifs dans le modèle de prédiction de l'orniérage, tandis que le nombre de cycle reste un paramètre non significatif dans le modèle, mais déterminant. En effet, l'analyse de la régression a démontré une forte corrélation entre les valeurs d'orniérage prédites par le modèle et les valeurs mesurées au laboratoire à l'orniéreur MLPC. Ce modèle peut être pris en considération lors du dimensionnement des chaussées.

CHAPITRE 8

ÉTUDE DE LA RHÉOLOGIE DES ECF- APPLICATION AU DIMENSIONNEMENT RATIONNEL FRANÇAIS

8.1 Introduction

L'objectif de tous les matériaux de revêtement bitumineux est de fournir les meilleures performances en termes de résistance et de durabilité lors de la mise en service de la chaussée neuve ou réhabilitée. Pour les enrobés coulés à froid, des recherches antérieures ont été réalisées sur la mesure des performances rhéologiques des ECF afin de mieux dimensionner les chaussées. Ces travaux ont porté sur la rhéologie des ECF formulés avec des granulats de basalte (Chen et al., 2010). Durant ces travaux, des éprouvettes prismatiques de (35±2) mm× (30 ±2) mm× (250±2) mm ont été utilisé. Les modules de rigidité en flexion des éprouvettes ont été mesurés à des températures variant de -10°C à 35°C. Deux vitesses de chargement verticales de 50 et 5 mm / min ont été appliquées aux poutres respectivement. Ils ont pu montrer que, comme attendu d'un matériau avec un comportement viscoélastique, la résistance à la flexion des ECF à un taux de chargement élevé était supérieure à celle à faible taux de chargement (mise en évidence de l'influence de la fréquence) (Chen et al., 2010). Les résultats du module de flexion ont révélé que l'ECF présente une meilleure caractéristique anti-fissure à basses températures lorsqu'on applique un taux de chargement relativement faible. Ces résultats peuvent permettre une meilleure modélisation du comportement des ECF sur chaussée (choix du type de comportement dans les logiciels comme Cesar-LCPC pour le dimensionnement des routes urbaines, des zones de stationnement et des ronds-points giratoires où le trafic est plus lent).

Il a été démontré que l'ajout de fibre dans l'ECF augmente la résistance à la traction et améliore la flexibilité sans nuire aux autres performances exigées avec des résultats similaires à ceux obtenus avec l'utilisation de fibres dans les matériaux bitumineux (Robati, 2014a). Ces

différents travaux montrent que la recherche sur les performances des ECF est de nos jours plus axée sur la rhéologie.

Dans ce chapitre, des mesures du module de rigidité des ECF formulés avec et sans GBR par une adaptation de l'essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques (NF EN 12697-26) ont d'abord été effectuées. Cette étude permet en même temps d'étudier l'impact de l'utilisation de GBR sur la rigidité des ECF. Ensuite, une estimation du comportement différé des ECF est mesurée à travers la détermination et l'exploitation d'un angle de retard entre les contraintes appliquées et les déformations subies en utilisant une méthode graphique. Pour finir, l'impact de l'ECF, même en faible épaisseur, sur le dimensionnement de chaussée y est évalué.

8.2 Comportement mécanique des matériaux viscoélastiques

Les enrobés coulés à froid sont des mélanges de granulats (vierge ou GBR) et d'émulsion de bitume. Le liant bitumineux présent dans l'émulsion initiale lui confère un comportement viscoélastique. Les granulats assurent plutôt un comportement élastique (Ba, 2012; Corté et Di Benedetto, 2004a) .

Le comportement mécanique des enrobés bitumineux peut être décrit par différentes grandeurs telles que le module complexe (comportement viscoélastique), le module dynamique (module de rigidité viscoélastique) qui est la norme du module complexe (comportement élastique d'un matériau viscoélastique), la susceptibilité au fluage ou *creep compliance* et les modèles mécaniques (Huet, 2S2P1D, Maxwell, etc.) (Aklonis et William, 1983; Doucet et Auger, 2010). Le module complexe s'exprime sous la forme d'un nombre complexe composé d'une partie réelle (E1) et d'une partie imaginaire (E2), tel que présenté à l'équation 8.1. Il peut être représenté sous sa forme vectorielle, avec deux paramètres à savoir son module (|E*|) (norme du vecteur ou du module complexe) à l'équation 8.2 et son argument (φ) (angle du vecteur) à l'équation 8.3, tel que représenté dans le plan complexe de la Figure 8.1 (Carter, 2002).

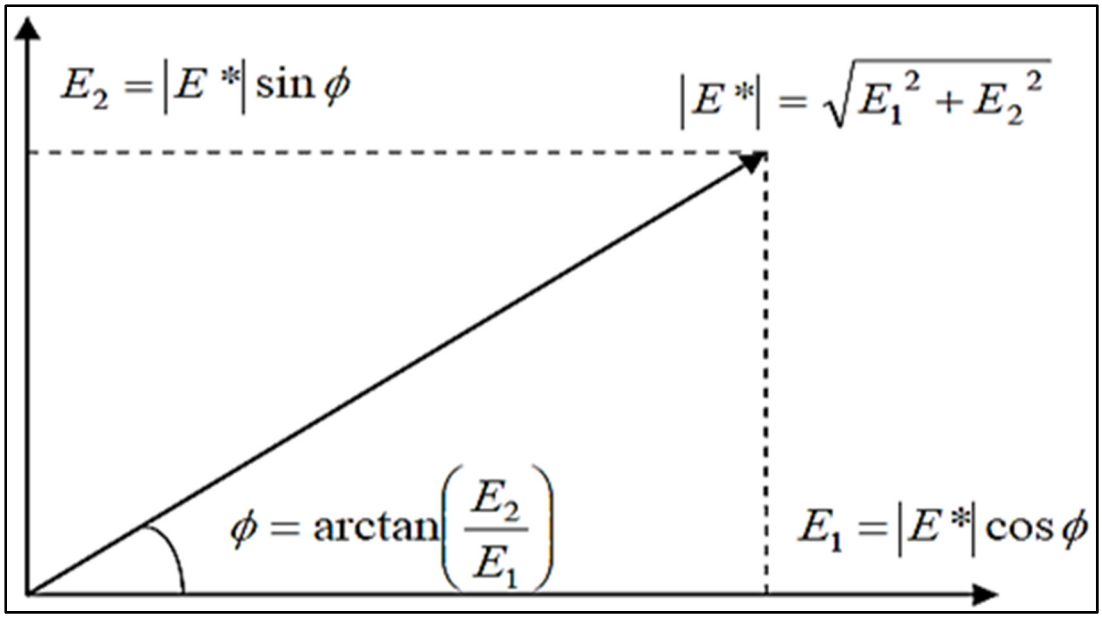


Figure 8.1 Représentation du module complexe
Tirée de Carter (2002)

$$E^* = E_1 + iE_2 = |E^*|\cos\phi + i|E^*|\sin\phi = |E^*|e^{i\phi} \tag{8.1}$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \tag{8.2}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \tag{8.3}$$

Où

- E* = module complexe (MPa);
- |E*| = norme du module complexe (MPa);
- ϕ = argument du module complexe (rad);
- E_1 = partie réelle du module complexe (MPa);
- E_2 = partie imaginaire du module complexe (MPa);
- i = nombre imaginaire.

La composante E_1 représente la partie réelle du module complexe et permet de quantifier l'énergie élastique emmagasinée ; E_1 est le module réversible associé à la partie élastique du matériau. La composante E_2 quantifie l'énergie dissipée par frottement interne sous l'effet d'une sollicitation. Cette énergie dissipée se transforme en chaleur et va accroître la température au sein d'une éprouvette soumise à un chargement cyclique. La détermination du module complexe permet en quelque sorte de s'affranchir de l'effet temporel sur les propriétés rhéologiques du matériau (Aidara, 2016; Carter, 2002). |E*| est une approximation du module élastique d'un matériau viscoélastique, qui peut être utilisé pour le dimensionnement des chaussées lorsque les lois de l'élasticité sont employées. ϕ Représente le décalage/déphasage dans le temps entre la contrainte et la déformation (retard de la réponse en déformation sur la contrainte appliquée). Il varie de 0° pour un matériau purement élastique (réaction instantanée) à 90° pour un matériau purement visqueux(Corté et Di Benedetto, 2004a).

8.2.1 Principe d'Équivalence Temps Température (PETT)

Le principe d'équivalence temps-température PETT (ou encore appelé principe de superposition temps-température PSTT) est défini comme une équivalence entre la réduction de la fréquence et l'augmentation de la température (Christensen, 2003). Ce principe est basé sur le fait que la structure du matériau n'est pas sensible à l'effet de la température (pas d'évolution de la structure). Ceci signifie donc que la température n'impacte que la dynamique brownienne des molécules (Lesueur, 2009).

La possibilité d'appliquer le principe d'équivalence temps-température PETT sur les bitumes reste une thématique à vérifier. En effet, certains bitumes ne répondent pas au PETT puisqu'ils sont de nature thermosensible (Lesueur, 1996). Par ailleurs, il a été confirmé que cette thermo-sensibilité est considérée comme limitée pour la plupart des bitumes destinés à l'usage routier dans les gammes de fréquences étudiées expérimentalement. (Lesueur, 2009).
Pour valider l'applicabilité du PETT sur un matériau donné, il est primordial de vérifier si sa fonction de relaxation est indépendante de la température. Cet aspect peut être vérifié

graphiquement en examinant les allures des courbes isothermes, des courbes dans l'espace de Cole-Cole et dans l'espace de Black.

En effet, si, lors de la construction des courbes isothermes, on détecte l'existence de couples fréquences températures tels que (f_1, T1) ≠ (f_2, T2) mais avec les mêmes valeurs de modules ($E^*(f_1, T1)=E^*(f_2, T2)$), le principe PETT peut être considéré comme applicable. Ceci signifie que le module complexe peut donc être représenté par une variable réduite fg (T) et donc construire une seule courbe (log|E*|, log(f)) pour une température dite « température de référence » (Delaporte, 2007). La superposition de ces courbes montre la vérification du PPET sur un matériau donné.

8.2.2 Mesure du module de rigidité

Contrairement aux méthodes de mesure du module complexe et du module dynamique (traction-compression, flexion, etc.), la mesure du module de rigidité par traction indirecte sur éprouvettes cylindriques n'utilise pas un chargement sinusoïdal (NF EN 1269726). La plus grande difficulté pour effectuer des essais de module sur les ECF neufs consiste à confectionner les éprouvettes. Des chercheurs sont parvenus à effectuer des essais de module résilient et de susceptibilité au fluage sur des carottes d'ECF formulés avec du bitume polymère. Ces carottes ont été prélevées sur des chaussées déjà mises en service à raison de 12 à 30 kg/m^2.

8.3 Méthodologie adoptée pour l'étude

Cette étude a été effectuée en deux parties :

- fabrication et murissement des échantillons : cette première partie consiste à formuler et à fabriquer trois éprouvettes cylindriques d'ECF vierge et d'ECF avec 50% de GBR de 100 mm de diamètre et 75 mm d'épaisseur conformément à la norme NF EN 12697-26. Ces échantillons sont placés par la suite à l'étuve pendant 14 jours à 50°C pour la phase de mûrissement. Le choix des 14 jours a été effectué par rapport aux exigences de la norme

NF EN 12697-26 sur les essais de module sur les enrobés formulés à chaud. La température de murissement de 50°C a été choisie pour favoriser l'évaporation de l'eau contenue dans l'ECF sans trop favoriser le vieillissement ;

- essais de module complexe : la deuxième partie consiste à réaliser l'essai de traction indirecte selon la norme européenne NF-EN 12697-26 (Afnor, 2012a) en faisant varier la température et la fréquence.

8.3.1 Formulation et confection des éprouvettes

Les matériaux utilisés dans cette étude ainsi que leur origine, leur composition et leur formulation, sont présentés dans le chapitre 3 (section 3.1). Ces matériaux sont essentiellement des granulats (quartzite 0/5 mm), une émulsion bitumineuse cationique, un dope, du ciment et des additifs. Pour la fabrication des ECF recyclés avec 50% de GBR issus du Canada, des fibres de verre ont été ajoutées afin d'améliorer la montée en cohésion entre liant et granulats recyclés. Pour valider la formulation, des essais de caractérisation imposés par l'ISSA ont été effectués tels que la cohésion, l'abrasion et l'orniérage.

8.3.2 Procédure de fabrication des éprouvettes

Pour effectuer ces essais, des éprouvettes cylindriques d'ECF vierge et d'ECF avec 50% GBR de 100 mm de diamètre et 75 mm d'épaisseur ont été confectionnées. Ces échantillons sont placés par la suite à l'étuve pendant 14 jours à 50°C pour la phase de mûrissement. Le choix de 75 mm a été fait pour des raisons pratiques lors de la confection des ECF.

Les différentes étapes de fabrication des ECF consistent en un pré-mouillage des granulats (vierge et GBR) dans une gamelle pour obtenir la teneur en eau initiale. Simultanément à cette étape, l'émulsion, l'eau d'apport et le dope sont mélangés dans un récipient. Ensuite, les deux mélanges (granulats + émulsion) sont malaxés manuellement. Les différentes étapes de la formulation des ECF sont détaillées dans le chapitre 3 (Section 3.4). Après la formulation, les mélanges confectionnés sont coulés dans des moules Marshall (3 échantillons de chaque mélange d'ECF) (figure 8.2). Ensuite les éprouvettes sont laissées au repos à la température

ambiante du laboratoire et non couvertes pendant environ 20 min pour homogénéiser les températures de départ avant de les mettre à murir pendant 14 jours à l'étuve à une température de 50°C. La température de mûrissement a été choisie en se basant sur des études de l'impact du vieillissement sur la rhéologie des ECF. La méthode dite LCPC est appliquée sur les enduits superficiels qui sont très proches des ECF. Les détails de cette méthode sont expliqués dans la Chapitre 5 (section 5.4.1). Il est important de préciser que les éprouvettes de 75mm d'épaisseur ne représentent pas la réalité des ECF, mais cette épaisseur est nécessaire pour les essais de rigidité. Premièrement, il est possible qu'à cette épaisseur, la compacité et la distribution des granulats soient différentes que celles observées dans les épaisseurs normales d'au plus 15mm. Aussi, avec cette grande épaisseur, la cinétique du murissement est différente, car l'eau doit traverser une plus grande distance pour sortir de l'échantillon. Il est donc probable que le vieillissement de ces échantillons soit moins important que pour des échantillons de faibles épaisseurs.

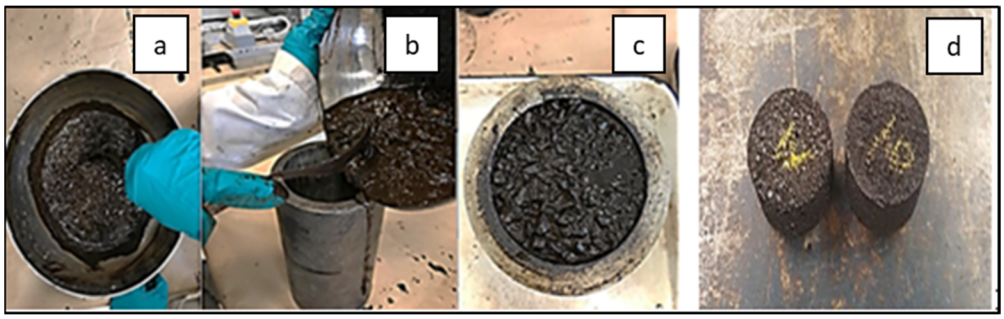


Figure 8.2 Méthodologie de confection d'éprouvette d'ECF pour essai

8.3.3 L'essai de traction indirecte

Après un temps de murissement de 14 jours, les éprouvettes confectionnées ont été soumises à des essais de traction indirecte selon la norme NF EN 12697-26 aux températures de -10°C, 0°C et 10°C, et pour chaque temps de montée ont été considérées. La méthode est applicable aux éprouvettes cylindriques fabriquées en laboratoire ou prélevées dans une couche de chaussée de divers diamètres et épaisseurs (Reinke et al., 1990). La figure 8.4 montre le

montage effectué. Lors de l'essai de traction indirecte, les éprouvettes cylindriques testées sont munies de deux LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) montés face à face sur un cadre rigide fixé sur elles (Figure 8.4). Notons que pendant l'essai, le cadre doit être soutenu uniquement par des pinces, et ne doit être en contact avec aucune autre partie de l'appareillage (d'autres capteurs de mesure de la déformation sont acceptés comme des extensomètres. Les éprouvettes sont ensuite conditionnées dans l'enceinte thermorégulée pendant 4 heures pour affecter à l'éprouvette la température spécifiée (elles doivent être montées pour l'essai avec l'un des diamètres marqués placé verticalement). Lors du réglage de la hauteur du coulisseau, l'exigence consista à obtenir une charge de crête définie à un temps de montée cible. La forme de l'impulsion de charge est influencée par le module de rigidité et la taille de l'éprouvette soumise à essai. La hauteur du coulisseau devrait être réglée pour obtenir un facteur de surface de charge de 0,60. Le facteur de surface de charge est le rapport entre la demi-surface de montée (surface hachurée figure 8.3) et le produit du temps de montée et de la valeur crête de la charge (NF EN 12697-26). Au moins 10 impulsions de conditionnement doivent être appliquées pour permettre à l'appareillage de caler la magnitude de la charge et sa durée pour produire la déformation diamétrale horizontale et le temps de chargement visé. Le chargement est appliqué avec une force de contact de 50 N et une force de cycle de 200 N.

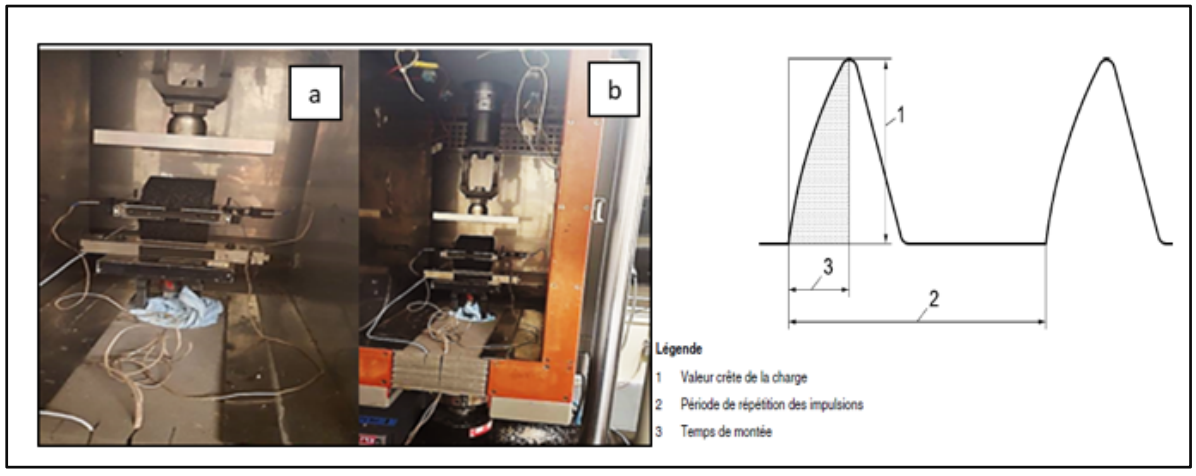


Figure 8.3 Montage d'éprouvette d'ECF pour l'essai de traction indirecte a) photo du montage b) schéma de la crête de la charge et le temps de montée
Tirée de NF EN 12697-26

8.4 Analyse et interprétations des résultats du module élastique en fonction de la température et la fréquence

Les résultats des essais de module ont permis de tracer les courbes de la figure 8.4. Ces résultats permettent de déterminer *F,* la valeur crête de la charge verticale appliquée (N) et *Z (en mm),* l'amplitude de la déformation horizontale obtenue pendant le cycle de chargement. Ces deux valeurs permettent la détermination du module de rigidité de l'ECF à travers l'équation 8.4. La Figure 8.5 montre un exemple de l'évolution de la force appliquée en fonction du temps.

La norme recommande un ratio de montée de 0,60. Cependant, l'intervalle accepté de ratio de montée varie de 0,50 à 0,70. Les résultats obtenus et présentés sur la figure 8.4 permettent de vérifier la conformité de l'essai : tous les 10 essais effectués, le ratio obtenu est conforme avec des variations de 0,59 à 0,61.

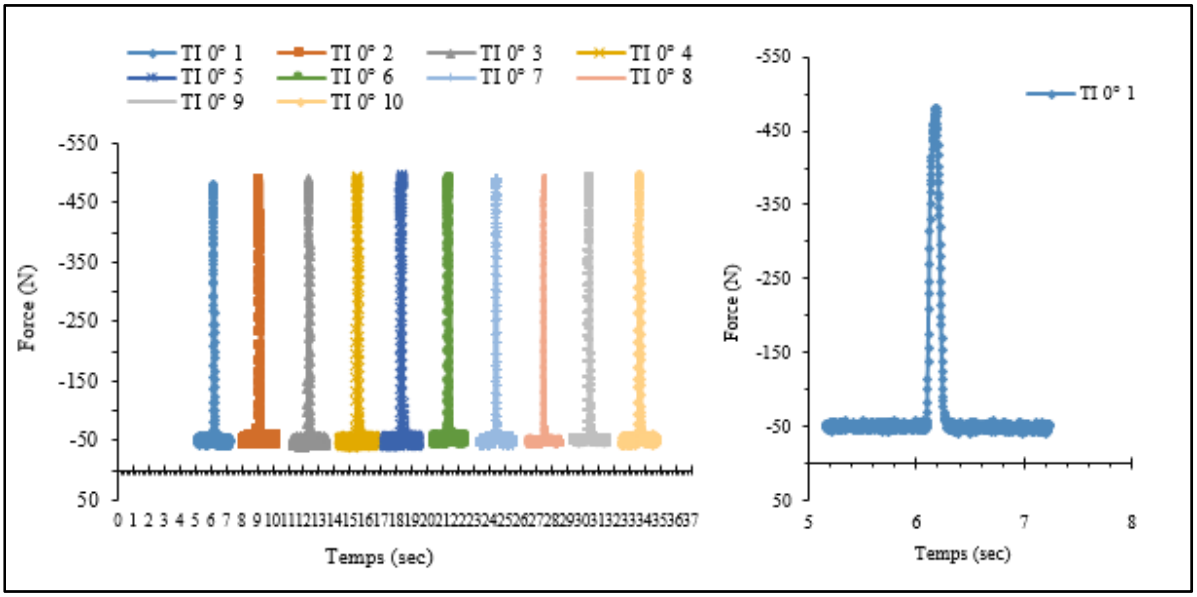


Figure 8.4 Évolution de la force au cours du temps lors de l'essai lors de l'essai de module de rigidité élastique sur les ECF formulés avec des GBR à 0°C

À l'aide des mesures des 5 impulsions de chargement ayant les ratios plus proches de 0.60 choisi parmi les 10 essais, le module de rigidité mesuré doit être déterminé pour chaque impulsion de chargement à l'aide de l'équation 8.4 (NF EN 12697-26).

$$E = \frac{F \times (\nu + 0.27)}{Z \times h} \quad (8.4)$$

Où :

- E est le module de rigidité mesuré (MPa);
- F est la valeur crête de la charge verticale appliquée (N);
- Z est l'amplitude de la déformation horizontale obtenue pendant le cycle de chargement (mm);
- h est l'épaisseur moyenne de l'éprouvette (30 mm à 75 mm);
- ν est le coefficient de Poisson.

Si le coefficient de Poisson n'est pas déterminé, une valeur de 0,35 doit être admise pour toutes les températures, car d'après les études de Touhara (2012), le coefficient de Poisson des matériaux bitumineux varie autour de cette valeur prise conventionnellement dans le dimensionnement rationnel français. Le module de rigidité mesuré doit être corrigé par un ratio de montée de 0,60 selon la norme NFEN 12697-26 (pour prendre en compte le réglage du coulisseau qui détermine l'homogénéité de la charge) à l'aide de l'équation 8.5.

$$E' = E \times (1 - 0.322 \times (\log(E) - 1.82) \times (0.60 - k)) \quad (8.5)$$

Où :

- E' est le module de rigidité (MPa), corrigé par un facteur de surface de charge de 0,60;
- k est le facteur de surface de charge mesuré;
- E est le module de rigidité (MPa) à un facteur de charge k.

La figure 8.5 présente les courbes isothermes (-10°C, 0°C et 10°C) des éprouvettes d'ECF vierge et des éprouvettes d'ECF formulé avec du GBR. Sur la figure 8.6, on observe que pour une température donnée, les ECF vierges ont des modules de rigidité bien supérieurs aux modules des ECF formulés avec du GBR. En effet, bien que le liant vieilli du GBR soit plus rigide que le bitume neuf, dans le cas des ECF formulés avec du GBR, le mélange des deux liants ne s'effectue pas. L'effet de l'augmentation de la rigidité du à l'apport du liant vieilli du

GBR prouvée par les travaux de (Colbert et You, 2012); EL-Beze (2008); (Garfa, 2016) ne s'effectue pas ici, car le mélange s'effectue à froid et la température de murissement n'est pas suffisante pour mobiliser le bitume du GBR et produire un mélange homogène des deux liants comme dans le cas de l'extraction, vu qu'il n'y a pas de remaniement du mélange durant cette période. Le liant neuf adhère seulement à la surface des granulats de GRB. Ce qui traduit probablement des liaisons électrostatiques à l'interface GBR-bitume neuf plus faible que les liaisons électrostatiques à l'interface granulat vierge-bitume neuf (Ziyani, 2013b) vu les résultats obtenus sur la figure 8.5.

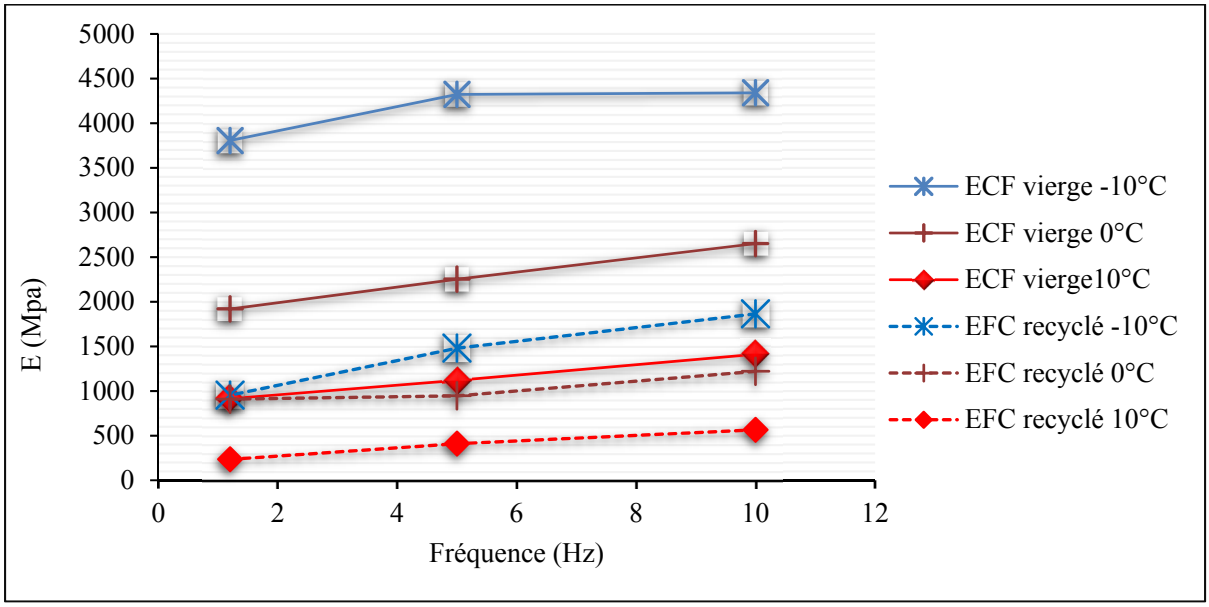


Figure 8.5 Courbes isothermes à-10°C, 0°C et 10°C pour les modules de rigidité mesurés en traction indirecte

Bien que l'ECF soit appliqué à faible couche (10 à 15mm), ceci ne fait pas de lui un matériau de faible résistance intrinsèquement. En effet les résultats montrent que pour les ECF vierges, on obtient pratiquement des modules élevés pouvant allez jusqu'à 4000 MPa pour les faibles températures (-10°C) (Figure 8.5). Ceci est cependant moins évident pour les modules des ECF formulés avec du GBR.

Notons aussi que les épaisseurs considérées lors des essais de module d'élasticité sont supérieures à 15 mm pour des raisons de manipulation lors de l'essai (éprouvettes fabriquées avec une épaisseur 75 mm). Néanmoins, dans le dimensionnement des chaussées, le module des matériaux bitumineux ne varie pas en fonction de l'épaisseur de la couche comme c'est le cas avec les matériaux granulaires.

8.4.1 Mesure de la composante visqueuse de l'ECF

Dans cette étude, afin d'arriver à estimer le comportement différé (composante visqueuse non prise en compte par la norme NF EN 12697-26), une méthode graphique qui consiste à identifier la différence en temps entre les 2 sommets (contrainte et déformation) (Figure 8.6) a été utilisée. Cette différence est en seconde. Par exemple, sur la figure 8.7, il y a une différence de temps des crêtes des courbes de 0,016243 secondes (21,684454-21,668211). Il faut ensuite transformer par calcul ce temps en angle de retard. On a opté pour cette appellation car l'angle, obtenu après le calcul, ne peut pas être considéré comme un angle de phase vu que le chargement est monotone. Cet angle permet de mieux visualiser le comportement viscoélastique de l'ECF. En effet, le comportement viscoélastique est une combinaison de deux types de comportements : un comportement instantané et un comportement différé se traduit par l'angle de retard.

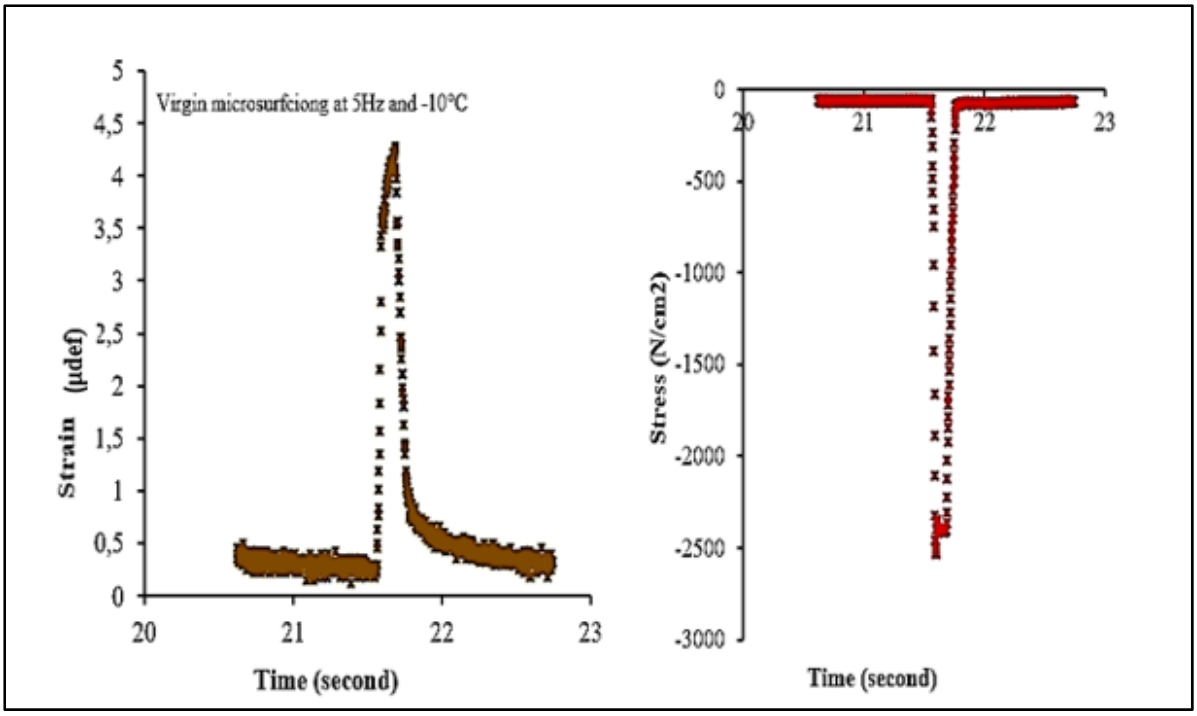


Figure 8.6 Courbes d'évolution des contraintes et des déformations en fonction du temps lors de l'essai de traction indirecte

Pour cela, il faut transformer le signal temporel en un signal fréquentiel. Admettons que l'on considère seulement le temps de montée comme notre signal (0,108211s), ça veut dire qu'en 1 seconde on pourrait le faire 9,24 fois (1/0,108211) donc 9,24 Hz. Donc, pour le calcul de l'angle de retard, on considère que 1 cycle égale 360^{o}.

Ainsi, à 9,24 Hz, ça veut dire que l'on fait 3326,83° par seconde. Avec une différence de 0,016243 seconde, ça donne un angle de retard de 50,03°. Ce qui est significatif au sens où les matériaux viscoélastiques ont des valeurs d'angles de phase comprises entre 0 et 90°. Il est important de préciser qu'il ne s'agit pas d'un angle de phase, car le signal n'est pas sinusoïdal.

8.4.1.1 Analyse rhéologique

Le tableau 8.1 présente les modules des ECF obtenus par traction indirecte sur éprouvettes cylindriques. On observe une évolution logique des modules en fonction de la température et

du temps de montée. En effet, le module des matériaux bitumineux augmente avec la baisse de la température et l'augmentation de la fréquence de chargement. Cependant les angles de retard calculés ne suivent pas la même logique et sont dispersés. Normalement, ils devraient diminuer avec la baisse de température et la baisse de la fréquence (Aidara, 2016; Carter, 2002; Corté et Di Benedetto, 2004a).

Afin de vérifier si le principe d'équivalence temps –température s'applique aux ECF étudiés, les courbes de module ont été tracées dans l'espace complexe de Black. On observe sur la Figure 8.7 une bonne unicité des courbes de Black après élimination des valeurs incohérentes (les valeurs qui ne suivent pas la même tendance que les autres points de la courbe). Ce qui signifie que ces mélanges répondent aux principes d'équivalence temps-température et qu'une courbe maitresse ne peut être tracée. Les valeurs incohérentes sont surement des aux erreurs de manipulation lors des essais. Pour valider cette méthode de détermination des angles de phases des ECF, il serait plus nécessaire d'effectuer des essais de modules complexes et des essais de modules élastiques par traction indirecte sur des enrobés bitumineux et ensuite de vérifier la validité des angles de phase calculés par rapport aux angles de phases mesurés. Ceci permettrait ainsi de comprendre pourquoi une bonne unicité des courbes de module n'a pas été observée sur la figure 8.7.

Tableau 8.1 Résultats des essais de modules lors de l'essai de traction indirecte et de calculs des angles de retard par la méthode graphique

ECF +50% GBR				ECF vierge			
T (°C)	**F (Hz)**	**E (MPa)**	**φ (°) calculée**	**T (°C)**	**F (Hz)**	**E (MPa)**	**φ (°) calculée**
-10	9,24	2243	12	-10	9,24	4814	9
-10	5	1756	21	-10	5	4667	54
-10	1,2	953	28	-10	1,2	3806	30
0	9,24	1290	13	0	9,24	2249	24
0	5	1273	19	0	5	2088	33
0	1,2	1028	28	0	1,2	1919	50
10	9,24	389	36	10	9,24	1288	36
10	5	378	57	10	5	1163	20
10	1,2	240	69	10	1,2	914	9

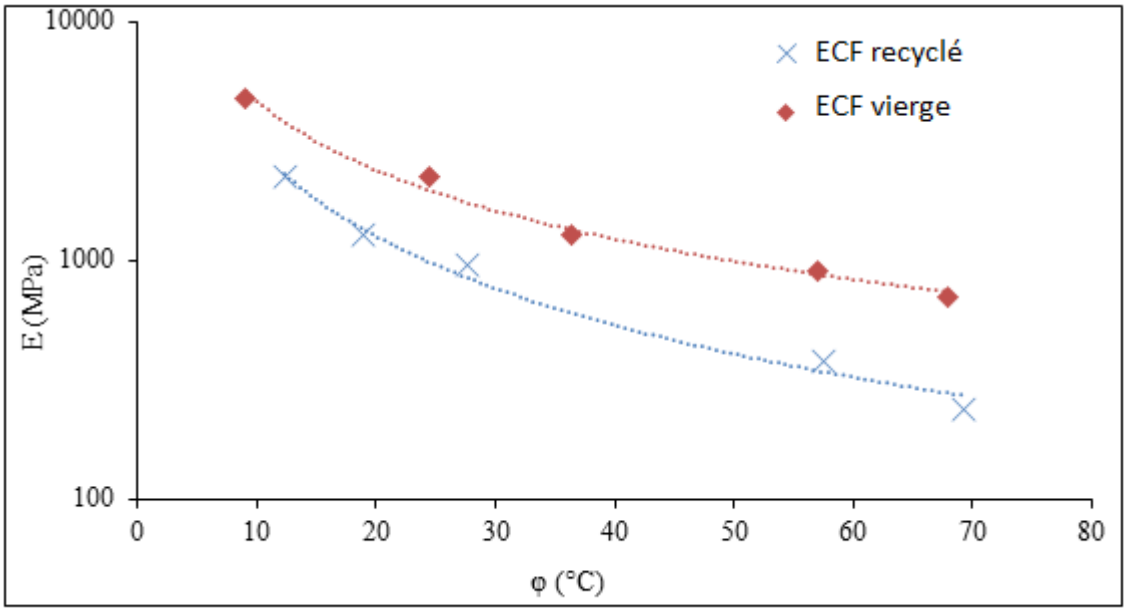


Figure 8.7 Courbes de modules dans l'espace de Black

Les courbes maitresses ont été tracées pour les résultats de l'ECF vierge (Figure 8.8) et pour les résultats de l'ECF à 50% de GBR (Figure 8.9). Une assez bonne unicité des courbes maitresses est observée. Il est possible d'avoir une meilleure optimisation de l'unicité de la courbe à partir de la courbe du modèle 2S2P1D.

Le modèle 2S2P1D (*2 Springs* / Ressort, *2 Parabolic* /2 amortisseurs paraboliques et *1 Dashpot* / amortisseur), fut développé à l'ENTPE par Olard et al. (Olard et Di Benedetto, 2003) en proposant une généralisation du modèle de Huet-Sayegh, par l'introduction d'un amortisseur linéaire. Il permet une meilleure simulation du comportement des bitumes et des enrobés bitumineux (Aidara, 2016) et permet d'améliorer le modèle de Huet-Sayegh à hautes températures et basses fréquences. À une température donnée, ce modèle possède 7 constantes et son module complexe est donné par l'équation 8.6 suivante.

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta\,(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \qquad (8.6)$$

Où :

- i est le nombre complexe défini par $i^2 = -1$;
- $\omega = 2\pi$*fréquence est la pulsation ;
- k, h sont des exposants tels que $0 < k < h < 1$;
- E0 (module statique) le module lorsque $\omega\eta \rightarrow 0$;
- E∞ (module vitreux) le module lorsque $\omega\eta \rightarrow \infty$;
- η : temps caractéristique, dont la valeur dépend uniquement de la température ;
- β : constante sans dimension ;
- ε : viscosité Newtonienne ;
- $\varepsilon = (E\infty - E0)\,\beta\eta$. Lorsque $\omega\eta \rightarrow 0$, alors $E^*(i\omega\eta) \rightarrow E0 + i\omega\,(E\infty - E0)\,\beta\eta$.

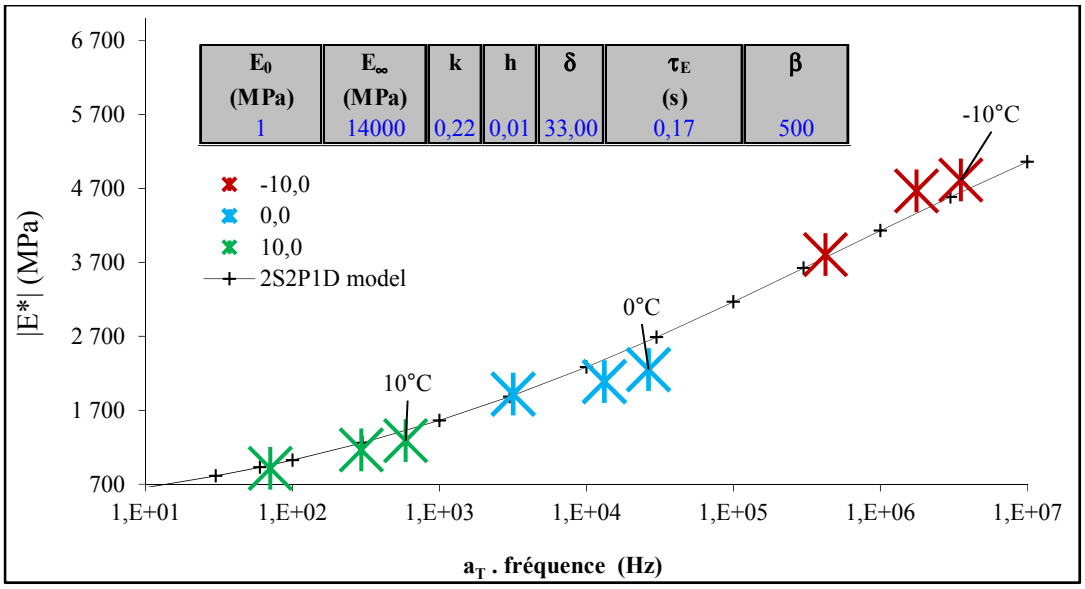


Figure 8.8 Courbe maitresse de l'ECF vierge et modélisation 2S2P1D

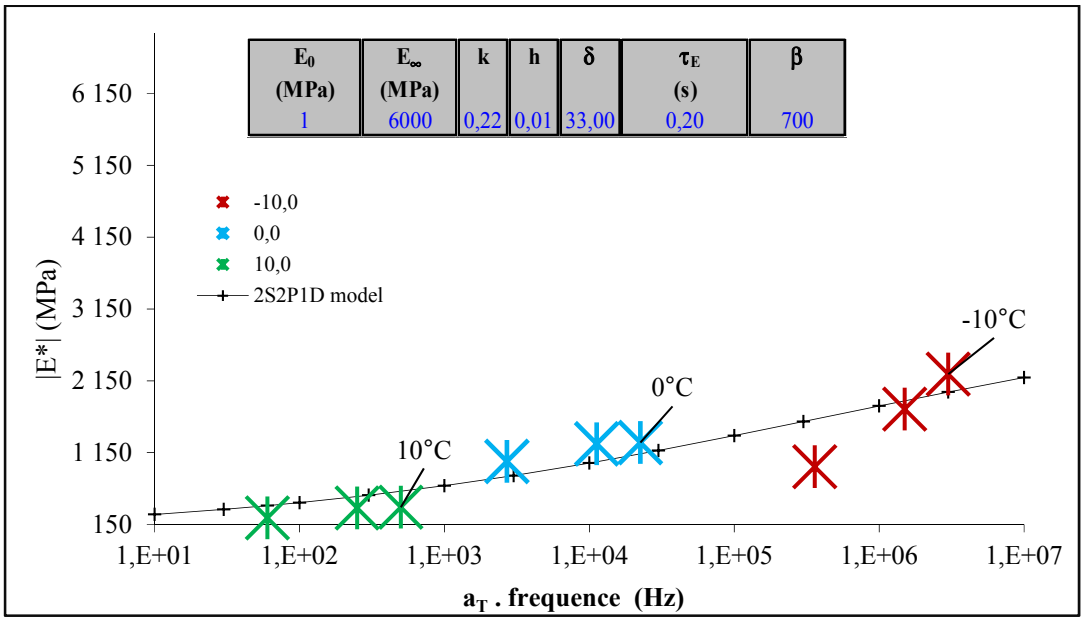


Figure 8.9 Courbe maitresse de l'ECF recyclé 50% GBR et modélisation 2S2P1D

Lors de la modélisation des courbes maitresses avec le modèle 2S2P1D, les paramètres de ce dernier sont optimisés, mais doivent tout de même rester dans des limites acceptables (ne doivent pas dépasser certaines valeurs imposées par le modèle). Par exemple le module E_0 peut

prendre de très faibles valeurs, tandis que l'E_∞ prendra des valeurs assez élevées. La valeur de β varie autour de 500. Les valeurs de k, h et τ prenne des valeurs très faibles inférieures à zéro. Et enfin δ varie autour de 50. La détermination du module de rigidité des ECF vierges et avec GBR a servi de déterminer l'impact des ECF sur le dimensionnement défini dans les parties suivantes de ce chapitre.

8.5 Mesure de l'impact de l'ECF sur le dimensionnement des structures des chaussées selon la méthode rationnelle française (Alizée-LCPC)

Il est connu que le rôle principal des ECF est d'imperméabiliser et de corriger les dégradations de surface des couches de roulement des chaussées bitumineuses entretenues. Afin de vérifier si la fine couche d'ECF a, en plus, un impact structurel sur le fonctionnement de la chaussée entretenue, des simulations ont été effectuées par le logiciel Alizé-LCPC permettant de comparer la tenue de structures de chaussée préalablement affaiblies dans différentes configurations (revêtues ou non avec un ECF). En effet, Alizé est utilisé dans le dimensionnement rationnel des chaussées ou toutes les couches de matériaux sont considérées comme élastiques linéaires.

Les résultats obtenus ont été analysés par la méthode grille-séca qui permet de suivre l'évolution des contraintes et des déformations au niveau de chaque couche de la chaussée et suivant différents profils. Dans la méthode de calcul grille-séca décrite par Alizé-Lcpc (2016), les profils verticaux de calcul sont déterminés à l'aide d'une grille. L'ensemble des points de calcul forment ainsi, à chaque étape de calcul, un semi de points à maille carrée. Le pas qui est le côté de la maille carrée et l'étendue sont définis par l'utilisateur. Les résultats sont présentés sous forme de profils longitudinaux et transversaux, ou de surfaces d'isovaleurs 2D ou 3D. Les isovaleurs 2D permettent une visualisation plus complète du fonctionnement global de la structure de chaussée pour un chargement donné. Il existe aussi des applications dans les études de comportement d'une chaussée sous chargement complexe. Dans ce cas, la pré-localisation des sollicitations maximales peut être complexe. Ceci peut engendrer des difficultés pour la définition des profils verticaux de calcul. La présentation des résultats selon l'application des profils longitudinaux et transversaux, ou selon des surfaces 2D ou 3D, facilite en général cette

localisation (Alizé-Lcpc, 2016). Pour faire ce calcul, trois structures de chaussées souples sont considérées (Tableau 8.2). Seules les structures 2 et 3 sont revêtues d'ECF (respectivement monocouche et bicouche). La structure 1 représente une chaussée bitumineuse dégradée prête à être entretenue avec de l'ECF. Le tableau 8.2 présente les caractéristiques des trois structures de chaussée simulées.

Tableau 8.2 Données d'entrées des simulations

Structure 1				**Structure 2**			**Structure 3**		
Matériaux	**Épaisseur (m)**	**Module (MPa)**	**Coefficient de Poisson**	**Épaisseur (m)**	**Module (MPa)**	**Coefficient de Poisson**	**Épaisseur (m)**	**Module (MPa)**	**Coefficient de Poisson Selon le Guide de dimensionnement du LCPC 1994**
ECF vierge (10°C-10Hz)	-	-	-	-	-	-	0,015	1288	0,35
	-	-	-	0,015	1288	0,35	0,015	1288	0,35
Enrobé (10°C-10Hz)	0,07	7200 (5880)	0,35	0,07	7200 (5880)	0,35	0,07	7200 (5880)	0,35
GNT2	0,25	400	0,35	0, 25	400	0,35	0, 25	400	0,35
Sol Support	Infini	50	0,35	Infini	50	0,35	Infini	50	0,35

GNT : grave bitume non traitée

Dans cette étude il a été proposé un module de l'enrobé bitumineux, le module de l'enrobé bitumineux est minoré de 20% (choix justifiant un état moyen à bon de la chaussée) pour prendre en compte la perte de module liée à la fatigue partielle du matériau. Notons qu'avec les méthodes AASHTO (*American Association of state Highway and Transportation Office*) une baisse de 40% est plus appropriée (AASHTO, 1993).

La figure 8.10 présente le chargement (cas d'un jumelage standard français) utilisé lors des simulations et son orientation par rapport à l'entraxe dans le repère X0Y. L'identification de cette orientation est nécessaire à l'interprétation des résultats obtenus.

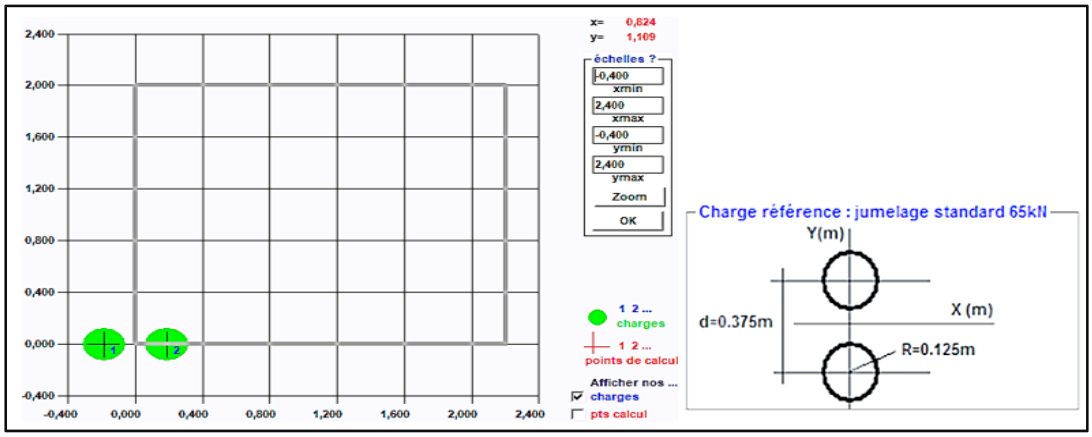


Figure 8.10 Donnée de chargement et orientation de l'entraxe

Selon la méthode de dimensionnement rationnelle française décrite par le guide de conception et de dimensionnement des structures de chaussées neuves du LCPC de 1994, les critères de dimensionnement retenus pour la validation d'une chaussée souple sont l'allongement (ε_T) à la base des couches bitumineuses et l'orniérage au sommet du sol support (ε_z). Notons que pour une chaussée présentant une succession de couches bitumineuses collées entre elles, c'est l'allongement à la base de la couche bitumineuse la plus profonde qui est considéré. Mais, dans le cadre de notre étude, l'allongement à la base de chaque couche bitumineuse (enrobé et ECF) sera vérifié afin de déceler l'impact des couches d'ECF sur la structure de chaussé. La figure 8.11 présente les principaux critères de dimensionnement qui peuvent être vérifiés avec le logiciel Alizé-LCPC en mode grille-séca.

Consigne Affichée	Nbre de paramètres	Désignation des paramètres à calculer
SigmaT	7	SigmaXX, SigmaYY,Sigma1, Sigma2, Téta (XoY), p et q
EpsilonT	7	EpsiXX, EpsiYY, Epsi1, Epsi2, Téta (XoY), EpsiV et EpsiD
SigmaZ	3	Sigma ZZ, p et q
EpsilonZ	3	EpsiZZ, EpsiV et EpsiD
SigXX...ZX	10	SigmaXX, SigmaYY, SigmaZZ, SigmaXY, SigmaYZ, SigmaZX, Sig1, Sig2, Teta (YoZ) et W
EpsXX...ZX	10	EpsilonXX, EpsYY, EpsZZ, EpsilonXY, EpsYZ, EpsZX, Eps1, Eps2, Teta (YoZ) et W

Figure 8.11 Principaux critères de dimensionnement en mode grille-séca (LCPC)

SigmaT =contrainte de traction; EpsilonT = déformation par traction; Sigma Z= contrainte verticale; EpsilonZ = déformation vertical; SigXX…ZX = contrainte suivant un plan; EpsXX…ZX = déformation suivant un plan

8.5.1 Analyse des résultats de la simulation

Le tableau 8.3 montre que la présence d'ECF, même en faible épaisseur (15 mm), a un impact structurel sur la chaussée. En effet, en passant de la chaussée souple, à la chaussée revêtue d'ECF monocouche puis bicouche, on observe une diminution de la déflexion de la chaussée et de l'orniérage du sol support (ε_z). La déflexion passe de 91,8 (1/100mm), ensuite à 90,1 (1/100 mm) et enfin à 87,8 (1/100 mm). La déformation du sol support initialement de 1055,1 µdef, baisse à 1020,1 µdef puis à 974,3 µdef. L'allongement à la base de la couche d'enrobé passe initialement de 229,6 µdef à 222.7 µdef pour la structure 2 (ECF monocouche) et à 211 pour la structure 3 (ECF bicouche). Le rôle du dimensionnement de chaussée est de contrôler les fissurations dues à la fatigue et les déformations engendrées par l'orniérage pendant la durée de vie de la chaussée estimée à 20 ans. Les résultats ont montré que l'ajout d'une couche et/ou deux couches d'ECF a permis de diminuer ε_t (dû à la fatigue) et ε_z (dû à l'orniérage) pendant la durée de vie de la chaussée (20 ans). Les résultats obtenus ont démontré que les structures avec ECF ont une capacité portante de la chaussée plus élevée que la structure sans ECF. Ceci nous mène à déduire que les structures avec ECF peuvent supporter plus de trafic que les chaussées sans ECF pendant leur durée de vie.

Tableau 8.3 Résultats d'analyse comparative des structures étudiées

Paramètres	Structure 1(Sans ECF)			Structure 2(avec une couche d'ECF)			Structure 3(avec deux couches d'ECF)		
	X_{max}	Y_{max}	V_{max}	X_{max}	Y_{max}	V_{max}	X_{max}	Y_{max}	V_{max}
Épaisseur	800 mm			815 mm			830 mm		
Déflexion 1/100mm	0,150	0,000	91,800	0,15	0,000	90,100	0,150	0,000	87,800
Epsilon Z (ε_T) µdef	0,150	0,000	1055,100	0,100	0,000	1020,100	0,100	0,000	974,300
Epsilon T (ε_T) µdef	0,150	0,000	-229,600	0,000	0,200	-222,700	0,150	0,000	-211,000

8.6 Conclusion

Les travaux les plus récents sur les ECF sont de plus en plus axés sur l'utilisation de fibre et/ou de GBR en vue de répondre aux exigences de performance et environnementale. Dans ce chapitre, l'étude de l'adaptation de l'essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques a permis de montrer que la technique de confection d'éprouvettes d'ECF à partir de moule Marshall permettait d'obtenir des échantillons pour l'essai. Le séchage et le mûrissement effectué à l'étuve sont nécessaires à l'obtention de l'éprouvette, même si cela représente en même temps un vieillissement en parallèle.

Ainsi, sa faible épaisseur sur la chaussée bitumineuse n'empêche pas à l'ECF d'être un matériau assez résistant. En effet, les résultats montrent que pour les ECF vierges, on obtient des modules assez élevés. Ceci est cependant moins évident pour les modules des ECF formulés avec du GBR. Les ECF vierges ont des modules de rigidité plus élevés que les modules des ECF formulés avec du GBR. Dans le cas des ECF avec du GBR, le mélange des deux liants ne s'effectue pas, c'est une adhésion qui s'effectue**.** En effet, l'effet de l'augmentation de la rigidité dû à l'apport du liant vieilli de GBR prouvé par les travaux de Beze (2008), Colbert et You (2012), Sanou (2015) et Garfa et al. (2016) ne s'effectue pas ici. Même si les conditions des mélanges sont les mêmes (le mélange s'effectue à froid), la

température de murissement n'est pas suffisante pour mobiliser le bitume de GBR et produire un mélange homogène des deux liants comme dans le cas de l'extraction, vu qu'il n'y a pas de remaniement du mélange durant cette période. Le liant neuf adhère seulement à la surface des granulats de GBR qui se comporte comme un *Black Rock* (Ziyani, 2013). Ce qui traduit des liaisons électrostatiques à l'interface GBR-bitume neuf plus faible que les liaisons électrostatiques à l'interface granulat vierge-bitume neuf (Ziyani 2013).

L'analyse des résultats des essais de modules de rigidité a montré une bonne unicité des courbes de modules dans l'espace de Black après lissage des angles de phase et dans le plan Cole-Cole. Ce qui a permis d'appliquer le principe d'équivalence temps-température et de tracer des courbes maitresses. Une assez bonne unicité des courbes maitresses a été observée avec une meilleure optimisation de l'unicité à partir des courbes maitresses tracées à partir du modèle 2S2P1D. Il est important de souligner que lors de la modélisation des courbes maitresses avec le modèle 2S2P1D, les paramètres de ce dernier sont optimisés, mais doivent tout de même rester dans des limites acceptables.

L'analyse de l'impact de la présence de l'ECF sur le dimensionnement d'une chaussée souple montre que malgré sa faible épaisseur, l'ECF a un impact structurel sur le comportement de la chaussée soumise aux sollicitations du trafic routier.

Il serait également intéressant de réaliser une planche d'essai d'ECF instrumentée qui permettra d'effectuer des mesures réelles des différents paramètres (déformation, traction).

Une autre perspective est à souligner et qui consiste en l'amélioration de l'apport structurel de l'ECF recyclé. L'augmentation de la rigidité des ECF recyclé se ferait par la mobilisation du bitume issu des GBR. Ceci pourrait être effectué par l'ajout d'un agent régénérant. L'agent régénérant permettrait d'améliorer la pénétrabilité, réduire la viscosité du liant et augmenter la durabilité du liant bitumineux en équilibrant les différentes fractions chimiques (augmenter la teneur en maltènes par rapport aux asphaltènes).

CHAPITRE 9

RÉALISATION D'UN CHANTIER EXPÉRIMENTAL D'ECF AVEC GBR-VALIDATION DES ESSAIS DE LABORATOIRE

9.1 Introduction

Le travail expérimental effectué dans cette thèse a été mené principalement à l'échelle du laboratoire avec des approches physico-chimiques et mécaniques. Afin de vérifier et valider ou non les comportements et performances étudiées, nous avons pris l'initiative d'illustrer notre travail en réalisant des chantiers expérimentaux, permettant de se placer à l'échelle du chantier, en condition opérationnelle. Ce retour d'expérience pourrait constituer une avancée utile, plus particulièrement dans le domaine de l'entretien des chaussées pour démontrer l'intérêt technique ou pas de l'utilisation de GBR dans les ECF et identifier peut-être des points de vigilance non observés à l'échelle du laboratoire. De plus, nous confronterons à travers ces chantiers, nos hypothèses concernant l'efficience de notre technique d'ECF recyclé en l'exposant aux conditions climatiques et aux trafics réels.

En effet, trop souvent les recherches effectuées en laboratoire restent en laboratoire et semblent trop éloignées des enjeux du terrain, alors qu'il existe souvent un réel besoin d'apporter des réponses adéquates sur la nature des problèmes rencontrés sur le chantier. Ainsi en alliant l'intervention et le savoir-faire des équipes spécialistes dans la technique d'ECF à nos différentes hypothèses, nous aurons la légitimité de nous être confrontés aux attentes opérationnelles tout en réalisant notre ouvrage. La collaboration de professionnels nous permettra d'une part de faciliter la gestion des différents aléas et d'avoir des avis concrets sur ce que nous comptons déployer.

Ainsi l'objectif de ce chapitre est de présenter la construction d'une planche d'essai et d'un chantier expérimental avec la formulation d'ECF recyclé étudiée durant cette thèse. La planche expérimentale a servi d'essai de validation de la formulation des enrobés coulés à froid utilisée en laboratoire. Les résultats positifs obtenus pour la planche d'essai (ECF 50% GBR) ont

encouragé la municipalité à accepter de réaliser un chantier expérimental avec des dimensions plus importantes.

9.2 Descriptif de la planche d'essai et du chantier expérimental

Comme mentionné auparavant, le travail a été fait en deux parties :

- une planche expérimentale (planche test);
- un chantier.

La planche expérimentale ainsi que le chantier expérimental ont été réalisés par notre partenaire industriel Probinord. Les intervenants pour la construction des ECF recyclés à 50 % sont les équipes de travaux publics de l'entreprise Probinord (ouvriers et conducteur de travaux). Il est important de connaitre le support initial avant de couler l'ECF. En effet, les performances des ECF en termes d'aspect visuel et macro texture sont liées à la nature et l'état du support initial d'où l'importance de la connaissance du support à entretenir.

En ce qui concerne la planche, elle a été réalisée sur une route départementale à proximité de l'usine. La planche test a été coulée sur un ancien ECF qui date d'environ un an. La route sur laquelle nous avons effectué la planche test connait un trafic régulier au vu des différentes entreprises qui l'avoisinent. Lors de la mise en œuvre de la planche test (coulage des ECF 50 % GBR), la température était de 28 °C. La bande d'ECF appliqué fait 250 m de longueur et 2,7 m de largeur.

Pour le chantier avec 50 % de GBR, il a été réalisé sur des surfaces plus importantes (surface du chantier : 500 m x 8 m = 4000 m²). La route départementale que nous avons revêtue avec de l'ECF recyclé présente un trafic moyen (4450 véhicules /jour dont 550 PL (Poids Lourds)). L'ECF a été coulé sur un enrobé.

9.2.1 Formulation des ECF avec 50 % GBR pour la réalisation de la planche test et du chantier

La formulation des ECF 50% GBR a été basée sur les essais réalisés en laboratoire. Des fibres de verre ont été ajoutées afin d'améliorer la cohésion des ECF recyclés. L'ajout des fines n'a pas été jugé nécessaire pour plusieurs raisons. Il a été constaté que le mélange (granulats vierges + GBR) ne nécessitait pas une recomposition. De plus, il était délicat d'ajouter les fines sur place vu que les GBR sont fournis directement au chantier.

Il est important de souligner que les matériaux utilisés pour la formulation sont les mêmes matériaux décrits dans le chapitre 3 (section : matériaux employés pour les essais en France). Cependant la seule différence, c'est la nature des GBR utilisés. En effet, les carrières ne peuvent pas fournir continuellement le même type de GBR. La nature de GBR dépend de l'endroit et du stock disponible .En effet, ce point a été soulevé au début de la thèse et pris en considération lors de la fabrication de l'émulsion de bitume. Cette dernière a été adaptée pour qu'elle fonctionne avec tout type de granulats. Par ailleurs, l'entreprise a bien surveillé la nature de GBR (proviennent d'une couche de roulement d'un chantier autoroutier) obtenu car la bonne qualité des granulats est une des exigences de la technique des ECF. Le tableau 9.1 présente la formulation des ECF 50% GBR pour la planche test et le chantier.

Tableau 9.1 Formulation des ECF 50 % GBR pour les chantiers expérimentaux

Matériaux	Pourcentage
Granulats vierges et recyclés	100,0 %
Émulsion de bitume (ppc)	12,0
Eau d'apport (ppc)	6,0
Dope (ppc)	0,6
Ciment (ppc)	0,4
Fibres (ppc)	0,05

Nous avons donc, la courbe de granulométrie, suite à une recomposition avec 50% de granulats vierges et 50% de GBR, est présentée dans la figure 9.1.

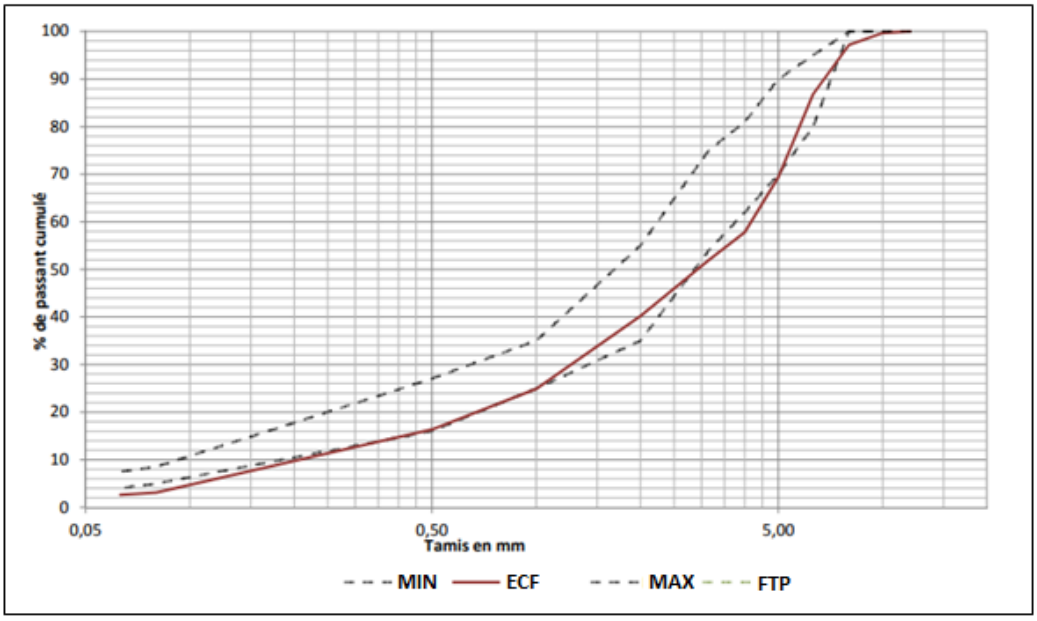


Figure 9.1 Courbe granulométrie de l'ECF pour les chantiers expérimentaux (ECF 50% GBR)

9.2.2 Mise en œuvre de la planche d'essai et du chantier

La première étape a consisté à la préparation du support (couche à entretenir). La surface à revêtir a été nettoyée pour enlever les poussières. Contrairement à la planche d'essai, le chantier a été réalisé en deux couches avec 50 % de GBR dans chaque couche. La réalisation des travaux (chantier d'ECF recyclé) a été conduite avec succès (pas de rejet de granulats, dosage parfait des différents matériaux).

Pour l'aspect visuel, l'ECF recyclé à 50 % a un aspect quasi similaire aux ECF vierges, ce qui confirme le bon coulage sur le support. En effet, nous n'avons noté aucun défaut remarquable, aucun problème de rejet de granulat. Bien au contraire, nous avons pu constater d'une bonne cohésion des différentes couches. Notons, qu'opérationnellement, le trafic a été rapidement été

repris (environ 60 minutes) après le coulage des ECF recyclés. Les photos 9.2 présentent un exemple des chantiers réalisés.



Figure 9.2 Les photos chantier expérimental réalisé par Probinord (Essonne –France)

9.3 Interprétation des résultats

Pour mieux appréhender les niveaux de performance des ECF, une mesure du niveau d'adhérence est indispensable. La profondeur de la texture est définie comme la distance entre la surface du revêtement et le plan passant par le sommet des trois plus hautes aspérités (irrégularités sous forme de bosses généralement) d'une aire qui a le même ordre de grandeur que celle de l'interface pneumatique /chaussée. La profondeur moyenne de texture dite PMT est exprimée donc par le quotient entre un volume donné du matériau et l'aire de ce matériau répandu sur une surface quasi circulaire sur la surface testée. La PMT est exprimée en millimètres (mm).

Des essais de profondeur moyenne de texture (PMT) selon la norme NF EN 13036-1, ont été prises et comparées à celles d'un chantier fabriqué avec un ECF vierge (qui a servi de référence) afin de bien identifier les aspects nécessaires qui permettent d'évaluer la réussite du chantier. L'ECF vierge a été coulé en deux couches sur une surface de 2000 m². Visuellement, les chantiers avec les ECF 50% GBR présentent un aspect visuel acceptable et identique à celui avec un ECF vierge.

Le tableau 9.2, 9.3 et 9.4 présente les différentes mesures de PMT pour la planche test, le chantier 50% GBR et le chantier 100% vierge. Les mesures ont été réalisées trois mois après la mise en œuvre des ECF recyclés.

Tableau 9.2 Tableau des mesures de PMT pour la planche d'essai

	Bande de roulement droite (en cm)	**Bande de roulement gauche (en cm)**
	14	13
	12,5	12,5
	14	11,5
	11,5	13
Moyenne des deux bandes (en cm)	12,75	
Valeur PMT	1,88	

Tableau 9.3 Tableau des mesures de PMT pour le chantier ECF 50% GBR

	Sens PR croissant	**Sens PR décroissant**
	14,0	15,0
	15,0	15,5
	15,0	14,0
Moyenne des deux bandes (en cm)	14,75	
PMT	1,42	

Tableau 9.4 Tableau des mesures de PMT pour le chantier ECF vierge

	Sens PR croissant	**Sens PR décroissant**
	20,0	16,0
	18,0	20,0
	20,0	20,0
Moyenne des deux bandes (en cm)	19,0	
PMT	0,88	

La réalisation du chantier a permis de valider la mise en œuvre avec les GBR (montée en cohésion et remise en circulation rapide), la tenue au jeune âge (pas de défauts majeurs après 3 mois de réalisation). Dans les deux cas, les chantiers ECF vierge et ECF 50% GBR présentent une bonne adhérence (bonne macrotexture).

Cependant, les résultats montrent des PMT plus élevées pour les ECF 50% GBR que les ECF vierges. Ceci peut être dû à des nombreux facteurs. En effet, plusieurs facteurs influencent la macrotexture de la chaussée. Lors du choix des constituants, la nature des granulats, leur granularité, leur angularité ainsi que la nature du liant jouent un rôle important sur la macrotexture de la chausse. De plus, le pourcentage des gravillons défini pendant la

formulation influence la macrotexture. Tous ces éléments impactent la macrotexture de la chaussée et donc influent sur le niveau d'adhérence en fonction de la météo, la vitesse et les configurations des sites (Do et al., 2013).

Donc pour le chantier expérimental d'ECF avec 50%, cette rugosité plus importante peut s'expliquer par la présence des GBR qui sont des matériaux usés et enrobés avec du bitume vieilli. Mais cette valeur reste acceptable et même jugée satisfaisante par notre partenaire industriel Probinord.

9.4 Conclusion

Le travail effectué nous a permis de démontrer, dans un premier temps, en condition réelle, la cohérence du travail de recherche. En effet, la volonté est de palier à cette déconnexion qu'il existe entre la recherche et l'opérationnel. En nous confrontant aux enjeux quotidiens, avec des équipes opérationnelles, nous avons inscrit, notre sujet au plus près des attentes des utilisateurs. Ainsi, sans prétention, mais avec la légitimité du cycle de « pilote », nos résultats de recherche ont la légitimité d'être envisagés comme une opportunité pour les entreprises.
Ce pilote doit illustrer de façon concrète, la plus-value et l'efficience de notre travail auprès des mairies et des départements, afin de promouvoir ce type de traitement innovant de surface à froid recyclée.

Dans un second temps, un suivi dans le temps des chantiers recyclés effectués permettra de mesurer le vieillissement des matériaux et leur durabilité ainsi pouvoir se positionner par rapport aux essais de vieillissement accélérés réalisés au laboratoire. Ces mesures en conditions réelles permettront de vérifier ou pas la bonne durabilité de l'ECF recyclé par rapport au neuf. Au vu des résultats positifs et encourageants, nous pouvons d'ores et déjà envisager de challenger nos résultats lors d'un nouveau chantier avec des dimensions plus importantes et des pourcentages de GBR plus élevés.

CHAPITRE 10

ANALYSE DES CYCLES DE VIE DES ECF SANS ET AVEC GBR-COMPARASION AVEC DES TECHNIQUES CONCURRENTIELLES

10.1 Introduction

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est devenue une priorité majeure au niveau planétaire. Elle était l'objectif principal de la COP21 (21ème Conférence des Parties (COP 21, 2015)). Un accord international applicable à tous les pays a été validé par tous les participants avec comme objectif la limitation du réchauffement mondial d'ici 2100 (COP 21, 2015). Cet accord, associé à la loi du Grenelle de l'Environnement d'Octobre 2008, permet de faire le lien entre la croissance économique et la protection environnementale et planifie les jalons du développement durable dans la société (CEV, 2009).

Il existe plusieurs solutions pour lutter contre le réchauffement climatique. Dans le domaine de la construction routière, des alternatives techniques de plus en plus pertinentes peuvent être appliquées dans le but de répondre aux politiques environnementales. Deux voies principales majeures sont la réduction des températures de fabrication des enrobés bitumineux (telle que pratiquée dans la technique des enrobés coulés à froid : ECF) et l'économie de matériaux naturels neufs par des techniques de recyclage.

Le développement des matériaux coulés à froid connait actuellement un nouvel essor lié à la conjoncture économique qui en fait une technique peu chère d'entretien et donc intéressante. Par ailleurs, les ECF présentent l'avantage de se fabriquer en place et à froid ce qui permet de mettre en avant son intérêt environnemental. L'utilisation de matériaux recyclés, si la performance du matériau est validée, pourrait permettre de diminuer encore cet impact. Il semble cependant important de chiffrer réellement cet impact environnemental de l'ECF avec des données objectives.

Des outils ont été développés afin de mesurer les impacts environnementaux liés à la construction routière, permettant de réaliser partiellement une « analyse du cycle de vie (ACV) ». Cette ACV des chaussées est partielle, car elle ne considère pas la phase de vie de la structure, mais s'arrête à la phase de mise en œuvre ; elle permet de quantifier l'impact environnemental de façon objective, moyennant quelques précautions. L'ACV devient un vrai sujet d'actualité. En effet, il a été annoncé qu'entre les années 1996 et 2009, 32 analyses (ACV) sur les chaussées ont été publiées (CIRAIG, 2009) . Certaines études ont souligné l'importance d'inclure, outre les paramètres classiques utilisés (décrits ci-après) des nouveaux paramètres tels que l'albédo, traduisant le pouvoir réfléchissant en fonction du matériau, l'éclairage de la chaussée, l'interaction véhicule-chaussée (Bitume Québec, 2010c; Trupia et al., 2017).

Ce chapitre vise à évaluer l'ACV partielle des ECF vierges et des ECF fabriqués avec les GBR comparativement à une technique concurrente d'entretien des chaussées. Cette étude est réalisée dans un contexte bien précis, défini par notre partenaire industriel Probinord, qui nous a fourni toutes les données d'entrée nécessaires pour l'ACV et avec un outil développé par la profession routière française.

10.2 Contexte et objectifs

10.2.1 Probinord, l'entreprise et son ECF

Probinord est une entreprise spécialiste des travaux routiers depuis plus de 30 ans. Elle intervient partout en France. Elle offre une gamme de choix de solutions à ses clients dans le domaine de l'entretien et de la rénovation des routes avec en plus une spécialisation dans les techniques d'ECF, Enrobés Coulés à Froid (ECF). Rappelons que l'ECF est un mélange de granulats, d'émulsion de bitume, de régulateur de rupture et d'additifs.

Afin d'assurer la réalisation des travaux, l'entreprise dispose d'un parc matériel répondant aux besoins matériels du chantier. Elle possède ainsi 11 ateliers mobiles et une unique usine de production d'émulsion de bitume (Figure 10.1) implantée à Étampes en Île-de-France (Essonne France) et distribuant tous les chantiers de Probinord sur le territoire français.



Figure 10.1 Usine de liant Probinord située à Méréville –France

10.2.2 Les objectifs de l'étude

Il s'agit de chiffrer l'impact environnemental des ECF fabriqués avec ou sans matériaux recyclés (GBR) et de les comparer à travers une analyse de cycle de vie partielle de ces produits, d'une part entre eux, mais aussi avec une technique concurrente. Le projet est mené dans le contexte spécifique de Probinord caractérisé par une seule usine de fabrication d'émulsion située en région parisienne, des granulats sélectionnés pour leur performance au plus près du chantier, une équipe de mise en œuvre se déplaçant de la région parisienne avec son matériel spécifique au plus près du chantier. Ce travail a pour but de permettre de quantifier l'impact environnemental de cette technique afin de justifier, si besoin, aux maitres d'ouvrages la méthode des ECF avec des éléments chiffrés de son impact environnemental.

10.3 Présentation des principaux outils et paramètres

Après une brève présentation des techniques concurrentielles utilisées et la démarche ACV, tous les paramètres nécessaires pour la réalisation de l'analyse de cycle de vie d'un produit sont définis.

10.3.1 Béton bitumineux très mince (BBTM)

Les BBTM sont les enrobés les plus minces appartenant à la famille des bétons bitumineux pour couches de roulement, normalisés en France et en Europe par la norme NF EN 13108-2. Ce sont des enrobés 0/10 ou 0/6 présentant une discontinuité bien marquée et un dosage en granulats 0/2 assez faible (de 20 à 30%). Le liant est très souvent un bitume modifié par des polymères. L'épaisseur moyenne est de 2,0 à 3,0 cm. Les BBTM ont pour objectif essentiel de conférer à la surface de la chaussée des propriétés d'adhérence, d'étanchéité, mais également, si nécessaire, des propriétés acoustiques ou photométriques (Brosseaud, Abadie et Legonin, 1997). La technique des BBTM tend à devenir la plus utilisée pour l'entretien des chaussées à trafic important et lourd élevé. Ce sera la technique de comparaison pour cette étude.

La technique similaire au BBTM est connue sous d'ETM-10 au Canada et plus précisément au Québec. L'ETM-10 est un enrobé de couche de surface très mince dont sa granulométrie varie entre 0 et 100mm avec une discontinuité entre les tamis 2,5 et 5 mm. Ce type d'enrobé est destiné à apporter de l'adhérence et améliorer la résistance à l'orniérage. De plus, l'ETM 10 permet de réduire la projection d'eau et offre une meilleure absorption acoustique. Cette technique très économique peut être utilisée en construction ou en entretien des chaussées.

10.3.2 Analyse de cycle de vie (ACV)

L'ACV est un processus défini et encadré par les normes NF EN ISO 14040 (Analyse du cycle de vie- principe et cadre) et ISO 14044 (Analyse du cycle de vie, Exigences et lignes directrices) qui précisent que « L'ACV traite les aspects environnementaux et les impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie d'un produit, de l'acquisition des

matières premières à sa production, son utilisation, son traitement en fin de vie, son recyclage et sa mise au rebut ». Elle traite des aspects et impacts environnementaux pendant le cycle de vie du produit en modélisant les flux en contact avec ce produit pendant durant sa vie. Elle se réalise en 4 étapes selon les normes ISO 14040 et 14044. Elles sont indépendantes, mais toutes reliées par une phase d'interprétation, comme présentée sur la Figure 10.2 (NF EN 14040 et NF EN 14044).

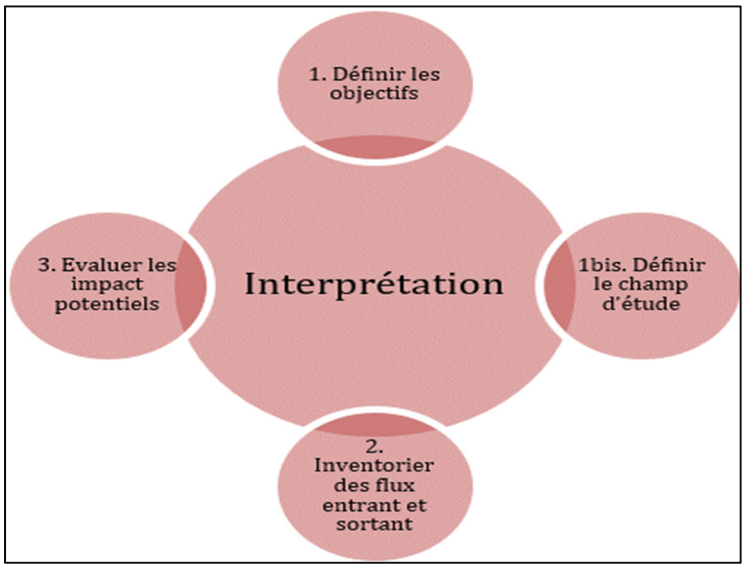


Figure 10.2 Schéma d'interprétation de l'ACV

10.3.2.1 Définition du champ de l'étude

Il s'agit de la phase pendant laquelle sont définis :

- les objectifs;
- le périmètre d'étude;
- l'unité fonctionnelle.

Il y est précisé l'application qu'il en sera fait, c'est-à-dire s'il s'agit d'une étude comparative, d'une écoconception ou d'une déclaration universelle, et qui est le destinataire de cette étude (industriel ou grand public). Les fonctions du produit y sont décrites, les frontières et limites du système étudié y sont explicitées. Dans notre cas, il s'agit d'une étude comparative.

10.3.2.2 Inventaire des flux

C'est la phase la plus importante de l'ACV. Nous distinguons les flux entrants et les flux sortants en contact avec le produit. Les flux entrants sont les matières premières utilisées pour réaliser l'ECF, l'énergie consommée par celui-ci durant son cycle de vie. Les facteurs d'activité sont mesurés avec les unités suivantes : kWh consommés, km parcourus, et tonnes transportées. Les flux sortants concernent les émissions dans l'air, l'eau et le sol ou encore la production de matières recyclées. Des facteurs d'émission sont donnés, par exemple en gramme de NOx émis dans l'air. Contrairement à la définition donnée dans les normes, pour réaliser notre analyse, nous limiterons l'étude du cycle de vie de l'ECF de l'extraction des matières premières à la fin de la mise en œuvre de l'ECF sur le chantier (Figure 10.3).

L'usage, l'entretien et la fin de vie du produit n'ont pas été pris en compte pour deux raisons principales :

- toutes les données nécessaires ne sont accessibles : en effet, chaque revêtement ECF subit un usage et un entretien différent selon le type de chantier, le trafic, les moyens alloués qui conduisent à de nombreux scénarios possibles qu'il nous est difficile d'envisager ;
- l'hypothèse suivante a été retenue : après leur mise en œuvre, les différents revêtements routiers comparés auront la même durée de vie de service. Cette hypothèse n'est naturellement pas totalement vraie, mais elle est classiquement faite dans des comparaisons environnementales menées dans la profession routière. Nous comparons donc des solutions qui techniquement sont équivalentes c'est-à-dire qu'elles répondent aux mêmes performances sur une durée de vie donnée.

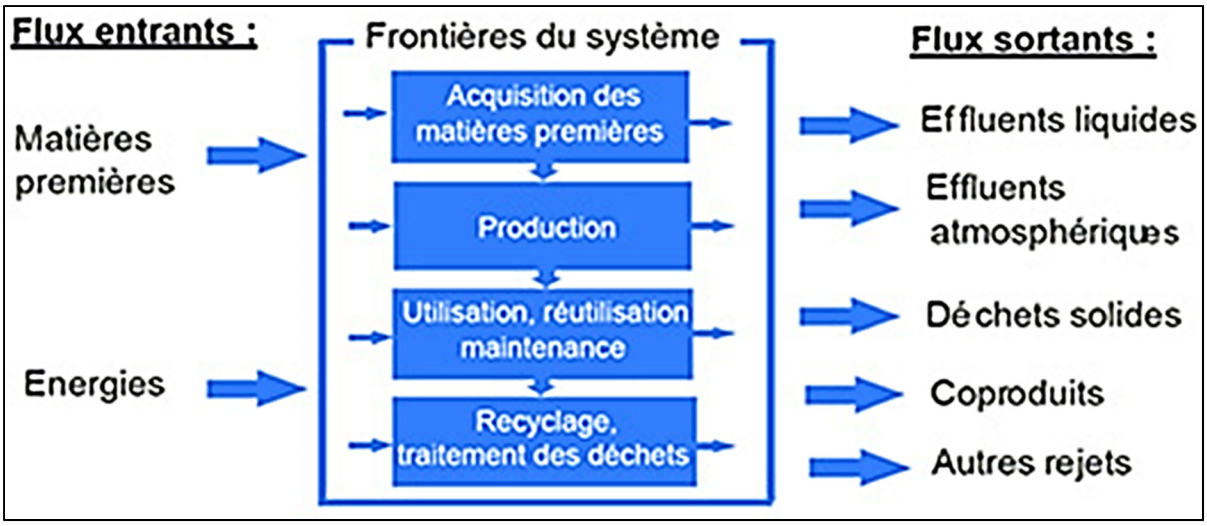


Figure 10.3 Schéma des flux.
Tirée de Université -Paul Sabatier (2012)

10.3.2.3 Évaluation des impacts

Une fois l'inventaire terminé, l'étape suivante consiste à évaluer l'ensemble des impacts environnementaux choisis pour l'étude associés à chacun des flux répertoriés dans l'inventaire. C'est pourquoi nous avons décidé de nous aider d'un comparateur environnemental reconnu, disponible et commun à l'ensemble de la profession : SEVE.

10.3.3 Le logiciel SEVE (Système d'Évaluation de Variantes Environnementales)

SEVE a été conçu en 2009 suite à la signature de la Convention d'Engagement Volontaire, par l'USIRF, Union syndicale des Industries Routières Françaises, pour avoir un même outil comparatif. Il fait l'objet d'un avis technique délivré par l'IDRRIM (CEV, 2009; IDRRIM, 2013).

Le logiciel SEVE est doté d'une bibliothèque de données (issues des entreprises du domaine routier et d'organismes extérieurs qualifiés tels qu'EcoInvent ou Eurobitume) et un comparateur. La fiabilité des données d'entrées est primordiale pour justifier de la pertinence des calculs environnementaux effectués. À partir de sa base de données, SEVE détermine

l'impact environnemental d'un produit et peut le comparer à d'autres produits. Par produit, on entend principalement une structure de chaussée complète ou partielle (une ou plusieurs couches de chaussée). Cette utilisation s'applique aussi à des techniques d'entretien techniquement équivalentes. Il est important de rappeler que la méthode est comparative, c'est-à-dire que SEVE va comparer une solution de base à une solution variante qui va être considérée comme techniquement (structurellement notamment) équivalente. SEVE quantifie et qualifie l'impact environnemental d'un produit à partir des 9 indicateurs qui sont considérés comme pertinents et primordiaux dans le domaine routier (Figure 10.4).

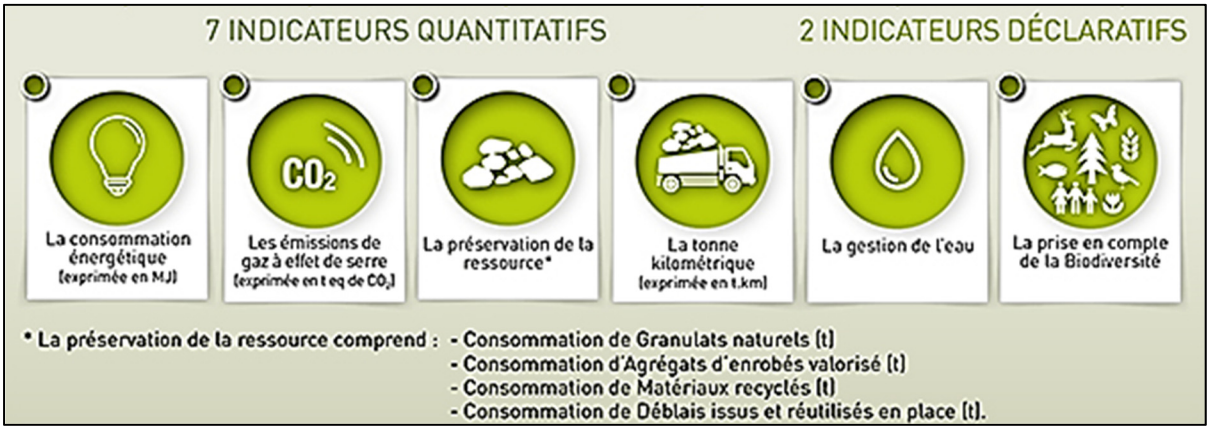


Figure 10.4 Indicateurs SEVE
Tirée de SEVE (2009)

La présente norme européenne NF EN 15804+A1 fournit les règles pour les déclarations environnementales des produits et services de construction. Dans le contexte de notre projet, seuls les indicateurs environnementaux quantitatifs de SEVE sont pris en compte, plus particulièrement, la consommation énergétique (en MJ) et les émissions de gaz à effet de serre en ($t.CO_2$), car ce sont les plus significatifs et impactant d'un point de vue environnemental dans le secteur de la construction (Figure 10.5).

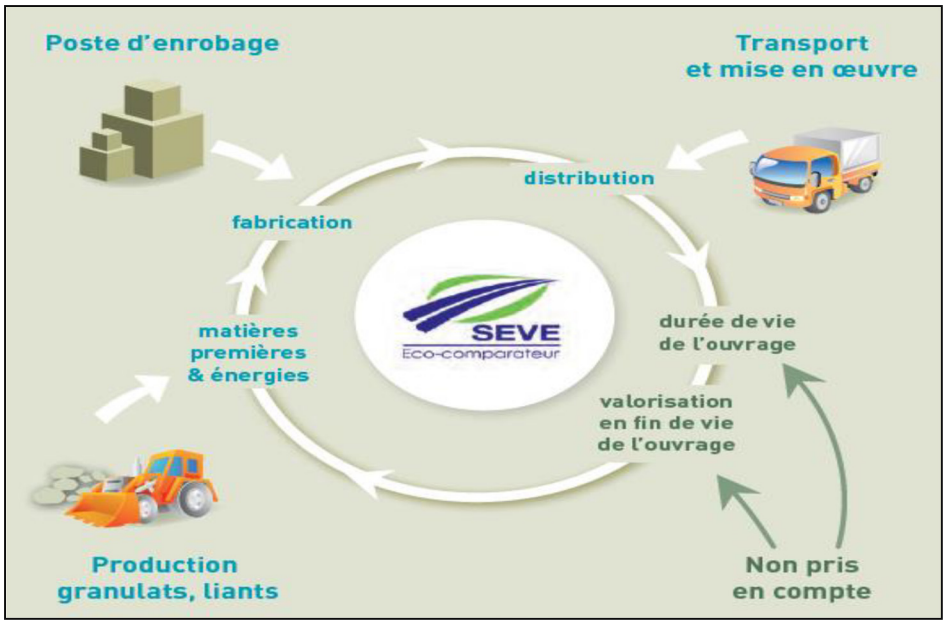


Figure 10.5 ACV partielle d'un chantier routier (frontière du système)
Tirée de SEVE (2009)

Les données d'entrées de SEVE sont validées par une agence tierce: BIOS. Elles sont en partie pondérées, notamment :

- les granulats;
- l'énergie consommée lors de la fabrication;
- le bitume.

En ce qui concerne le personnel présent sur le chantier, SEVE ne possède pas de données sous cette catégorie, mais son empreinte environnementale est prise en compte forfaitairement dans les analyses.

10.4 Comparaison environnementale des ECF et autres techniques

Très peu de publications faisant état d'une comparaison environnementale au niveau des ECF existent. Deux documents ont pu cependant être identifiés. Le premier est un tableau comparatif figurant dans une plaquette de l'entreprise française Fayat sur les ECF (Figure 10.6) (IDRRIM, 2013).

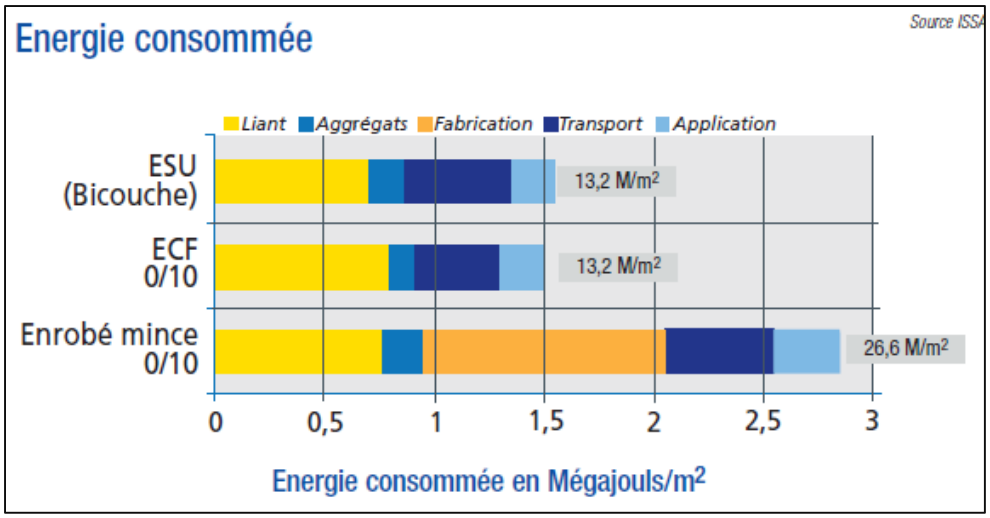


Figure 10.6 Comparaison d'énergie consommée selon différentes techniques
Tirée de IDRRIM (2013)

Le deuxième est une comparaison faite par l'entreprise Eurovia d'une solution ECF (variante) avec une solution BBTM (base) (Figure 10.7) (Autoroutes, 2016). On remarque que les auteurs ont considéré des indicateurs différents entre les deux études. Par ailleurs, les hypothèses prises en compte pour chacune des comparaisons, notamment sur le transport des produits ne sont pas précisées. Enfin, la comparaison de Fayat se fait certes avec un enduit superficiel (technique effectivement concurrente et comparable à l'ECF), mais aussi avec un BBM, béton bitumineux mince, qui s'applique en 4 cm, donc plus épais que l'ECF.

On peut cependant noter que ces deux comparaisons indiquent qu'à priori l'ECF est beaucoup moins impactant que les enrobés bitumineux considérés, en l'occurrence le BBM et le BBTM. Notre étude permettra de confirmer ou non ces conclusions.

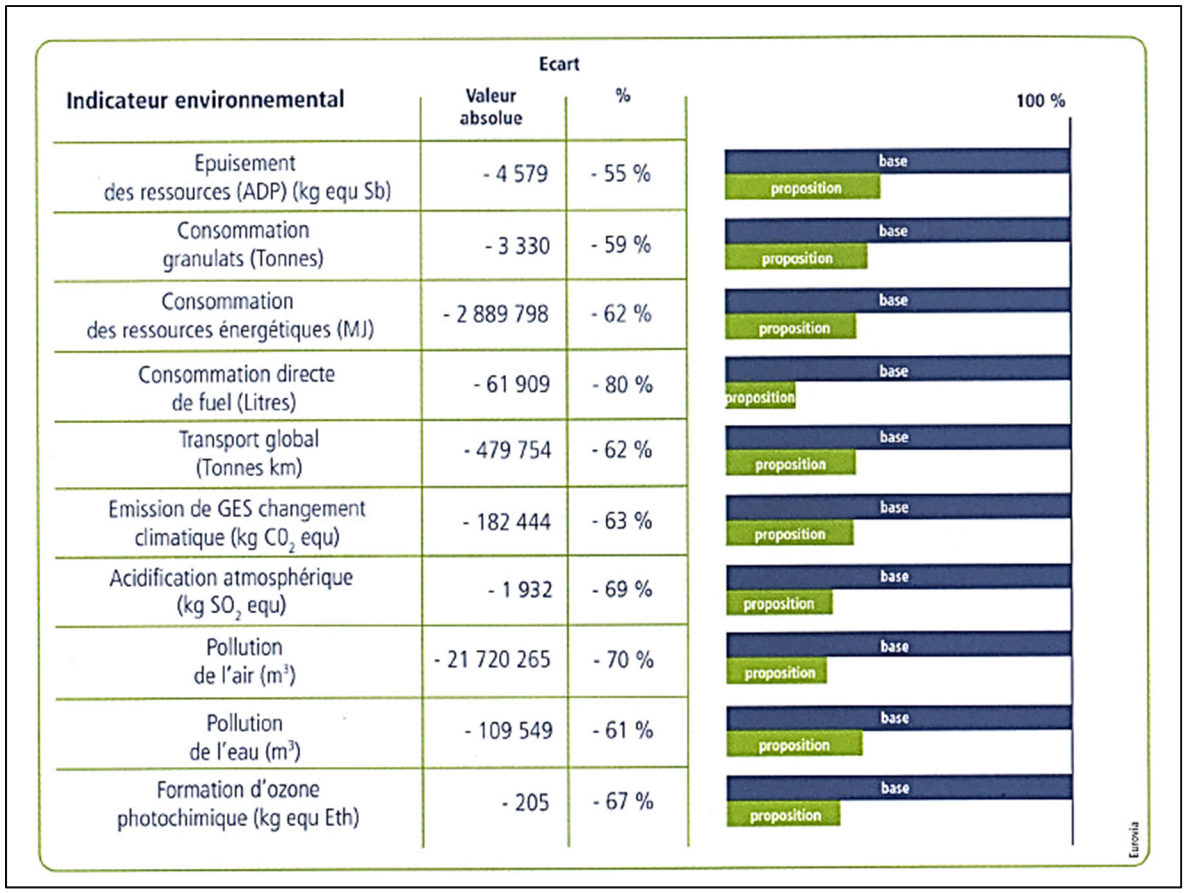


Figure 10.7 Impact environnemental d'une solution ECF par rapport à une solution BBTM
Tirée de Autoroutes (2016)

10.5 Démarche de travail

L'objectif de ce chapitre est une comparaison environnementale entre différentes techniques d'entretien, celles-ci étant l'ECF et le BBTM. Le logiciel SEVE a été défini comme outil de calcul. Il est donc nécessaire de récolter les données relatives à notre étude dont SEVE a besoin. Il est indispensable également de bien préciser notre unité fonctionnelle.

10.5.1 Données de calcul

L'unité fonctionnelle choisie pour l'étude est le m^2 d'ECF :

- c'est l'unité utilisée par Probinord dans sa démarche industrielle;

- elle tient compte du résultat final, c'est à dire, de la surface totale que recouvre l'ECF une fois mis en œuvre;
- vis à vis du client et pour comparer des techniques, cette unité est la plus représentative : pour un chantier donné, le client demande un revêtement pour une surface donnée et, quelle que soit la technique, c'est toujours la même surface qui sera recouverte.

Cependant, dans le logiciel SEVE les données d'entrée de matières premières sont demandées en tonnes ; il faut donc convertir les m^2 en tonnes à partir de leur densité en tenant compte des granulats utilisés. Il est à noter que pour les ECF, Probinord utilise un dosage en kg/m^2 qui est fixe, quels que soient les granulats utilisés. Pour mener au mieux l'étude dans le cadre de l'entreprise Probinord, nous avons analysé les types de chantiers réalisés sachant que l'usine de production d'émulsion était fixe et située dans l'Essonne proche de Paris et que les granulats proviennent de la carrière la plus proche du chantier pour chacun des cas. Rappelons que les granulats utilisés dans les ECF sont sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques et que le nombre de carrières potentielles est limité.

Trois cas possibles de chantier (sur la France) ont été sélectionnés et diffèrent par leur distance à l'usine et à la carrière :

- chantier 1 en Essonne: Proche de l'usine (20 km) - éloigné de la carrière (225 km);
- chantier 2 dans le Calvados (Falaise): Éloigné de l'usine (297 km) - proche de la carrière (13 km);
- chantier 3 dans les Landes (Magescq): Loin de l'usine (660 km) - loin de la carrière (308 km).

La comparaison sera menée au niveau des ECF entre eux, mais aussi avec des BBTM. Dans le cas des BBTM, nous avons émis l'hypothèse qu'ils étaient formulés avec des granulats de la même carrière que les ECF. Les granulats pour ECF conviennent parfaitement pour des BBTM. Les données précises sont présentées dans les hypothèses. Nous avons identifié la centrale d'enrobage la plus proche du chantier pour leur réalisation.

10.5.2 Les différentes étapes de la réalisation d'ECF

Afin de prendre en compte tous les paramètres qui impactent potentiellement l'environnement, nous avons établi un synopsis retraçant le cheminement d'un ECF, de sa mise en œuvre sur le chantier à sa fabrication et donc à l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication. Un schéma simplifié figure ci-dessous (Figure 10.8).

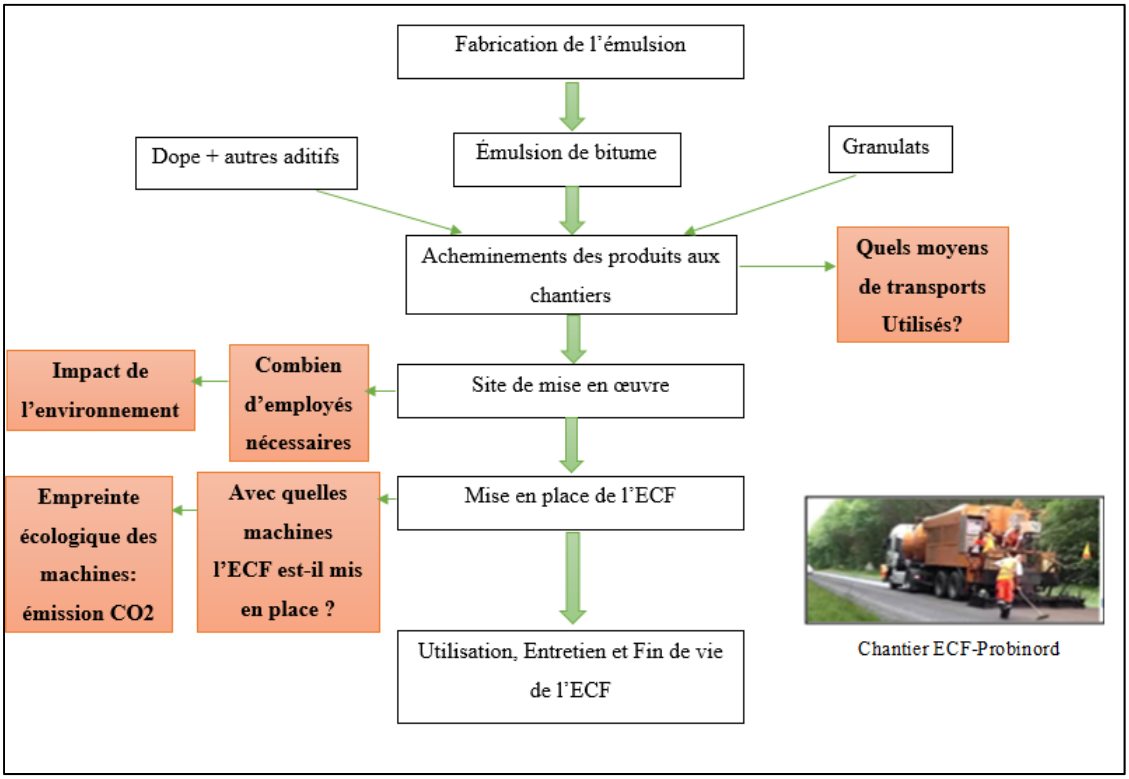


Figure 10.8 Cheminement d'un ECF

Il a été établi qu'il fallait considérer l'impact de l'acheminement des granulats de la carrière au chantier et aussi de celui de l'émulsion de bitume de l'usine de production de Probinord au chantier. La dernière phase du schéma "Utilisation, entretien et fin de vie de l'ECF" n'est pas prise en compte dans notre démarche, car son impact environnemental est très difficile à analyser et encore plus difficile à chiffrer. En outre, le logiciel SEVE s'arrête à la mise en œuvre et ne prend pas en compte cette dernière phase.

Il est nécessaire de définir avec Probinord les moyens de transport qu'ils utilisent pour leur émulsion et des granulats ainsi que de la dope et de l'eau, leur atelier de mise en œuvre classique et leur organisation de chantier en fonction des trois cas. Des données ont également été récoltées sur les consommations énergétiques au niveau de l'usine d'émulsion d'Étampes et des machines ECF de Probinord.

10.5.3 Hypothèses choisies

10.5.3.1 Données nécessaires pour SEVE

L'analyse environnementale de SEVE se base sur la comparaison d'une solution technique. Une solution peut être définie par une seule couche de chaussée ou une structure de chaussée composée de plusieurs couches.

Pour chaque solution, il convient de définir le détail des opérations en indiquant:

- les produits entrants;
- les engins;
- les produits sortants.

Il convient donc de se fixer des données précises à savoir pour un produit entrant: le type de produit/ son moyen de transport avec distance / la quantité transportée. L'atelier de mise en œuvre doit aussi être parfaitement défini (nombre de jours nécessaires pour réaliser le chantier).

10.5.3.2 Hypothèses à paramètres fixes ECF

Les hypothèses à paramètres fixes sont fournies par les matériaux et l'atelier ECF. Les quantités de matières premières et d'émulsion ont été calculées à partir de la formule d'ECF de Probinord. Elle a été établie pour une étude de laboratoire et indique donc l'eau de mouillage et les granulats secs.

Pour utiliser cette formulation dans notre cas d'étude de chantier dans SEVE :

- nous avons ajouté l'eau de mouillage aux granulats pour raisonner sur un granulat naturel humide présent sur le chantier;
- nous avons dû négliger l'impact du dope (dont son pourcentage dans la formulation es faible 0,5% ± 1), car nous ne disposions pas de données environnementales le concernant;
- nous avons utilisé la même formulation d'ECF pour tous nos chantiers. Donc, nos 3 chantiers ayant les mêmes dimensions, nous aurons la même quantité d'ECF.

Les machines ont un impact environnemental très important lors de la mise en œuvre de l'ECF. Leur consommation énergétique ne peut pas être négligée, si bien que SEVE demande comme données d'entrée les machines de l'atelier ECF mis en place sur les chantiers que nous étudions.

Probinord a fourni les caractéristiques de sa machine ECF, qui est son modèle le plus récent, et qui est sa référence. Cette machine est hors tracteur (il faudra ajouter les caractéristiques de celui-ci). Avec l'aide de l'USIRF, nous avons chiffré la consommation des machines utilisées par Probinord afin de la comparer à celle des machines de SEVE.

Dans un premier temps, nous avons utilisé les données des machines de la bibliothèque de SEVE en respectant la composition de l'atelier de mise en œuvre sur les chantiers de Probinord. Les données personnalisées de la machine ECF seront analysées dans une étude ultérieure plus détaillée.

L'atelier ECF de Probinord se compose d'une balayeuse aspiratrice, pour balayer la surface avant d'y étaler l'ECF, et d'une machine ECF, qui mélange l'émulsion avec les granulats et le dope et ensuite étale l'ECF sur la surface. Probinord n'utilise pas d'atelier de compactage sur ces chantiers, le compactage se réalisant avec la remise du trafic. De plus, il n'y a pas de balayage après la mise en place de l'ECF, car il n'y a pas de granulats détachés à balayer.
Les données d'entrées qui ont été saisies sont les suivants :

- une balayeuse aspiratrice;
- un camion 14t;

- une machine ECF.

En ce qui concerne les chantiers, 3 cas ont été considérés avec les mêmes caractéristiques. Celles-ci ont été définies avec Probinord comme représentative d'un chantier moyen:

- longueur : 1,5 km;
- largeur : 6 m;
- dosage : 20 kg/m^2 en bicouche;
- préparation du support : aucune.

L'hypothèse que le chantier d'ECF et le chantier BBTM nécessitent la même préparation de support et apportaient le même impact a été avancée ; ainsi, la variable préparation du support n'est pas considérée permettant de simplifier l'étude. Compte tenu de ces informations, les quantités de matériaux nécessaires ont été calculées et sont résumées dans le Tableau 10.1.

Tableau 10.1 Récapitulatif des quantités de matières premières nécessaires pour 455 tonnes d'ECF

Formule ECF	% massique	Pour 455T d'ECF	Type transport
Sable	82,3 %	375	camion 30t
Émulsion de bitume (60% bitume)	9,9 %	46	citerne 24t
Eau d'apport	7,2 %	33	citerne 24t
Ciment CEM II	0,6 %	1	camion 9t

10.5.3.3 Hypothèses à paramètres variables ECF

Ces hypothèses résultent des différentes localisations de nos 3 cas de chantiers sur la France. Ils sont géographiquement répartis comme ci-dessous sur la carte (Figure 10.9).



Figure 10.9 Localisation des 3 cas de chantiers

Rappelons que ces 3 cas ont été choisis, car Probinord possède une seule usine en Essonne, à Méréville (France), tandis que son activité s'exerce sur toute la France Métropolitaine. Comme nous l'avons remarqué, l'émulsion doit être transportée sur tous les chantiers que Probinord a en charge en France. L'entreprise choisit des carrières au plus proche de ses chantiers pour limiter le transport.

Cela conduit ainsi à définir les carrières suivantes :

- granulats Vignats pour les chantiers en Essonne et Calvados ;
- granulats Thiviers pour le chantier dans Les Landes.

Il est à noter que compte tenu de l'exigence des caractéristiques des granulats pour les ECF, les carrières peuvent également être éloignées du chantier, par exemple pour le cas 3, dans Les Landes avec la carrière à Thiviers à 308 km du chantier; c'est pourquoi il est vraiment important de prendre en compte le transport des granulats dans l'analyse pour bien mesurer l'impact de celui-ci par rapport à l'impact du transport de l'émulsion. Le Tableau 10.2 résume les distances prises en compte dans nos 3 cas de chantiers.

Tableau 10.2 Tableau récapitulatif des distances

Localisation chantier	Distance à l'usine Probinord (km)	Distance à la carrière Vignats (km)	Distance à la carrière Thiviers (km)
Cas 1 : Essonne	20	225	X
Cas 2 : Falaise	297	13	X
Cas 3 : Magescq	660	X	308

10.5.3.4 Hypothèses pour les BBTM

Un BBTM, béton bitumineux très mince, composé de bitume et granulats, se fabrique à chaud dans un poste d'enrobage (contrairement à l'ECF qui se fabrique in situ sur chantier). Lors de l'étude ACV, les postes d'enrobage qui sont le plus proche du chantier ont été repérés. Pour la fabrication de l'enrobé, il faut fournir du bitume venant de la raffinerie la plus proche possible des postes d'enrobage. De même, les matériaux granulaires ne sont pas transportés directement au chantier comme les ECF, mais qu'ils doivent être transportés aux postes d'enrobage et une fois le BBTM fabriqué celui-ci est transporté au chantier.

Pour les granulats, nous rappelons que nous avons choisi les mêmes carrières que celles des ECF. Normalement le niveau de qualité des granulats des BBTM peut être moins élevé que celui des ECF, et donc on peut peut-être identifier des carrières plus favorables face au transport pour les BBTM. Par simplification la même carrière a été retenue. Le Tableau 10.3 présente un récapitulatif des distances.

Tableau 10.3 Récapitulatif des distances parcourues

Chantiers	Distance usine Probinord	Carrière Vignats	Carrière Thiviers	Nom Centrale	Distance centrale / chantier	Distance carrière/centrale
Essonne	20	225	X	Colas Étampes	26	240
Falaise	297	13	X	Vignats	13	0
Magescq	660	X	340	GME labatut	41	340

L'atelier de mise en œuvre pour les BBTM est composé de :

- une épandeuse pour l'application de la couche d'accrochage (émulsion de bitume de liant résiduel 300 g/m^2);
- un atelier de mise en œuvre de moyenne cadence directement de SEVE (700 t/jour).

Les dimensions sont identiques pour les trois chantiers, mais à la différence des ECF, on n'applique pas le même dosage, mais une même épaisseur de mise en œuvre. Les matériaux des 3 chantiers ne proviennent pas de la même carrière et donc la masse volumique des granulats est variable. Des quantités variables de BBTM sont appliquées pour les différents chantiers. Les 3 cas de chantiers considérés ont les mêmes dimensions (largeur et longueur) comme dans les hypothèses des ECF dont (longueur : 1,5 km ; largeur : 6 m ; dosage : 20 kg/m^2 en bicouche ; préparation du support : aucune). Comme avec les ECF, et pour les mêmes raisons, il n'y a pas de préparation du support.

10.6 Méthode d'analyse des résultats obtenus par le logiciel SEVE

L'outil SEVE quantifie l'impact environnemental d'un produit à partir des 4 indicateurs principaux, à savoir:

- la consommation d'énergie procédée;
- les émissions de GES;

- la préservation de la ressource (scindée en 4 indicateurs);
- la tonne kilométrique.

La consommation d'énergie procédée (exprimé en MJ) représente la somme des énergies renouvelables et non renouvelables utilisées lors de la réalisation de l'ouvrage. Les émissions de GES (exprimées en tonne équivalente de CO_2) rendent compte de l'impact sur le changement climatique. Cet indicateur prend en compte les flux correspondant aux émissions des matériaux mis en œuvre, mais aussi des transports et des opérations nécessaires. L'unité utilisée, la tonne équivalente de CO_2, sert à homogénéiser les différents gaz émis par rapport à son impact en prenant comme référence l'impact du CO_2. La préservation de la ressource (exprimée par tonne) est un indicateur dédié à la comptabilisation des tonnes de matériaux consommés sur le chantier. Ce dernier permettra de mesurer les quantités de granulats naturels économisées. Tandis que la tonne kilomètre (exprimée par tonne.km) renseigne sur la quantité de transport d'une tonne sur un kilomètre. Dans un premier temps, trois indicateurs ont été retenus, à savoir la consommation d'énergie du procédé, les émissions GES et la tonne kilomètre. En effet, ces paramètres peuvent être les plus représentatifs dans le cadre de notre étude. Nous n'avons pas considéré l'indicateur préservation de la ressource parce que tenant compte des produits traités (l'ECF et le BBTM), on considère peu significatif cet indicateur (même quantité de matériaux pour tous les ECF, quantité comparable entre ECF et BBTM, pas d'utilisation de recyclés dans un premier temps). L'outil SEVE présente ses résultats en distinguant pour chaque indicateur retenu 5 étapes du cycle de vie.

Ainsi, la comparaison va être menée aux niveaux suivants :

- matériaux;
- transport en amont;
- fabrication des mélanges;
- transport chantier;
- mise en œuvre.

Les Matériaux correspondent à l'impact de la production de toutes les matières premières des produits à comparer. Le transport en amont correspond à l'impact de l'acheminement des matériaux intermédiaires jusqu'à l'unité de production (bitume de la raffinerie et granulats des carrières jusqu'à la centrale d'enrobage pour un enrobé, par exemple). La fabrication des mélanges inclut l'impact de la fabrication du produit avec l'outil de production. Le transport chantier correspond à l'impact du transport du produit fini de son lieu de production au chantier. Finalement, la mise en œuvre correspond à l'impact de celle-ci (l'impact des ateliers de mise en œuvre, par exemple). L'ECF a la particularité de se fabriquer en chantier : tous les composants (granulats, émulsion, eau, dope, ciment) sont amenés directement sur chantier, sans site de production intermédiaire, et puis mis en œuvre pour obtenir l'ECF. L'outil SEVE considère dans son niveau «Fabrication des mélanges» l'impact de la fabrication du produit en usine et non sur site. Par conséquent pour l'ECF, l'impact « Fabrication » sera pris en compte dans le niveau «Mise en œuvre». Cette particularité implique que les niveaux «Transport en amont» et «Fabrication des mélanges» apparaissent nuls pour les ECF. Par contre, le BBTM est fabriqué en usine, donc les niveaux «Transport en amont» et «Fabrication des mélanges» sont bien à prendre en compte.

Pour simplifier et pour mieux comparer l'ECF et le BBTM, nous avons regroupé le Transport en amont et le Transport chantier dans un même niveau « Transport », et la Fabrication des mélanges et la Mise en œuvre dans un autre niveau « Fabrication+ mise en œuvre ».

10.6.1 Évaluation de l'impact du transport des matériaux dans les différents cas de chantier des ECF

Pour évaluer l'impact de la distance du transport de l'émulsion venant de l'usine de Probinord, la solution ECF a été comparée sur les trois chantiers. Rappelons que sur les 3 chantiers, les mêmes quantités et les mêmes surfaces d'ECF sont fabriquées et mises en œuvre et donc a priori, on doit obtenir les mêmes impacts au niveau «Matériaux» et «Fabrication et mise en œuvre». La différence devrait porter donc principalement sur les différents impacts du transport. Les résultats obtenus pour les ECF et extraits de SEVE sont résumés dans les Tableaux 10.4, 10.5 et 10.

Tableau 10.4 Consommation comparée en énergie de procédé dans les 3 cas de chantier pour l'ECF (en MJ) selon SEVE

Solution	Matériaux	Transport	Fabrication + mise en œuvre	Total
ECF Essonne	155 190	82 474	78 021	315 687
ECF Falaise	155 190	18 465	78 021	251 678
ECF Magescq	155 190	142 177	78 021	375 389

Tableau 10.5 Émissions totales de GES dans les 3 cas de chantier pour l'ECF (en t.CO2) selon SEVE

Solution	Matériaux	Transport	Fabrication + mise en œuvre	Total
ECF Essonne	8,93	6,64	6,16	21,74
ECF Falaise	8,93	1,49	6,16	16,58
ECF Magescq	8,93	11,45	6,16	26,55

Tableau 10.6 Tonnes kilomètres (t.km) dans les 3 cas de chantier selon SEVE

Solution	Total
ECF Essonne	93 225,0
ECF Falaise	18 907,0
ECF Magescq	158 225,0

10.6.1.1 Influence du transport des matériaux sur l'impact environnemental

Pour interpréter les résultats, nous avons tracé des histogrammes correspondant à chaque indicateur de SEVE. Ces histogrammes regroupent les niveaux comme nous avons déjà expliqué. Les figures 10.10 et 10.11 montrent que, comme attendu, les consommations

d'énergie et les émissions de GES sont identiques pour les 3 chantiers, au niveau des matériaux et de la mise en œuvre, mais sont différentes au niveau du *transport* en fonction des chantiers. Premièrement, on constate que le chantier le plus impactant est le chantier de Magescq, ce qui est normal compte tenu que c'est le chantier le plus éloigné de l'usine et de sa carrière. Le chantier d'Essonne est le plus impactant, malgré la proximité de l'usine. En effet, l'impact est beaucoup plus élevé que celui de Falaise (qui est 10 fois plus éloigné de l'usine que celui d'Essonne). Si nous regardons la distance à la carrière, le chantier de Falaise est beaucoup plus proche de Vignats que le chantier d'Essonne.

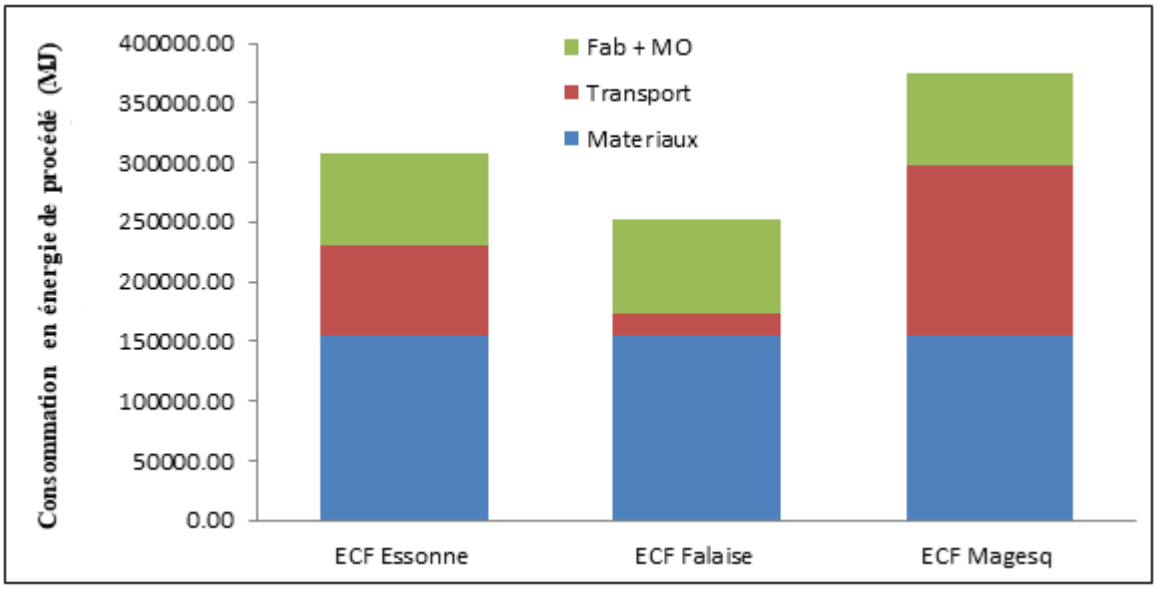


Figure 10.10 Consommations comparées en énergie de procédé (en MJ) d'ECF dans les 3 cas de chantier selon SEVE

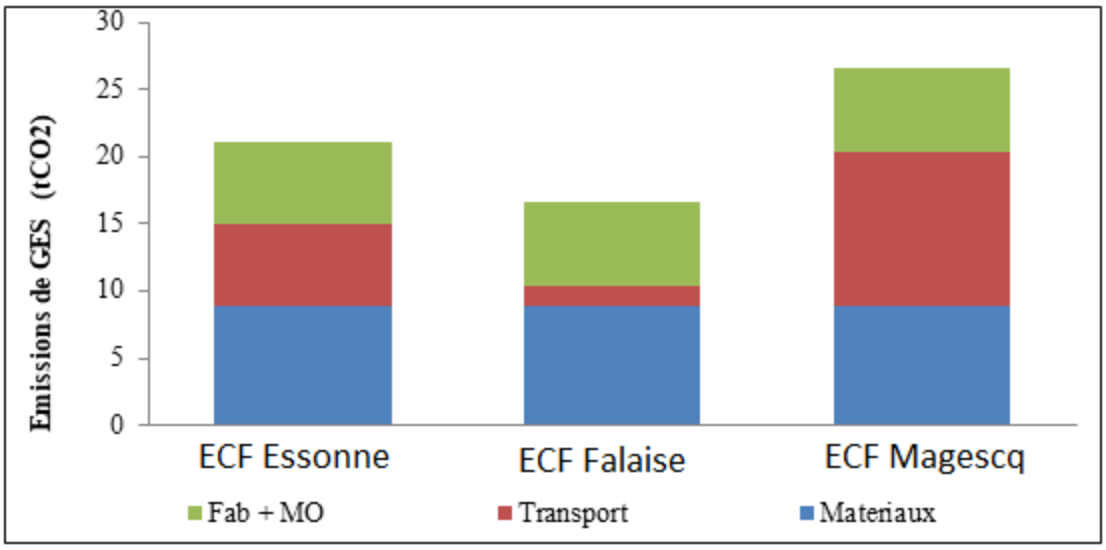


Figure 10.11 Émissions de GES comparées selon SEVE

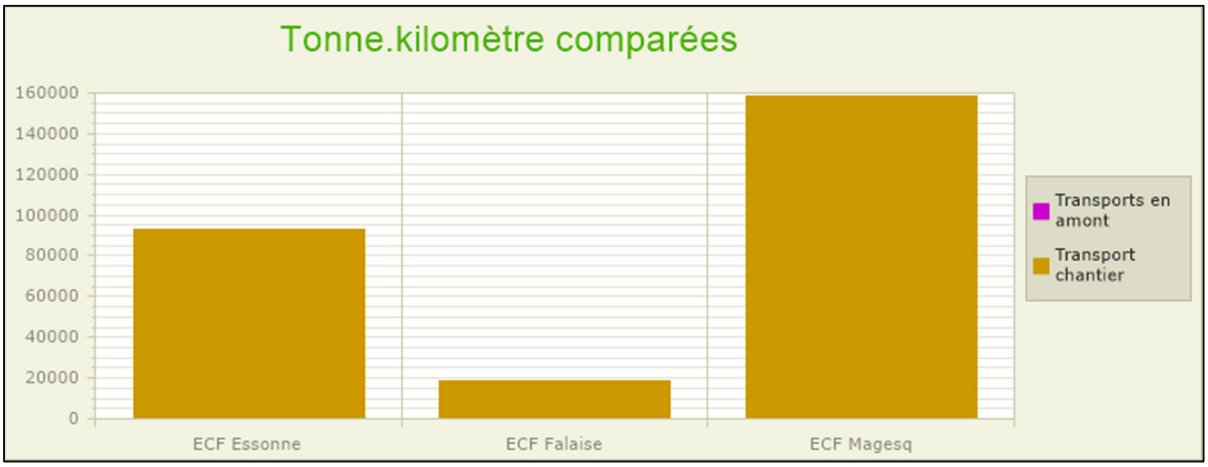


Figure 10.12 Tonnes kilomètres (t.km) selon SEVE

La Figure 10.12 (tonne-kilométrique) est naturellement la plus explicite: l'indicateur est la tonne-kilomètre; les chantiers étudiés sont réalisés avec la même quantité de matériaux et Magesq dans les Landes est celui qui est le plus loin de l'usine de liant, mais aussi de la centrale d'enrobage.

L'impact du transport émulsion par rapport au transport granulats peut être calculé. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 10.7).

Tableau 10.7 Comparaison quantificative de l'impact du transport de l'émulsion par rapport à celui des granulats

	Part transport émulsion sur (1) et (2)	**Part transport granulats**	**Part émulsion sur Total (1) et (2)**	**Part émulsion sur Total (2)**
Chantier Essonne	11%	89%	2,8%	3,3%
Chantier Falaise	77%	23%	6,1%	7,6%
Chantier Magescq	22%	78%	8,3%	9,4%

(1) Consommation d'énergie ; (2) GES.

On constate bien sûr que le transport « émulsion » joue plus sur le transport global dans le cas de Falaise, car les matériaux granulaires sont proches du chantier. Par contre, si on calcule l'impact du transport émulsion seul sur les deux indicateurs choisis, on note un impact maximal de 10%. On peut alors conclure que l'impact du transport des granulats est beaucoup plus élevé que celui de l'émulsion. Cela n'est pas étonnant, car on transporte beaucoup plus de tonnes de granulats que d'émulsion.

10.6.2 Comparaison des ECF avec les BBTM

Lors de l'étude ACV, les ECF ont été comparés avec une autre technique d'entretien de chaussées. Cette technique est le Béton Bitumineux Très Mince (BBTM), présenté dans la partie bibliographique et qui a des caractéristiques techniques comparables à celles des ECF (rugosité et imperméabilité de la chaussée) ce qui en fait en pratique des techniques concurrentielles. Cette comparaison permettra de mesurer la différence de l'impact environnemental de ces deux techniques et de positionner ainsi l'ECF. Les hypothèses sur les BBTM ont été présentées précédemment.

10.6.2.1 Comparaison ECF avec les BBTM classiques : interprétation des résultats

La première étape a consisté en une comparaison des ECF avec les BBTM les plus courants, que l'outil SEVE appelle BBTM Classiques (fabriqués à chaud aux alentours de 180ºC) (Brosseaud, Abadie et Legonin, 1997). À priori, c'est cette caractéristique qui impliquera un impact environnemental des BBTM plus élevé que celui des ECF. Ensuite, on a chiffré cette différence avec l'outil SEVE. Les résultats obtenus du calcul de la comparaison entre ECF et BBTM sont présentés par histogrammes (Figures 10.13, 10.14 et 10.15) afin de mieux les interpréter.

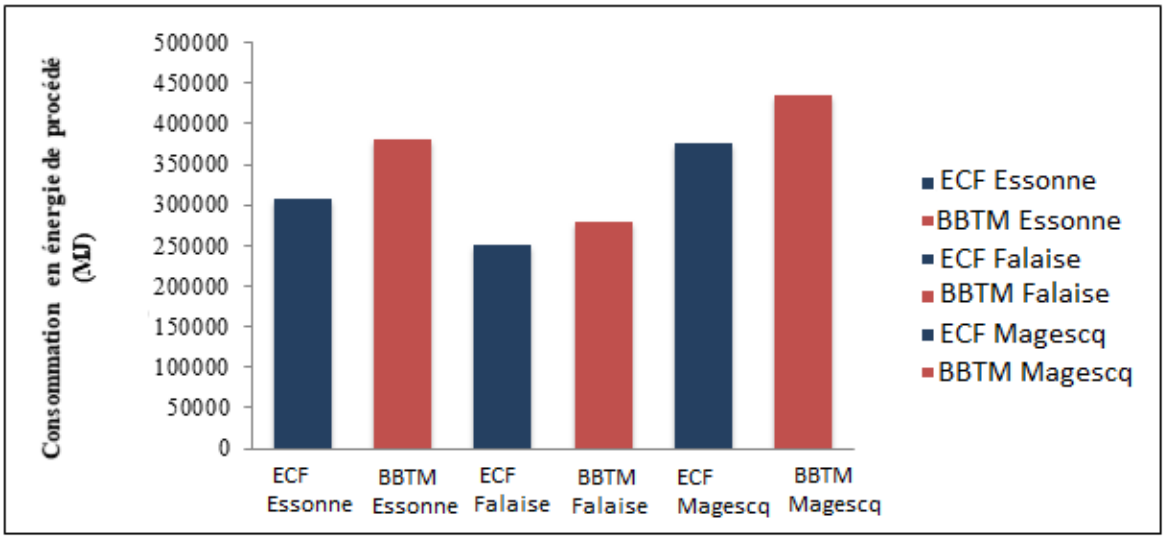


Figure 10.13 Consommation comparée en énergie de procédé (MJ) pour un ECF et un BBTM classique dans les 3 cas de chantier

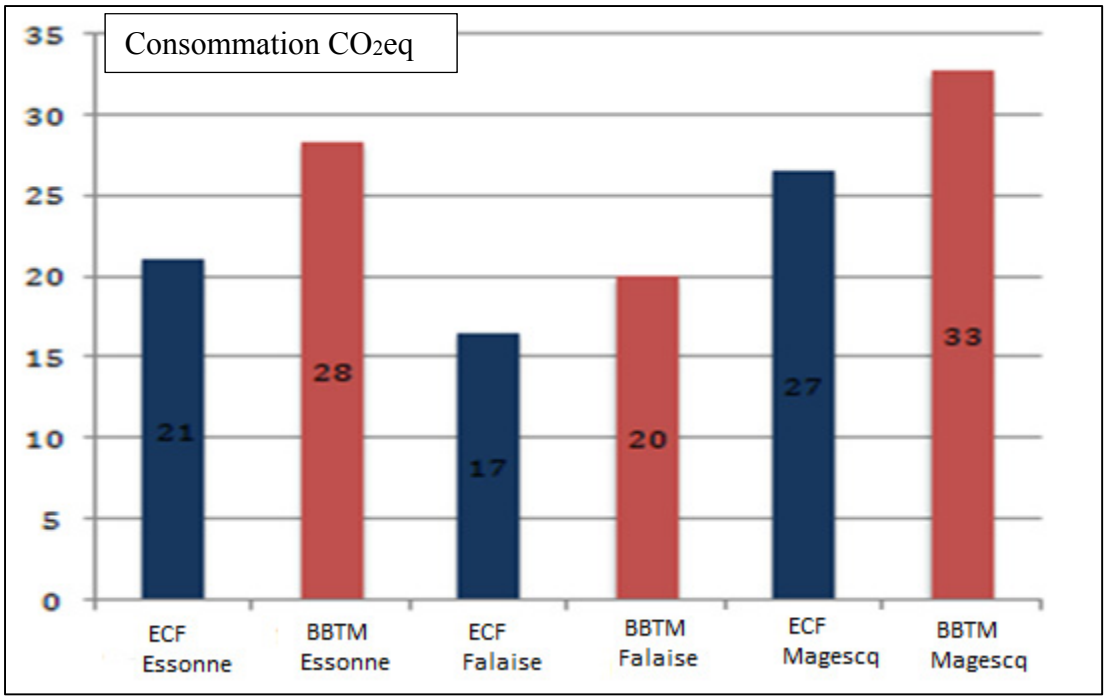


Figure 10.14 Émissions totales de GES pour un ECF et un BBTM classiques dans les 3 cas de chantier

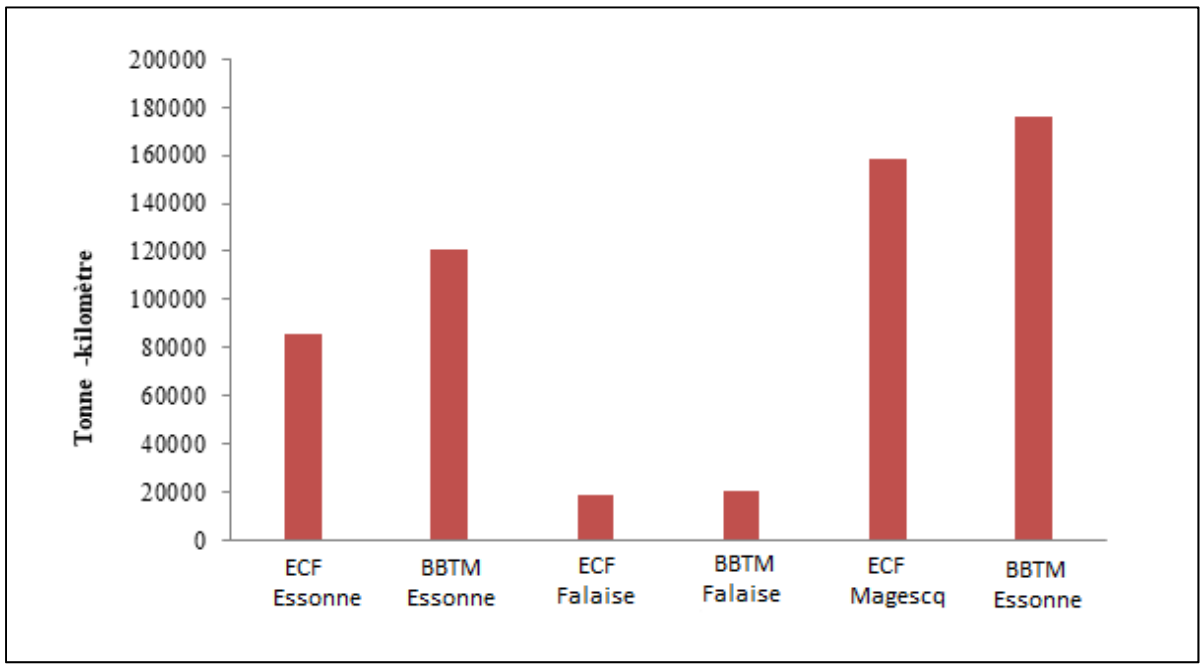


Figure 10.15 Tonne kilomètre pour l'ECF et le BBTM dans les 3 cas de chantiers selon SEVE

On constate que pour tous les chantiers, l'ECF reste moins impactant que le BBTM sur les trois critères retenus. Cela s'explique par la différence de fabrication, à chaud du BBTM, par rapport à froid de l'ECF. Par ailleurs, pour le BBTM les matériaux doivent être amenés au poste d'enrobage et puis au chantier, équilibrant ainsi l'avantage que les BBTM avaient sur les ECF (qui doivent amener leur émulsion de l'usine de Probinord, sur des distances plus élevé mais des quantités moindres). Le cas de chantier où la différence d'impact est la plus faible est Falaise. C'est aussi le cas où l'impact de la distance est le moins important. Dans ce cas précis, la différence des impacts est liée principalement à la fabrication des mélanges.

10.6.2.2 Comparaison des ECF avec BBTM tièdes : analyse des résultats

Les BBTM Tièdes sont des BBTM classiques qui sont fabriqués à températures plus basses (entre 100 et 150ºC) moyennant l'utilisation d'un additif ou procédé spécifique. Pour la comparaison de l'impact du BBTM tiède par rapport à celui du BBTM classique et de l'ECF, on s'intéressera au cas de Falaise, car c'est le cas où la différence d'impact entre le BBTM classique et l'ECF est la plus faible. Il faut noter que même si théoriquement les BBTM Tièdes sont plus intéressants d'un point de vue environnemental, en pratique ils sont plus complexes à fabriquer que les Classiques. Dans le cas d'étude, aucun additif n'a été considéré dans l'enrobé tiède et on a agi uniquement sur la température (ce qui minimise l'impact du tiède). On utilise les Figure 10.16 et 10.17 pour interpréter les résultats, où on a ajouté aussi le BBTM classique de Falaise pour mieux analyser l'impact du BBTM tiède.

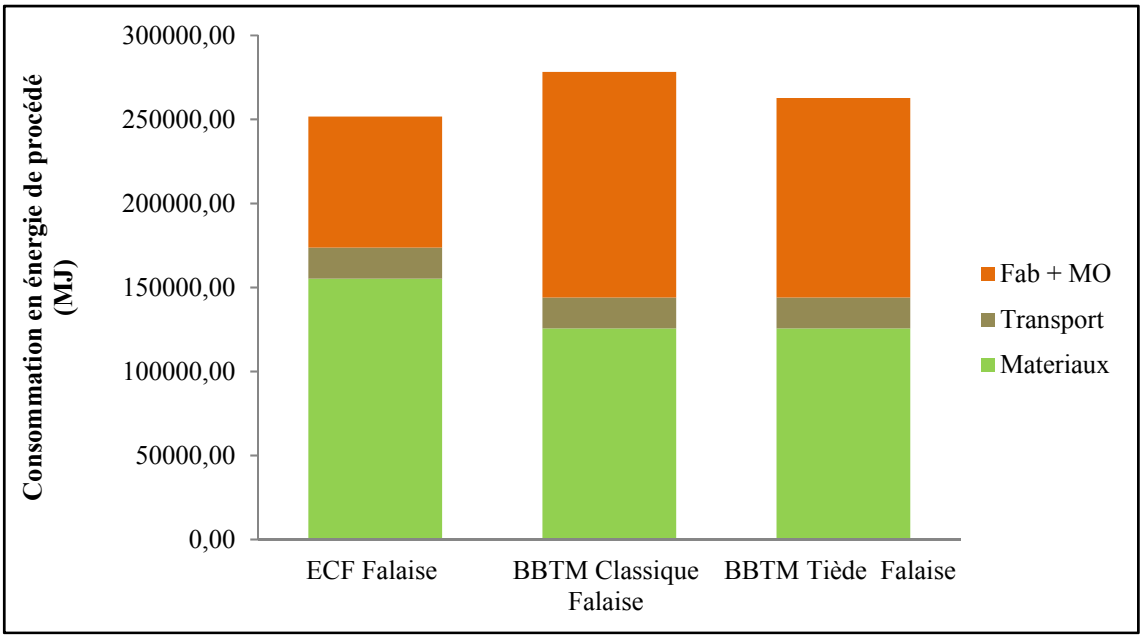


Figure 10.16 Consommation comparée en énergie de procédé pour l'ECF, un BBTM classique et un BBTM tiède dans le cas de Falaise selon SEVE

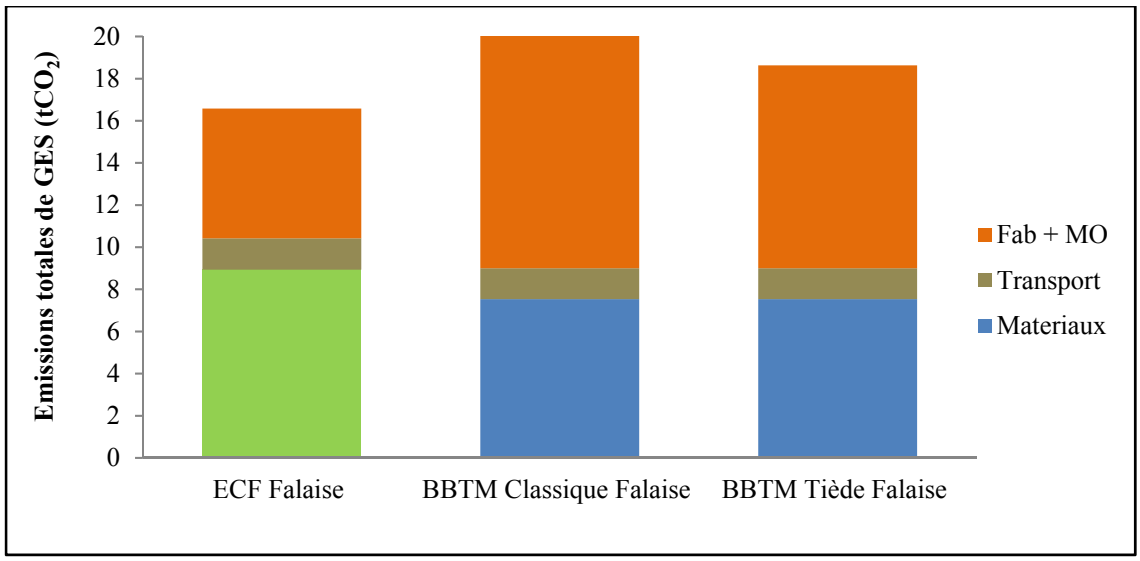


Figure 10.17 Émissions totales de GES pour l'ECF, un BBTM classique et un BBTM tiède dans le cas de Falaise selon SEVE

Sur ces deux graphiques, on peut constater que le BBTM tiède est moins impactant que le BBTM classique, mais reste plus impactant que l'ECF. Cela est dû à la baisse de l'impact dans la fabrication et mise en œuvre, car on fabrique à une température plus basse que celle des BBTM classiques. Par contre par rapport au transport, les BBTM tièdes ou chaud ne varient pas, ce facteur est très significatif, car c'est le transport des granulats qui implique les plus grandes variations. La baisse de température de fabrication des BBTM qu'on propose (120°C) ne suffit pas pour être moins impactant que l'ECF, et on peut conclure que les BBTM pourront éventuellement être moins impactant si les granulats viennent d'une carrière plus proche que les granulats des ECF. Il faut remarquer les hypothèses sur les carrières que nous avions prises ne sont pas toujours réalistes : il n'est pas impossible de trouver une carrière pour les BBTM mieux située que celle des ECF, car le BBTM a besoin de granulats moins performants que ceux des ECF. En conclusion, on peut dire qu'avec la technique du BBTM tiède les différences avec l'ECF diminuent, mais l'ECF reste encore plus écologique vis-à-vis des trois indicateurs étudies (consommations en énergie de procédé, Émissions totales de GES et la tonne kilomètre).

10.6.3 Synthèse de l'analyse basée sur les données de l'outil SEVE

Probinord propose à ses clients des ECF fabriqués avec des émulsions provenant d'une seule et même usine située en Ile de France. L'impact environnemental lié au transport parfois important de cette émulsion a été estimé dans ce chapitre, au travers de trois cas de chantiers, et comparé avec une autre technique d'entretien. Des hypothèses sur la provenance identique des granulats d'ECF et de BBTM ont été faites initialement. Au niveau des ECF seuls, il ressort que cet impact correspond de 11% (pour les chantiers avec granulats éloignés du chantier) à 77% (pour les granulats proches du chantier) de la part environnementale « transport » du chantier par rapport aux granulats. Cependant, dans tous les cas, l'impact « transport de l'émulsion » correspond au maximum à 10% de l'impact environnemental total du chantier tant en consommation d'énergie qu'en GES.

Comparativement au BBTM, sans les trois cas de chantier étudiés, l'ECF consomme systématiquement moins d'énergie et produit moins de gaz effet serre, même dans le du chantier de Falaise pour lequel les granulats sont très proches du chantier. La fabrication à chaud des enrobés est un facteur prédominant. Par ailleurs, au niveau transport, celui des granulats a le poids le plus important, car le transport d'émulsion impacte beaucoup moins grâce à un tonnage beaucoup plus faible.

Les granulats des BBTM doivent être amenés au poste d'enrobage pour fabriquer le BBTM, qui est ensuite transporté sur chantier, ce qui est plus impactant que pour l'ECF dont les granulats arrivent directement au chantier. Cependant, les granulats des BBTM peuvent être d'une qualité autre que celle de l'ECF, donc la carrière des BBTM normalement se situera plus proche que celle de l'ECF, point ne qui pourrait être approfondi.

Cette étude a été faite avec des données validées par SEVE. À partir des consommations réelles de l’usine de Probinord et sur ses machines d’ECF, une personnalisation de cette étude pourrait être menée.

10.7 Etude basée sur les données Probinord

Ayant comparé les ECF avec les BBTM avec des hypothèses qui n'étaient pas exhaustives par rapport au contexte de Probinord, les hypothèses de calcul ont été actualisées pour mieux caractériser ce scénario par rapport à la problématique de l'entreprise. L’actualisation des données consiste en une intégration des spécifications de la machine ECF employée par l’entreprise Probinord ainsi que le changement de carrière dans le cas du chantier Magescq pour les BBTM.

10.7.1 Actualisation des données

10.7.1.1 Introduction des données de la machine ECF de Probinord

Comme mentionné auparavant, lors de la première étude ACV, le matériel utilisé sont ceux existants par défaut dans l'outil SEVE telle que la machine de fabrication des ECF. Désormais, pour mieux adapter le scenario aux besoins de Probinord, les données brutes de la machine ECF de Probinord ont été prises en considération dans cette partie. Le tableau 10.8 présente la grille des consommations des différentes machines ECF (machine ECF par défaut dans l'outil SEVE et machine ECF de Probinord).

Tableau 10.8 Table avec les consommations de la machine ECF de SEVE et la machine ECF de Probinord

Machines	**TOTAL (par heure d'utilisation)**		**TOTAL (par jour d'utilisation)**	
	ENERGIE (MJ/heure)	CO2 (TCO2eq)	ENERGIE (MJ/jour)	CO2 (TCO2eq)
Machine ECF (SEVE)	1784	0,1398	12485	0,9785
Machine ECF (Probinord)	560	0,0425	4482	0,3403
Machine ECF (Probinord)	560	0,0425	6723	0,5104

Selon les données fournies, on constate en comparant les paramètres des machines, un facteur de 2.85 (rapport de la machine ECF de SEVE sur la machine ECF de Probinord). C'est pourquoi on a utilisé la machine ECF dans l'outil SEVE en réduisant le nombre de jours d'utilisation par le même rapport (en effet, le rapport le nombre de jours d'utilisation et la consommation énergétique et de GES de la machine est linéaire). Cette réduction est exclusivement remarquable dans la partie mise en œuvre des résultats de SEVE.

10.7.1.2 Changement de la carrière pour le chantier de Magescq

Dans cette partie, les mêmes carrières utilisées pour les ECF ont été choisies pour les BBTM. Ainsi, l'hypothèse concernant le paramètre distance plus proche du chantier BBTM a été négligée. Ce changement de données dans le cadre des BBTM ne sera pas le cas le plus favorable pour ces derniers lors des comparaisons avec les ECF. En imposant que ses carrières soient les mêmes que celles de Probinord, le choix n'était pas purement environnemental, mais aussi économique, technique, etc.

Comme constaté plus haut, le transport des granulats est considéré comme l'impact le plus important dans le bilan global environnemental. Cependant, afin d'obtenir une comparaison la plus réelle possible, une brève recherche sur les exigences de la qualité des granulats pour la fabrication des BBTM a été réalisée pour voir s'elles étaient plus ou moins exigeantes que ceux des ECF. Il s'est avéré que les mêmes exigences sont demandées pour les deux techniques. Suite à ces données, une carrière plus performante au point de vue environnemental pour les BBTM a été fixée afin de représenter un scénario plus réaliste.

On a laissé les carrières des ECF fixées à cause qu'elles font partie du scénario fourni par Probinord :

- cas d'Essonne : la carrière d'ECF provient du Calvados (Vignats), car on n'a pas de carrières en Île-de-France. Pareillement, les carrières pour les Vignats BBTM devraient être dehors de l'Île-de-France, donc que c'est inutile de chercher une carrière exclusivement pour les BBTM en tenant compte que la différence de distance entre celle-ci et celle des ECF sera négligeable. La carrière de Vignats a été préservée pour les BBTM dans le cas d'Essonne;
- cas de Falaise : étant donné que la carrière soit très proche du chantier, ce cas de figure est favorable pour les BBTM. De plus, c'est une carrière utilisée par Probinord pour la fabrication des ECF;
- cas de Magescq: C'est dans ce cas où on se rend compte que la distance entre la carrière des ECF, située à Thiviers, et le chantier de Magescq est très grande (340 km). Il est donc

possible de trouver une carrière plus favorable environnementalement pour les BBTM. Nous avons pu identifier une carrière de SEMEX à Labatut, proche de la centrale d'enrobage des BBTM qu'on utilise pour comparer avec les ECF, et qui vérifie les exigences de la norme pour la qualité des granulats. Ainsi, on élimine la distance entre la carrière pour les granulats des BBTM et la centrale d'enrobage (nommée *Transport en Amont* dans l'outil SEVE).

10.7.2 Interprétation des résultats avec les données actualisées

Afin de mieux traduire les résultats, les Figure 10.18, 10.19 et 10.20 ont été tracés pour interpréter les résultats.

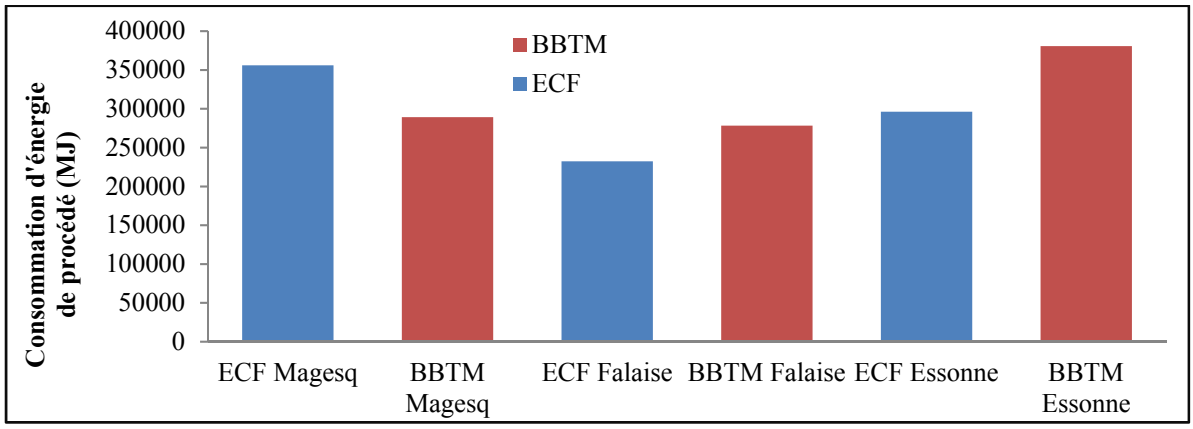


Figure 10.18 Consommation comparée d'énergie de procédé de l'ECF et d'un BBTM dans les trois cas de chantier (en MJ) selon SEVE

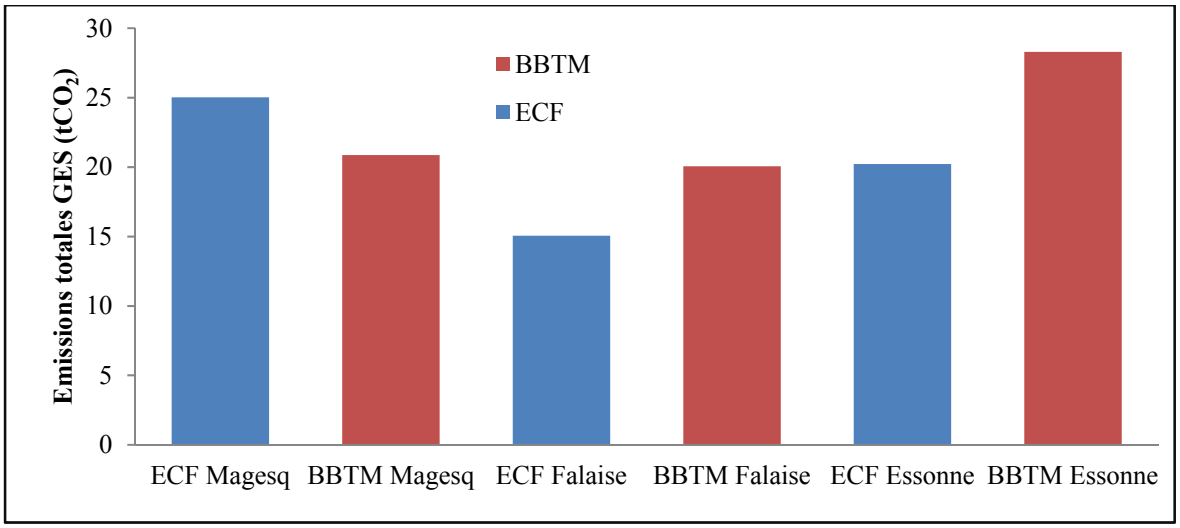


Figure 10.19 Émissions totales comparées de l'ECF et d'un BBTM classique dans les trois cas de chantier (en t.CO2) selon SEVE

Sachant que la seule carrière des BBTM remplacée est celle de Magescq, les résultats montrent que l'ECF reste moins impactant que le BBTM aux cas de Falaise et Essonne, avec, des différences plus marquées dans le cas de Falaise, après l'ajout des données brutes de la machine ECF de Probinord l'ECF. Cependant, pour cas du chantier de Magescq, les résultats montrent que la technique des BBTM devient plus écologique que la technique des ECF (même avec les données personnalisées pour la machine de fabrication des ECF ne compense pas le changement de carrière). Le graphique 10.20 montre l'impact du transport des matières lors du calcul environnemental lors de l'ACV.

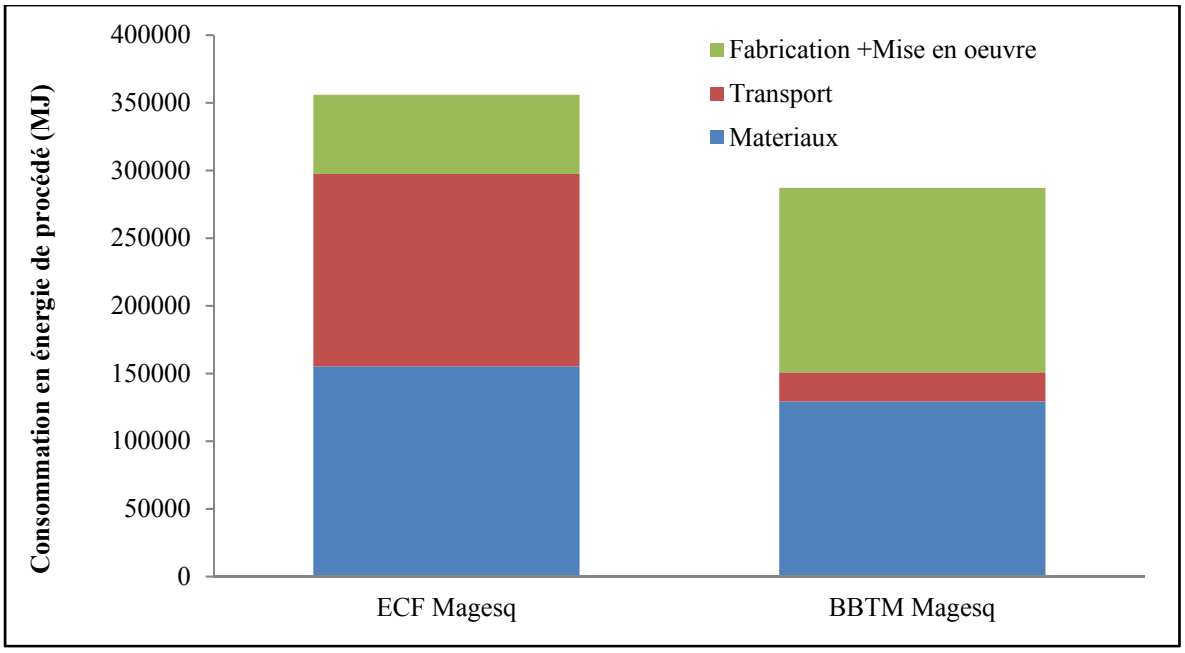


Figure 10.20 Consommation comparée en énergie procédé de l'ECF et d'un BBTM classique dans le cas de Magescq (en MJ) selon SEVE

Même si l'impact de la fabrication et la mise en œuvre des BBTM sont beaucoup plus élevées que celles des ECF, le transport reste un facteur déterminant dans le bilan global. Même si selon la norme, les mêmes exigences des granulats sont imposées pour les ECF et les BBTM, d'autres facteurs peuvent influencer la décision de Probinord pour le choix de la carrière (prendre la carrière de Thiviers et pas celle de Labatut) tels que la compatibilité de leur formule ECF avec une certaine classe de granulats et des dispositions logistiques par rapport aux autres chantiers de la zone. De point de vue économique, une première approximation des prix a été abordée qui a permis de souligner la différence de coût entre la carrière de Thiviers et la nouvelle carrière de Labatut en prenant en considération l'écart de distance, le prix du combustible et les péages. Ce calcul a montré qu'il serait beaucoup plus rentable d'utiliser les granulats issus de la carrière Labatut pour un chantier situé proche de la zone Magescq.

10.8 Introduction des GBR dans les ECF

L'objectif de cette partie est de chiffrer l'impact environnemental de l'incorporation des GBR dans la formule des ECF. Différents pourcentages de GBR ont été introduits progressivement dans la formule de l'ECF lors du calcul è l'aide de l'outil SEVE. Ceci a permis de comparer l'impact environnemental des ECF recyclés et les BBTM, et analyser ainsi l'impact des agrégats d'enrobés sur le bilan global. Les mêmes hypothèses faites pour les ECF et BBTM ont été maintenues. Concernant les GBR, nous avons considéré qu'ils proviennent de même centrale d'enrobage que les granulats des BBTM, à Labatut (à 41km du chantier).

10.8.1 Analyse des résultats

Seul l'indicateur Consommation en énergie procédée a été présentée, car il semble être l'élément le plus significatif (Tableau 10.9). Dans le cas du chantier Magescq, l'indicateur Consommation en énergie procédé est considéré comme l'indicateur le plus défavorable pour l'ECF.

Tableau 10.9 Consommation comparée en énergie procédé de plusieurs ECF avec différentes quantités de GBR et d'un BBTM classique dans le cas de Magescq (en MJ)

Solution	Matériaux	Transport	Fabrication +mise en œuvre	Total
ECF 0% GBR	155 190,9	142 177,1	58 545,0	355 913,0
ECF 10% GBR	151 852,2	131 943,0	58 545,0	342 340,2
ECF 25% GBR	150 987,3	117 624,0	58 545,0	327 156,3
ECF 50% GBR	149 536,8	93 730,6	58 545,0	301 812,5
BBTM Magescq	130 486,1	21 868,5	139 523,5	291 878,1

Le Graphique 10.23 montre les différents résultats obtenus.

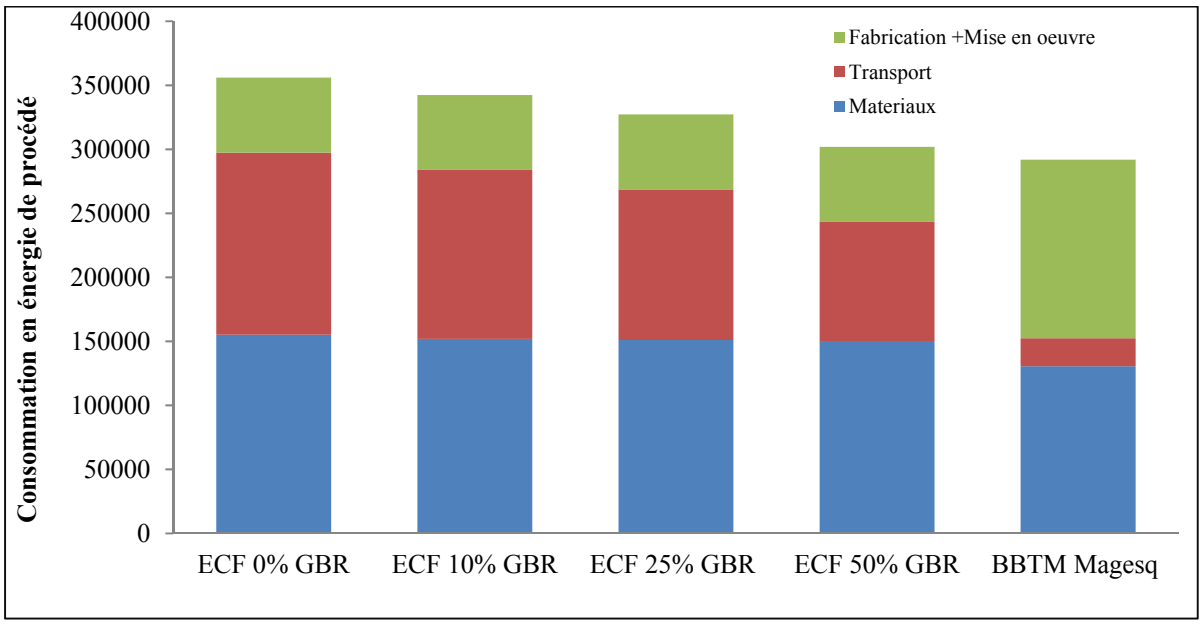


Figure 10.21 Consommation comparée en énergie procédé de plusieurs ECF avec différentes quantités de GBR et d'un BBTM classique dans le cas de Magescq (en MJ) selon SEVE

On voit qu'à mesure qu'on augmente la quantité de GBR, l'impact des ECF diminue. Cependant, la cause de cette réduction n'est pas si évidente. À priori, on pourrait penser que c'est à cause du matériel utilisé, c'est-à-dire, à cause de l'introduction des GBR. Mais si on regarde la partie Matériaux, celle-ci ne varie que très peu d'un ECF à l'autre. Par contre, c'est dans la partie Transport où se produit la réduction. La cause de celle-ci se réduit donc du fait que les GBR sont situés plus proches au chantier que les granulats que Probinord utiliserait au cas qu'elle n'ajoute pas de GBR. Cette réduction peut être obtenue également aussi en changeant de carrière pour les granulats de l'ECF. On conclut que selon les indicateurs Consommation en énergie procédée et Émissions totales de GES, il n'y a pas une variation significative si on ajoute des GBR. Cependant, on peut considérer aussi la consommation de tonnes de granulats naturels comme un indicateur environnemental. C'est selon cet indicateur que les GBR ont un impact positif sur le milieu naturel, car on épargne des granulats naturels en recyclant ceux qu'on avait utilisés pour les enrobés à remplacer. Pour finir, il faut remarquer

que l'introduction de GBR aux ECF est une technique relativement nouvelle, et qu'il n'y a pas encore d'études concluantes qui nous permettent affirmer que celle-là soit appropriée.

10.9 Conclusion

La première conclusion de ce chapitre est l'importance de la méthodologie qu'on adopte pour faire l'ACV. Celle-ci doit préciser les paramètres d'entrées (quelles données faut prendre, comment déterminer si elles sont négligeables ou non) ainsi que le périmètre d'investigation (selon SEVE, l'ACV s'arrête à la fin de la mise en œuvre). La méthodologie structure également l'étude en déterminant le flux d'obtention de résultats, de telles façons qu'on peut obtenir une analyse différente selon la démarche qu'on utilise.

Nous avons identifié SEVE comme outil pour comparer les techniques d'entretien dans ce chapitre. Ce choix a fortement déterminé la recherche des saisies en fonction de la base de données dont SEVE dispose. Cependant, il est important de souligner que dans une étude comme celle-ci, où il peut y avoir des dizaines de facteurs à tenir compte, il est impératif d'avoir un cadre qui limite et organise la recherche de saisies.

L'objectif de cette partie était de faire une éco-comparaison entre les ECF vierges et les ECF avec GBR, et de vérifier si l'ECF est moins impactant que sa technique concurrente, le BBTM, et de chiffrer cet écart. Comme expliqué au auparavant, il fallait tenir compte du scénario de Probinord, entreprise partenaire de cette thèse, et d'être capable d'obtenir de résultats qui lui soient utiles pour son activité, ce qui lui permettra de compléter une fiche technique de ses ECF.

Les résultats ont varié selon le cas de figure étudié : Pour les ECF seuls, il a été constaté que la distance entre la carrière et le chantier impacte fortement les résultats. L'ACV réalisée sur les ECF seuls a montré que le paramètre « transport des granulats » est celui qui a le plus de poids sur le bilan global. Tandis que le transport d'émulsion, dont sa quantité est presque négligeable par rapport aux granulats, n'a pas un impact très important.

La comparaison entre les ECF et les BBTM, pour tous les chantiers, a montré que l'ECF reste moins impactant que le BBTM sur les trois critères retenus (matériaux, transport et fabrication). Ces résultats s'expliquent par la différence de fabrication, à chaud du BBTM, par rapport à froid de l'ECF. Cependant, les matériaux des BBTM sont transportés au poste d'enrobage et puis au chantier, équilibrant ainsi l'avantage que les BBTM avaient sur les ECF (qui doivent amener leur émulsion de l'usine de Probinord, sur des distances plus élevées, mais des quantités moindres). Le cas de chantier où nous avons obtenu la différence d'impact la plus faible est le chantier Falaise. L'impact de la distance (transport) pour ce chantier est le moins important. Dans ce cas précis, la différence des impacts environnementaux est due essentiellement à la fabrication des mélanges.

La comparaison entre le BBTM tiède et les ECF a permis de monter que les différences diminuent par rapport à celles avec du BBTM classique, mais l'ECF reste plus écologique vis è vis des trois indicateurs étudiés (Consommations en énergie de procédé, Émissions totales de GES et la Tonne kilomètre).

Ceci mène à conclure que les BBTM pourront éventuellement être moins impactant si les granulats proviennent d'une carrière plus proche que les granulats des ECF, car c'est le transport des granulats qui implique les plus grandes variations. Cependant, il ne faut pas oublier que les hypothèses choisies pour les carrières ne sont pas toujours réalistes. Des carrières plus proches pour les BBTM peuvent exister, car les exigences sur la qualité des granulats pour les BBTM sont moins strictes.

Le remplacement de la carrière des BBTM dans le cas du chantier Magescq, a inversé les résultats. La technique des BBTM est devenue plus écologique que la technique des ECF (même avec les données personnalisées pour la machine de fabrication des ECF ne compense pas le changement de carrière.

L'étude également a permis de chiffrer l'impact de l'introduction des GBR dans la formulation des ECF. L'avantage que nous avons constaté lors de l'introduction des GBR dans la formule

des ECF, est la réduction de la consommation de granulats naturels. Cependant, les valeurs des indicateurs Consommation en Énergie Procédé et Émissions totales de GES ne changent quasiment pas avec l'ajout des GBR dans la formulation des ECF.

CONCLUSION

Ce travail de thèse, axé sur les enrobés coulés à froid sans ou avec granulats bitumineux recyclés (GBR), a pour objectifs l'analyse de l'intérêt de la technique d'entretien et de réhabilitation des chaussées faiblement dégradées, en exploitant de grandes quantités de matériaux bitumineux recyclés et en s'inscrivant dans une démarche environnementale.

Sur une chaussée dégradée, il est important d'intervenir au bon moment afin de reporter une intervention majeure et conserver aux utilisateurs une route sécuritaire. L'utilisation des enrobés coulés à froid (ECF) est une technique d'entretien intéressante ayant fait ses preuves sur le terrain, mais faisant l'objet de peu d'études scientifiques.

Partant de ce fait, cette thèse a été orientée selon trois principaux axes : une première partie consacrée à l'adaptation de la formulation des enrobés coulés à froid classiques et les enrobés coulés à froid recyclés (contenant des GBR), en analysant l'interaction des matériaux neufs et des matériaux vieillis (notamment l'émulsion d'apport, le bitume oxydé et le squelette granulaire). Le deuxième axe est dédié à l'étude de l'évolution des ECF dans le temps (comportement lors du vieillissement thermique, photochimique, phénomène des cycles gel-dégel ainsi que le comportement vis-à-vis des sollicitations mécaniques). Cette partie inclut également une étude de l'impact des ECF sur le dimensionnement de chaussées et le suivi d'une planche d'essais. Le troisième axe consiste en un bilan environnemental de la technique des ECF, avec et sans GBR.

Cette évaluation du comportement des ECF vierges ou avec GBR constitue, dans son ensemble, l'originalité et l'innovation dans ce travail. A notre connaissance, il existe très peu de travaux publiés sur les ECF avec GBR, et encore moins sur l'évolution des performances des ECF dans le temps.

Dans ce travail, une étape préliminaire de caractérisation des matériaux a été importante et indispensable. Elle a porté sur les émulsions de bitume, les granulats vierges, les GBR, le bitume pur (liant d'apport) et le bitume extrait des GBR.

Suite à la caractérisation des matériaux de base, des essais de formulation des ECF avec 100% de GBR ont montré des résultats satisfaisants et répondent aux spécifications de l'ISSA au niveau des performances recherchées pour leur utilisation sur site. Cependant, il est indispensable de souligner l'importance du choix de l'émulsion (aucun travail n'a été fait sur sa composition dans cette thèse) et son rôle dans la cohésion du matériau. Dans un deuxième temps, il a été observé que de nombreux paramètres peuvent influencer les performances des ECF recyclés tels que le temps de cure, la teneur en ciment, etc.

La deuxième partie importante de ce travail a été ciblée sur l'évolution dans le temps des ECF qui s'est traduite par l'étude du vieillissement thermique en comparaison et en couplage avec le vieillissement photochimique sur des ECF vierges et recyclés. En l'absence de procédure existante, une procédure de vieillissement accéléré a été calée en se basant sur deux procédures de vieillissement appliquées sur d'autres matériaux bitumineux (RILEM+LCPC) et adaptées à notre matériau pour évaluer le vieillissement thermique et photochimique des ECF. Pour comprendre les évolutions, ces vieillissements ont été menés à différentes échelles (bitume/émulsion/ECF) nécessitant pour le dernier une phase d'extraction/récupération du liant final.

Le protocole de vieillissement thermique en laboratoire utilisé dans cette étude, 14 jours à 85°C, a permis d'obtenir des résultats de TBA, pénétration, module complexe et spectroscopie équivalent à ceux obtenus sur des carottes âgées d'environ 10 ans prélevées sur site. Par exemple, pour un ECF vierge, nous avons constaté un passage du grade du bitume de la classe 70/100 au départ, à un bitume de classe 20/30 après 14 jours dans une étuve ventilée, à 85 °C. Une évolution des caractéristiques similaires a été constatée pour les ECF avec GBR.

Puisque les ECF sont utilisés en couche de surface en faible épaisseur, il a été décidé d'effectuer un vieillissement photochimique (allant jusqu'à 21 jours à 44°C), soit un vieillissement avec des rayons ultraviolets. Un point primordial est à signaler lors de l'étude du vieillissement photochimique est l'épaisseur du liant. L'épaisseur de l'émulsion joue un rôle très important dans l'avancement du vieillissement photochimique : les résultats des essais de consistance (TBA et pénétrabilité) ainsi que par spectroscopie IR ont ainsi démontré que les émulsions d'épaisseur 1,5 mm (épaisseur la plus faible) ont vieilli plus que les émulsions d'épaisseur 3mm.

La comparaison de deux vieillissements photochimique et thermique a révélé un comportement quasi-similaire des liants résiduels qui ont passé de grade 70/100 au grade 50/70 après 14 jours de vieillissement à 44°C, malgré un vieillissement photochimique légèrement plus important que le vieillissement thermique démontré par spectroscopie IR et par rhéologie.

Ce travail de thèse a permis de montrer également la complexité d'étudier le vieillissement photochimique des liants bitumineux, d'une part à cause des préparations expérimentales, d'autre part par la difficulté de le comparer au vieillissement thermique, en utilisant les mêmes indicateurs (Ic=o). Celui-ci s'exerce en très faible épaisseur à la surface du revêtement et notre étude montre que la dissociation des phénomènes thermiques et photochimique se révèle délicate à mettre en évidence. Il a également permis de démontrer la difficulté de dissocier le vieillissement thermique (phénomène de vieillissement homogène) du vieillissement photochimique (phénomène surfacique). Ce travail a permis aussi de mettre en évidence la nécessité de maitriser le rôle des GBR (degré de participation) dans le temps. Les résultats de l'extraction séquencée effectués sur les ECF recyclés ont permis de souligner les différents paramètres à contrôler afin d'identifier l'impact des GBR sur le comportement des ECF dans le temps.

L'étude de l'incidence de gel-dégel sur les ECF vierges et recyclés a permis d'évaluer le comportement des ECF lorsque la température passe des valeurs positives aux valeurs négatives (phénomène de gel-dégel) et d'évaluer le rôle protecteur des ECF. Ce travail a permis

d'apporter des éléments de réponse aux services routiers pour la gestion du réseau routier en période de dégel étant donné qu'aucune étude précédente n'a été trouvée sur le comportement des ECF. Les résultats de cette section ont démontré que les ECF, dans nos conditions d'essai, ne sont pas sensibles aux cycles de gel-dégel. Ensuite, l'application des ECF sur des plaques d'enrobés n'a pas eu d'effet significatif sur le comportement lors de cycles de gel-dégel ; donc les ECF ne protègent pas les enrobés des effets néfastes de ces cycles. Cependant, il est important de souligner qu'il n'existe pas d'essais qui permettent d'évaluer le comportement des ECF à basses températures. Il serait intéressant de reprendre ces essais en faisant varier le temps (augmenter le nombre des cycles de gel-dégel), travailler avec d'autres sources d'enrobés.

Outre l'évolution dans le temps des liants des ECF neufs et recyclés, une évaluation du comportement des ECF dans le temps a été menée. Le travail se divise en deux parties : la première partie est consacrée à une évaluation de la résistance des ECF à l'orniérage (déformations permanentes), la deuxième partie, à une détermination du module complexe des ECF et leur rôle dans la structure de chaussées.

Les résultats ont montré que l'effet bénéfique du vieillissement thermique sur la résistance à la déformation permanente des enrobés bitumineux. Elle est améliorée avec le temps de vieillissement à l'étuve ventilée à une température de 85°C. L'étude de l'influence du temps de vieillissement sur la résistance à l'orniérage des complexes enrobé à chaud /ECF a permis de montrer que plus le temps de vieillissement des plaques d'enrobés à chaud corrigées à l'ECF est important, plus leur résistance à l'orniérage est élevée. Il s'avère que les paramètres (état d'orniérage et pourcentage d'eau d'apport) sont significatifs dans le modèle de prédiction de l'orniérage, tandis que le nombre de cycles reste un paramètre non significatif dans le modèle, mais déterminant. L'analyse de la régression a démontré une forte corrélation entre les valeurs d'orniérage prédites par le modèle et les valeurs mesurées au laboratoire à l'orniéreur MLPC.

En ce qui concerne les essais du module complexe des ECF, les résultats ont montré que les ECF vierges possèdent un comportement viscoélastique, et que leurs modules complexes sont

faibles comparativement à un enrobé, mais c'est attendu puisqu'il ne s'agit pas de matériaux de structure. Les ECF vierges ont des modules de rigidité plus élevés que les modules des ECF formulés avec des GBR. Ceci peut s'expliquer par la teneur en vide élevée dans le cas des ECF recyclés par à celle des ECF vierges.

Au travers de calculs via le logiciel ALIZE, l'analyse de l'impact de la faible épaisseur de l'ECF sur le dimensionnement d'une chaussée souple montre que l'ECF à un léger impact structurel sur le comportement de la chaussée soumise aux sollicitations du trafic routier. En effet, on observe une diminution généralisée des contraintes et des déformations dans le corps de la chaussée due à la couche d'ECF.

Enfin, ce travail a été complété par une approche environnementale de la technique ECF et ECF recyclé. En se plaçant dans un contexte réel de chantiers, l'objectif de ce dernier chapitre était de comparer l'impact environnemental des ECF, comparativement à une technique concurrente, le BBTM, et de chiffrer cet écart. L'outil utilisé pour la démarche est un éco-comparateur développé par la profession routière française (SEVE). L'avantage majeur constaté lors de l'introduction des GBR dans la formule des ECF, est la réduction de la consommation de granulats naturels qui se répercute naturellement sur le bilan environnemental.

Dans ce travail de thèse, l'objectif était d'apporter une contribution technique dans l'élaboration d'un enrobé coulé à froid recyclé aussi performant qu'un enrobé coulé à froid classique.

Les plus-values scientifiques sont au niveau de la compréhension des interactions fines/ bitume, le comportement du matériau face aux différentes déformations et l'évolution à court et long terme ; elles se résument comme suit :

- résoudre les problèmes liés à la formulation du mélange : identification des paramètres à maitriser pour déterminer le degré de participation du bitume vieilli des GBR et interaction GBR/ bitume vieilli et fines;

- définir l'apport au niveau des performances mécaniques telles que la résistance à l'orniérage de couches supérieures, et l'évaluation du module complexe des ECF vierges et recyclés;
- évaluer le comportement des enrobés coulés à froid lors de son évolution in situ : suivi de l'évolution dans le temps du vieillissement thermique et photochimique.

L'objectif était aussi de réaliser un produit opérationnel et commercialisable pour les industries en charge d'entretien routier.

Ainsi, les enjeux de l'étude portaient également sur les conséquences et impacts industriels, comme énoncés ci-dessous :

- réaliser une formulation d'enrobés coulés à froid recyclés qui vérifie les normes imposées par l'ISSA (*International Slurry Surfacing Association*) et les critères des normes européennes. Cette plus-value est une opportunité non négligeable pour les concepteurs des enrobés. Elle permet de fabriquer des matériaux performants tout en respectant les critères du développement durable;
- contribuer à faire une analyse de cycle de vie de la technique proposée permet aux entreprises de mieux connaitre leurs produits d'un point de vue environnemental. Ceci favorisera leurs expansions vers de nouveaux marchés;
- un chantier expérimental d'ECF recyclé à 50% a été réalisé en France avec notre partenaire industriel Probinord avec la formule des ECF recyclés testée et validée au cours de cette thèse. Ce chantier a montré une bonne résistance et un comportement satisfaisant à l'hiver rigoureux qu'a connu la France en 2017, ce qui a encouragé les municipalités. Un deuxième chantier plus important est donc prévu prochainement.
- les municipalités, le ministère du Transport du Québec et les entreprises peuvent tirer profits de ces recherches pour l'amélioration, le développement et l'innovation dans le domaine routier.

Cette thèse aura permis de comprendre le comportement d'un matériau complexe et évolutif (ECF vierge et recyclé) vis-à-vis des différents types d'agression, ce malgré le nombre

limité d'études existantes. De plus, l'aspect environnemental a été abordé selon tous les enjeux imposés par les sommets et organisations étatiques. Enfin, au-delà de contribuer à la recherche, l'objectif était d'apporter de réelles solutions, efficaces et efficientes aux entreprises. Ce travail aura permis l'exploration, le solutionnement partiel et la réflexion de questions que la littérature n'avait pas abordées jusqu'à présent.

RECOMMANDATIONS

A la lumière de ce travail de thèse, le constat est l'incorporation des GBR dans les ECF s'avère être plus compliquée et fastidieuse que prévu. Malgré les résultats positifs obtenus au cours de cette étude, il semble indispensable d'améliorer la compréhension des interactions entre le bitume neuf et vieilli. La présence de bitume vieilli et le manque des fines dans les GBR ne permettent généralement pas l'introduction de ces derniers dans la formulation sans l'adaptation de celle-ci.

En perspective, il semblerait indispensable de continuer les recherches sur les phénomènes d'interface du bitume neuf et bitume vieilli des GBR. Au jeune âge et dans le temps, la mobilisation du bitume des GBR pouvait passer par l'utilisation d'agents régénérant sélectionnés par exemple. Ceci pourrait également améliorer la durabilité des ECF et assurer un meilleur apport structurel pour les couches de surface.

Un autre point qu'il conviendrait de le soulever serait le choix de la nature des GBR ainsi que la maitrise de la granulométrie des GBR. Il faudrait également travailler sur la formulation des émulsions et ses caractéristiques chimiques. Il serait donc judicieux que des études aillent dans ce sens afin de bien contrôler les mélanges effectués.

D'autres aspects pourraient être améliorés lors des prochaines recherches concernant l'évaluation des performances des ECF dans le temps de point de vue thermique. Il serait intéressant de prolonger les durées de vieillissement accéléré en laboratoire afin de mieux simuler l'évolution des dégradations sur site. Il serait également important d'utiliser des températures de vieillissement photochimique plus élevées et des épaisseurs de liant plus faibles.

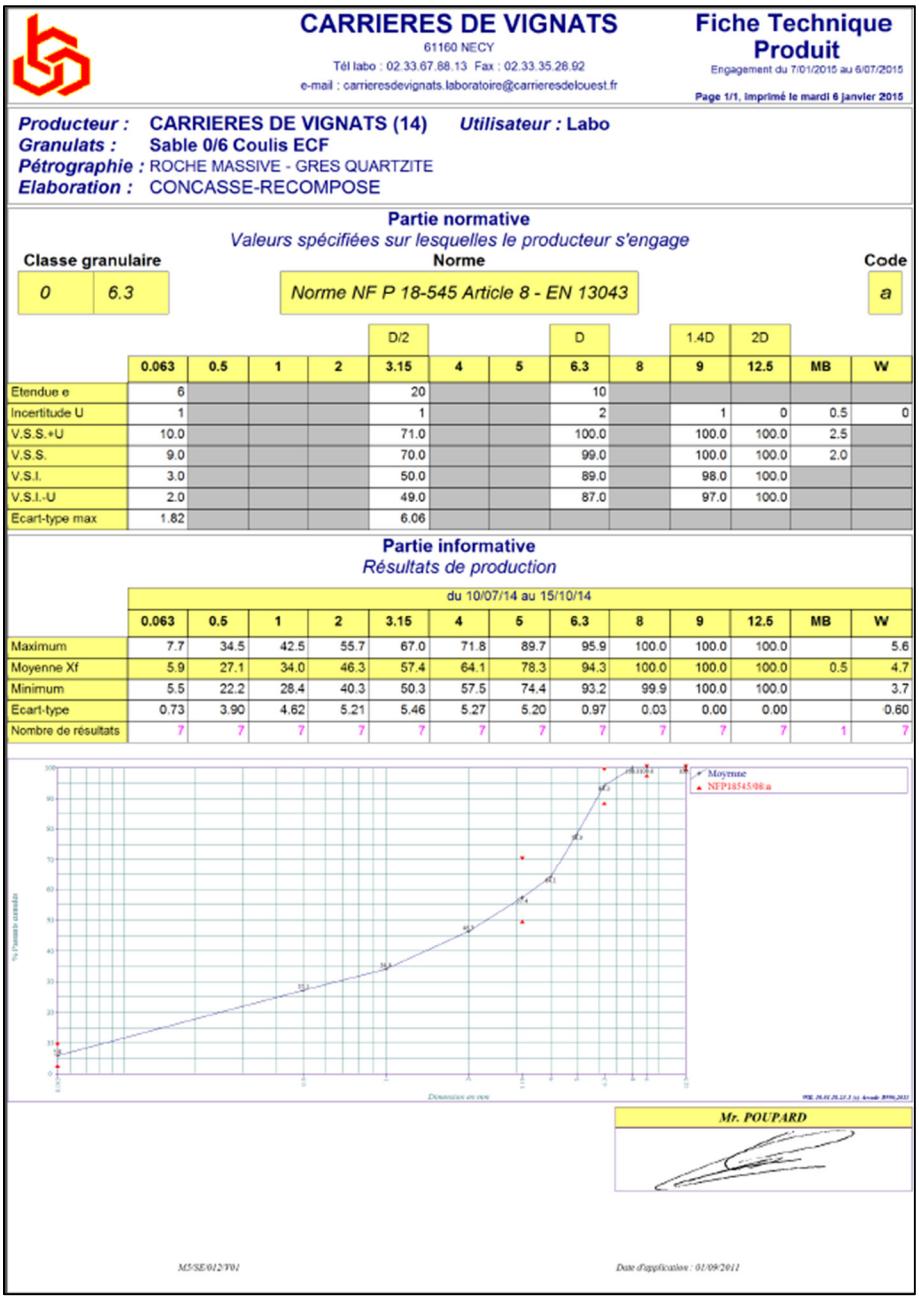
Cette étude thermique a permis également d'identifier des perspectives par rapport aux essais de cycles gel-dégel effectués. Il serait utile de réaliser des essais d'orniérage sur les complexes (enrobé + ECF) à des températures plus basses ou peut être effectué une phase de vieillissement

préalable avant orniérage. Quant aux nombres de cycles de gel-dégel, il serait préférable d'augmenter leur nombre ou changer les températures maximales (aller jusqu'à 40 ou 60°C pour simuler la phase été). Par ailleurs, il serait intéressant de développer des essais de validation du comportement des ECF à basses températures.

Finalement, pour chacune des parties de cette thèse, il serait intéressant de mesurer la variabilité des résultats en utilisant d'autres sources de GBR et de bitume / émulsion d'apport.

ANNEXE I

FICHE TECHNIQUE DES MATÉRIAUX DE FORMULATION



CARRIERES DE VIGNATS
61160 NECY
Tél labo : 02.33.67.88.13 Fax : 02.33.35.26.92
e-mail : carrieresdevignats.laboratoire@carrieresdelouest.fr

Fiche Technique Produit
Engagement du 7/01/2015 au 6/07/2015
Page 1/1, imprimé le mardi 6 janvier 2015

Producteur : **CARRIERES DE VIGNATS (14)** ***Utilisateur :*** **Labo**
Granulats : **Sable 0/6 Coulis ECF**
Pétrographie : ROCHE MASSIVE - GRES QUARTZITE
Elaboration : CONCASSE-RECOMPOSE

Partie normative
Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Classe granulaire		Norme	Code
0	6.3	Norme NF P 18-545 Article 8 - EN 13043	a

					D/2			D		1.4D	2D		
	0.063	0.5	1	2	3.15	4	5	6.3	8	9	12.5	MB	W
Etendue e	6				20			10					
Incertitude U	1				1			2		1	0	0.5	0
V.S.S.+U	10.0				71.0			100.0		100.0	100.0	2.5	
V.S.S.	9.0				70.0			99.0		100.0	100.0	2.0	
V.S.I.	3.0				50.0			89.0		98.0	100.0		
V.S.I.-U	2.0				49.0			87.0		97.0	100.0		
Ecart-type max	1.82				6.06								

Partie informative
Résultats de production

	du 10/07/14 au 15/10/14												
	0.063	0.5	1	2	3.15	4	5	6.3	8	9	12.5	MB	W
Maximum	7.7	34.5	42.5	55.7	67.0	71.8	89.7	95.9	100.0	100.0	100.0		5.6
Moyenne Xf	5.9	27.1	34.0	46.3	57.4	64.1	78.3	94.3	100.0	100.0	100.0	0.5	4.7
Minimum	5.5	22.2	28.4	40.3	50.3	57.5	74.4	93.2	99.9	100.0	100.0		3.7
Ecart-type	0.73	3.90	4.62	5.21	5.46	5.27	5.20	0.97	0.03	0.00	0.00		0.60
Nombre de résultats	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	1	7

Mr. POUPARD

M5/SE/012/V01 *Date d'application : 01/09/2011*

Figure-A I-1 Fiche des granulats vierges

Probinord
TECHNIQUES ROUTIÈRES

FICHE TECHNIQUE PRODUIT (6) : C 60 B 5

PROBIMUL 60 ECF

PROBIMUL 60 ECF est une émulsion cationique de bitume destinées spécifiquement à la réalisation d'enrobés coulés à froid.

Ses caractéristiques sont conformes à la norme NF EN 13 808- *août 2013* (C60B5) comme le montre le tableau ci-dessous :

:

Caractéristiques	Méthodes normalisées de référence	Spécifications	Classe	Résultats moyens
Teneur en liant* %	NF EN 1428	58 à 62	6	59 à 61
Temps d'écoulement 2 mm à 40°C (s)	NF EN 12846	15-70	3	15 à 45
Résidu sur tamis de 0.5 mm (%) 0.16 mm	Granulométrie laser	≤ 0,1 ≤ 0,25	2 2	≤ 0,01 ≤ 0,01
Résidu à 7 jours sur tamis de 0.5 mm	NF EN 1429	< 0.1	2	<0.1
Indice de rupture - *fines forshammer* - *fines sikaisol*	NF EN 13075-1	>170 > 120	5	- 130 à 150
pH	NF EN 12850	2 à 4	-	2 à 4
Granulométrie Laser	MALVERN	Diamètre médian	-	Environ 3 µm
Adhésivité *Quartzite (Chailloue - Vignats), Diorite (Noubleau), Tuf (Cerf), Granite (Delmonico), Porphyre (Pont de Colonne)*	NF EN 13614	>90	3	>90

AUTRES CARACTERISTIQUES

Caractéristiques	Méthodes normalisées de référence	B. de base 70/100
		Liant récupéré
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	NF EN 1426	< 100 (3)
Point de ramollissement (°C)	NF EN 1427	> 46 (4)

* La teneur en liant d'une émulsion déterminée par la méthode décrite dans la norme EN 1428 est définie ainsi : 100 – W

CE

Figure-A I-2 Fiche de l'émulsion cationique

Probinord
TECHNIQUES ROUTIÈRES

DOPE ADP 1

FICHE TECHNIQUE

Le dope ADP1 est un dope d'adhésivité à l'interface liant-granulats utilisé pour les enrobés coulés à froid en pré enrobage des agrégats.

Les matières premières entrant dans sa composition sont des n-suif propylène polyamines saponifiées à l'aide d'acide chlorhydrique et en dispersion à 10 % dans la masse d'eau.

Utilisation pour les enrobés coulés à froid : la dispersion est ajoutée aux matériaux dans le malaxeur avant l'introduction du liant à la dose de 0,5 à 2 % par rapport au poids des granulats secs.

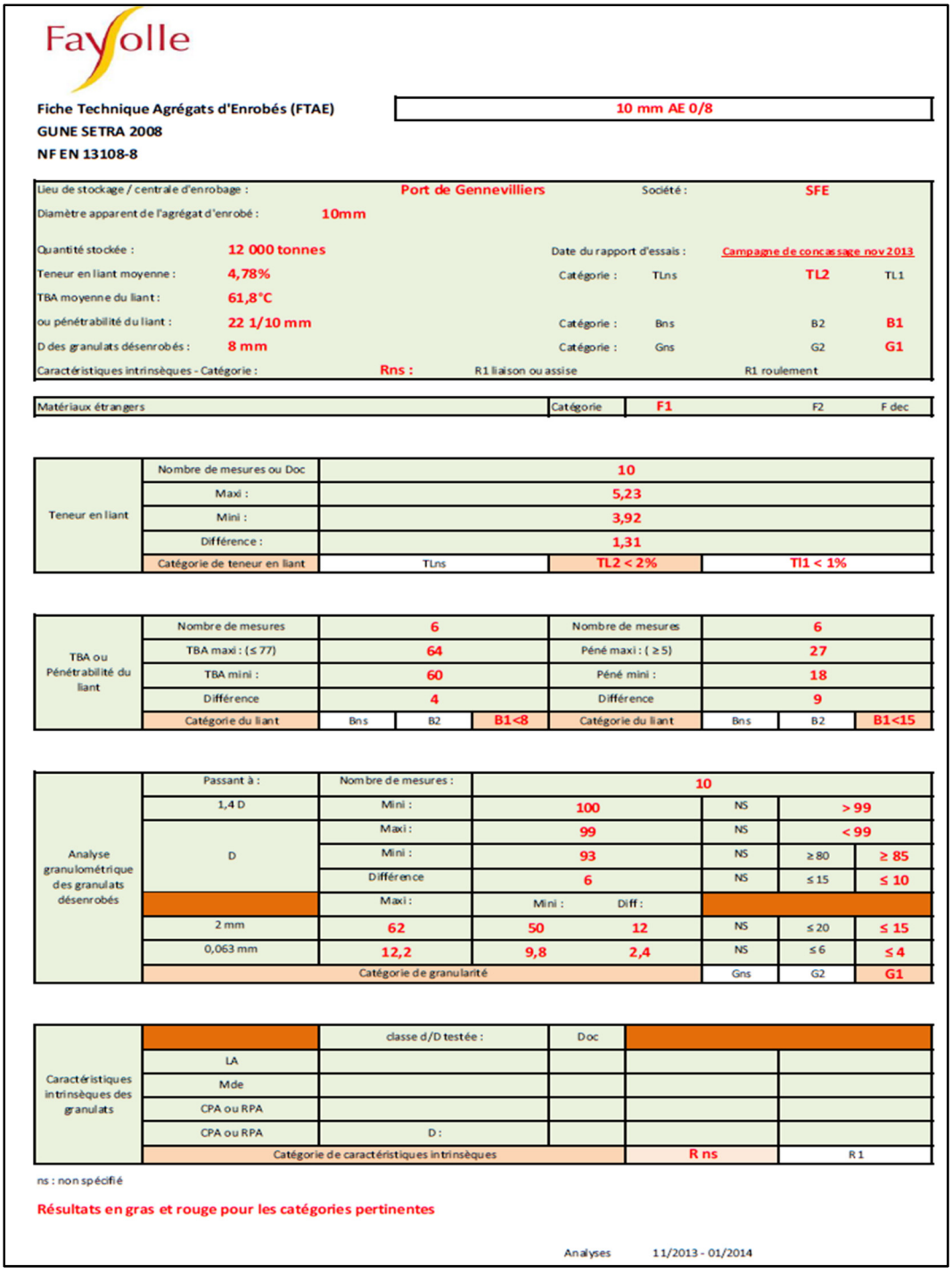
Les caractéristiques du dope ADP 1 sont détaillées le tableau ci-dessous :

Caractéristiques	Résultats moyens
Aspect à 20°C	Liquide
pH tel que	3,0 à 4,0
Point éclair en °C	Néant
Masse volumique à 20°C en kg/m³	Environ 1,00

Le dope ADP 1 est conditionné en fûts de 200 litres.

Le dope ADP 1 n'est pas classé comme matière dangereuse et n'est pas étiquetable.

Figure-A I-3 Fiche du dope



Fayolle

Fiche Technique Agrégats d'Enrobés (FTAE) — **10 mm AE 0/8**

GUNE SETRA 2008

NF EN 13108-8

Lieu de stockage / centrale d'enrobage :	Port de Gennevilliers		Société :	SFE	
Diamètre apparent de l'agrégat d'enrobé :	10mm				
Quantité stockée :	12 000 tonnes		Date du rapport d'essais :	Campagne de concassage nov 2013	
Teneur en liant moyenne :	4,78%		Catégorie : TLns	TL2	TL1
TBA moyenne du liant :	61,8°C				
ou pénétrabilité du liant :	22 1/10 mm		Catégorie : Bns	B2	B1
D des granulats désenrobés :	8 mm		Catégorie : Gns	G2	G1
Caractéristiques intrinsèques - Catégorie :	Rns :	R1 liaison ou assise		R1 roulement	

Matériaux étrangers	Catégorie	F1	F2	F dec

Teneur en liant	Nombre de mesures ou Doc	10		
	Maxi :	5,23		
	Mini :	3,92		
	Différence :	1,31		
	Catégorie de teneur en liant	TLns	TL2 < 2%	TI1 < 1%

TBA ou Pénétrabilité du liant	Nombre de mesures	6			Nombre de mesures	6		
	TBA maxi : (≤ 77)	64			Péné maxi : (≥ 5)	27		
	TBA mini :	60			Péné mini :	18		
	Différence	4			Différence	9		
	Catégorie du liant	Bns	B2	B1<8	Catégorie du liant	Bns	B2	B1<15

Analyse granulométrique des granulats désenrobés	Passant à :	Nombre de mesures :	10					
	1,4 D	Mini :	100			NS	> 99	
	D	Maxi :	99			NS	< 99	
		Mini :	93			NS	≥ 80	≥ 85
		Différence	6			NS	≤ 15	≤ 10
		Maxi :	Mini :		Diff :			
	2 mm	62	50		12	NS	≤ 20	≤ 15
	0,063 mm	12,2	9,8		2,4	NS	≤ 6	≤ 4
	Catégorie de granularité					Gns	G2	G1

Caractéristiques intrinsèques des granulats		classe d/D testée :	Doc		
	LA				
	Mde				
	CPA ou RPA				
	CPA ou RPA	D :			
	Catégorie de caractéristiques intrinsèques			R ns	R 1

ns : non spécifié

Résultats en gras et rouge pour les catégories pertinentes

Analyses 11/2013 - 01/2014

Figure-A I-4 Fiche des GBR

Tableau-A I-1 Formulation des ECF vierges

Formules de l'ECF référence							
Matériaux	**Masse (g)**	**Teneur (%)**	**Teneur en eau (g)**	**Teneur en eau (%)**	**Masse de bitume (g)**	**Teneur en bitume de l'ECF (%)**	**Teneur en bitume dans mélange sec (%)**
Granulats vierges	1344	79,0	251,95	14,8	100,8	5,9	**6,95**
Eau de mouillage	56	3,3					
émulsion de bitume	168	9,9					
eau d'apport	122	7,2					
dope	7,5	0,4					
ciment	4,2	0,2					
Total	1701,7	100					
Total sec	1449,8						

Tableau-A I-2 Formulation des ECF avec 20 % GBR

Formules de l'ECF avec 20% GBR							
Matériaux	**Masse (g)**	**Teneur (%)**	**Teneur en eau (g)**	**Teneur en eau (%)**	**Masse de bitume (g)**	**Teneur en bitume de l'ECF (%)**	**Teneur en bitume dans mélange sec (%)**
Granulats vierges	1048,3	62,7	211,6	12,7	108,9	6,5	**7,47**
GBR	280	16,8					
Fines calcaires	28	1,7					
Eau de mouillage	45	2,7					
émulsion de bitume	161	9,6					
eau d'apport	95	5,7					
dope	8	0,5					
ciment	5,6	0,3					
Total	1670,9	100					
Total sec	1459,3						

Tableau-A I-3 Proportion de chaque liant dans le mélange final (bitume d'apport et bitume de GBR)

Teneur en liant GBR (%)	11,3
Teneur en liant d'apport (%)	88,7

Tableau-A I-4 Formulation des ECF avec 50 % GBR

Formules de l'ECF avec 50% GBR							
Matériaux	**Masse (g)**	**Teneur (%)**	**Teneur en eau (g)**	**Teneur en eau (%)**	**Masse de bitume (g)**	**Teneur en bitume de l'ECF (%)**	**Teneur en bitume dans mélange sec (%)**
Granulats vierges	630,0	35,6	266,4	15,0	127,5	7,2	**8,47**
GBR	700	39,5					
Fines calcaires	70	4,0					
Eau de mouillage	28	1,6					
émulsion de bitume	161	9,1					
eau d'apport	165	9,3					
dope	10	0,6					
ciment	5,6	0,3					
fibres	2,1	0,1					
Total	1771,7	100					
Total sec	1505,3						

Tableau-A I-5 Proportion de chaque liant dans le mélange final (bitume d'apport et bitume GBR)

Teneur en liant de GBR (%)	24,2
Teneur en liant d'apport (%)	75,8

ANNEXE II

RÉSULTATS

Résultats rhéologiques

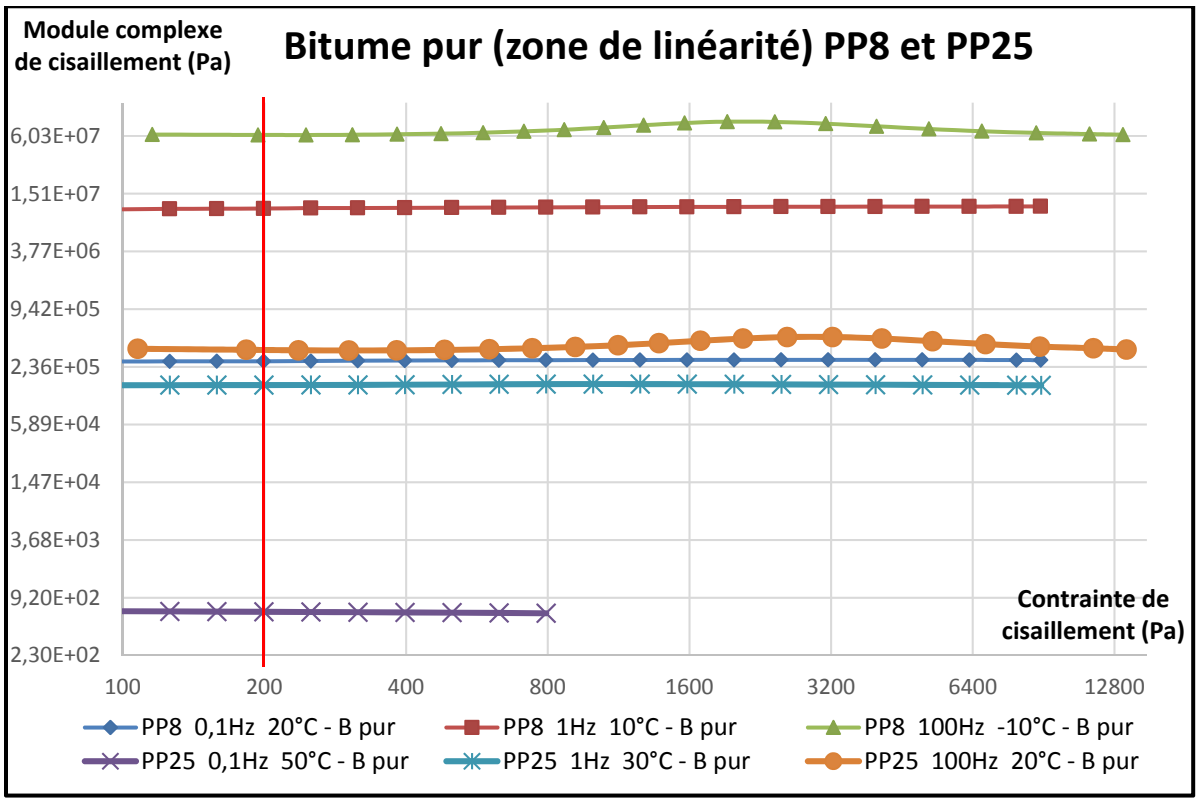


Figure-A II-1 Zone de linéarité du bitume pur en PP8 et PP25

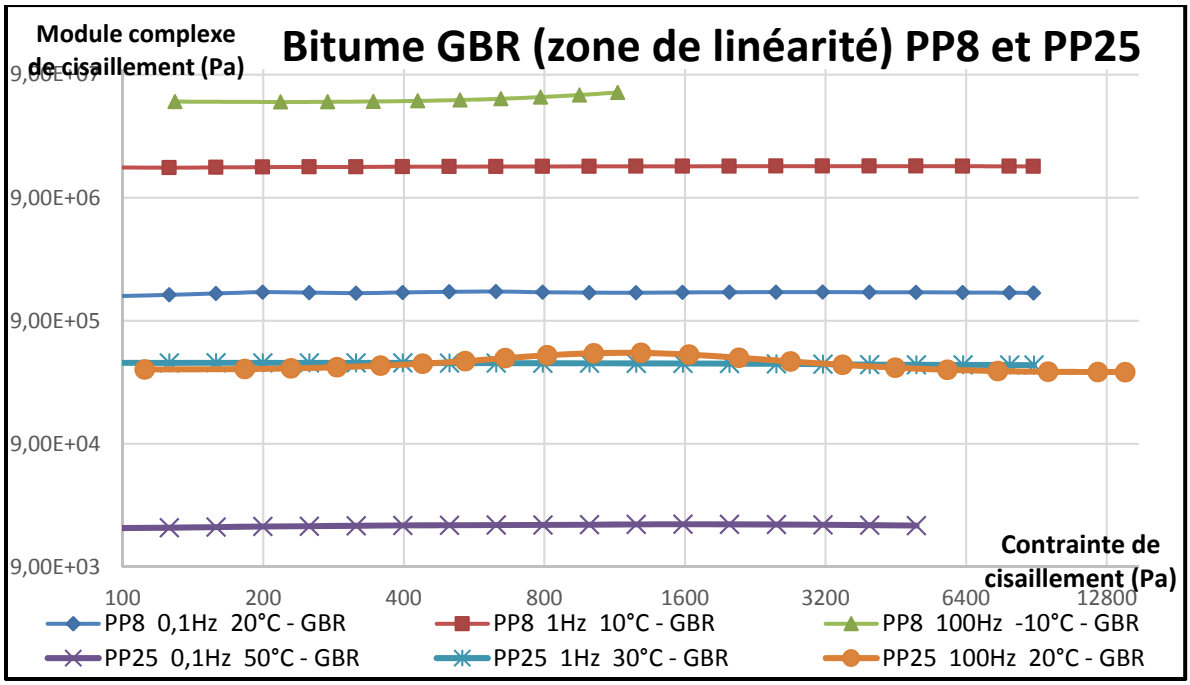


Figure-A II-2 Zone de linéarité du bitume GBR en PP8 et PP25

Détermination du module complexe de cisaillement et de l'angle de phase du bitume pur et du bitume de GBR en fonction de la fréquence

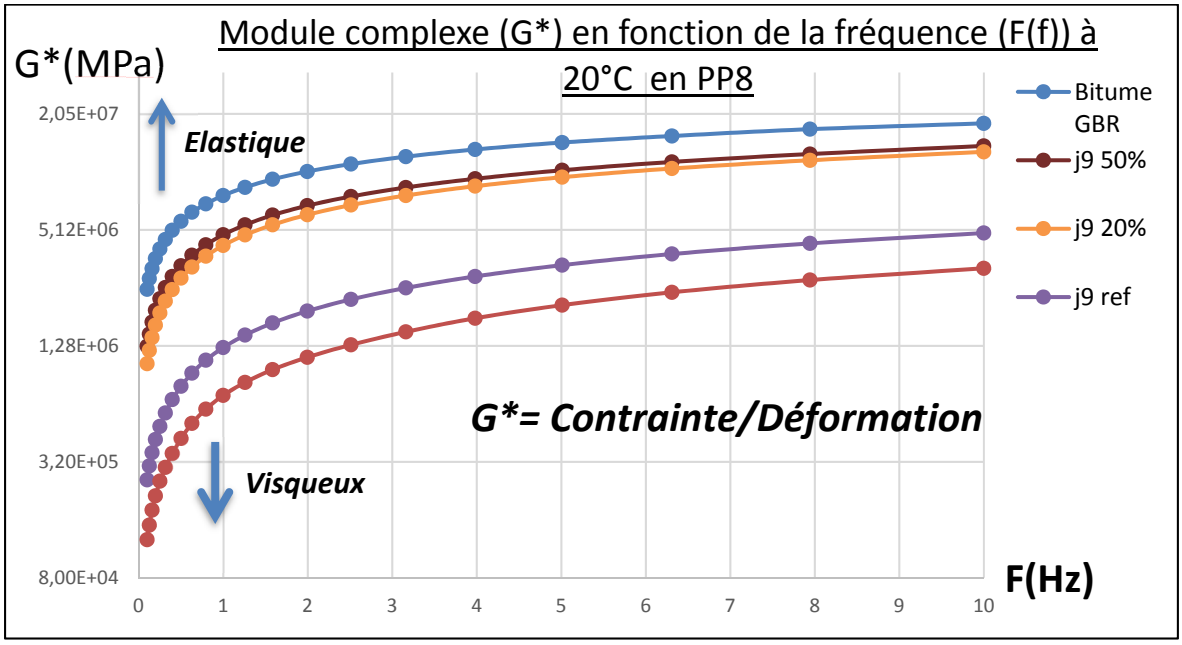


Figure-A II-3 Module complexe en fonction de la fréquence à 20°C en PP8

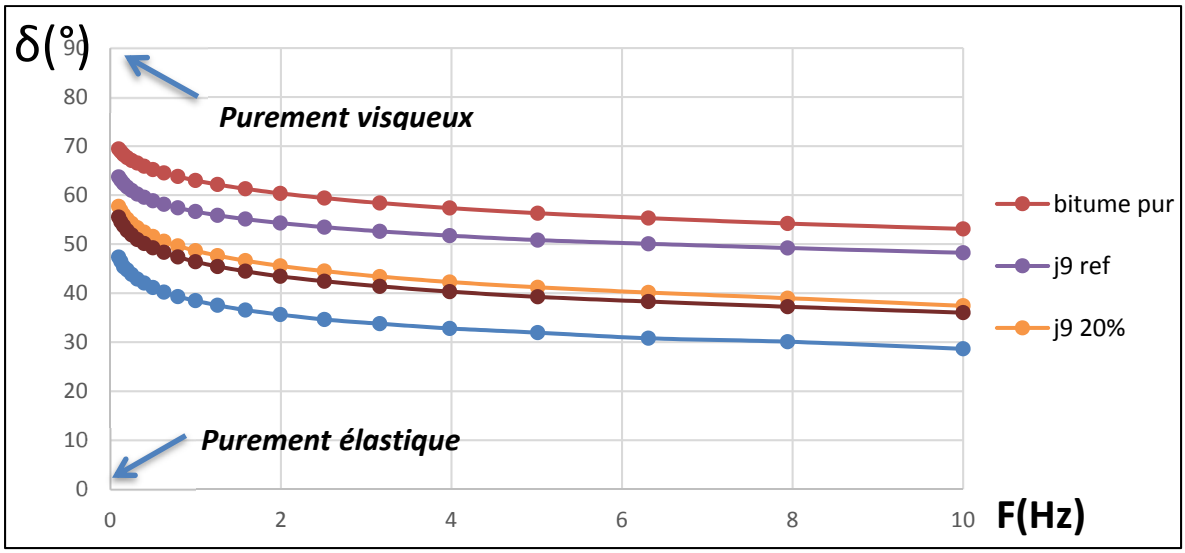


Figure-A II-4 Angle de phase en fonction de la fréquence à 20°C en PP8

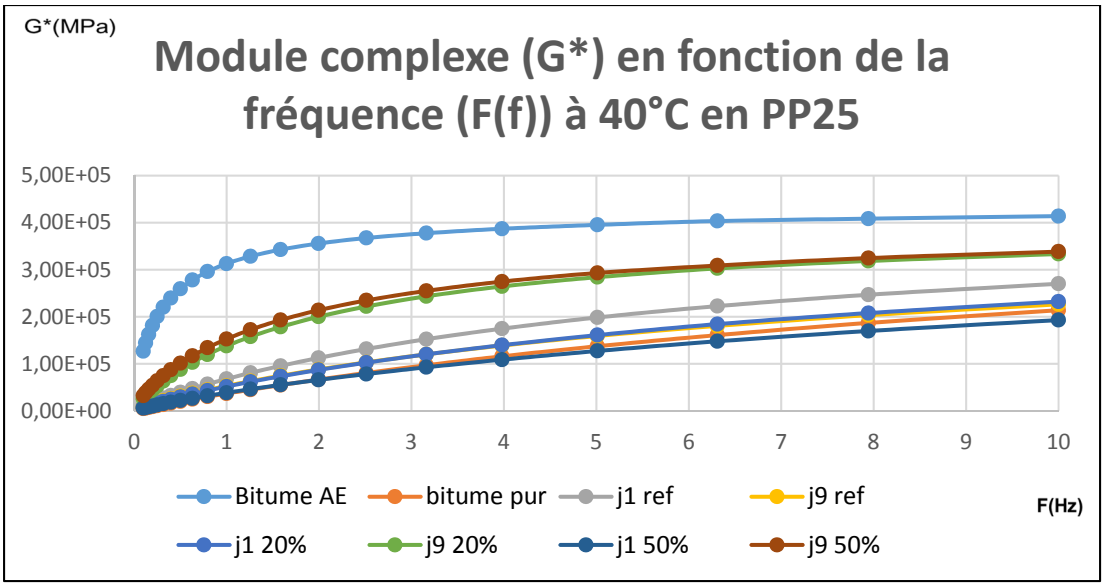


Figure-A II-5 Module complexe en fonction de la fréquence à 40°C en pp25

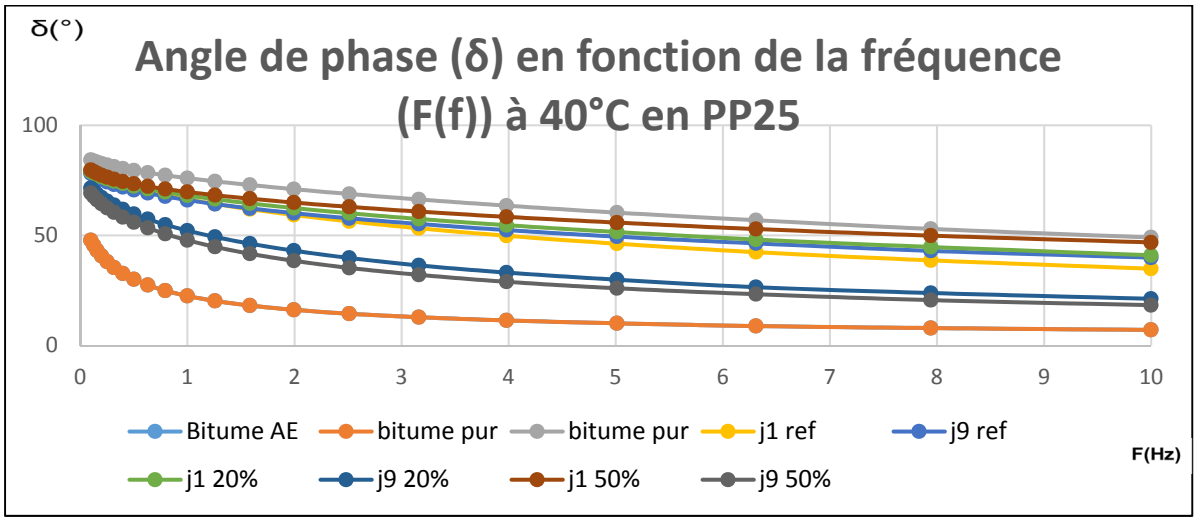


Figure-A II-6 Angle de phase en fonction de la fréquence à 40°C en PP25

Résultats spectroscopies

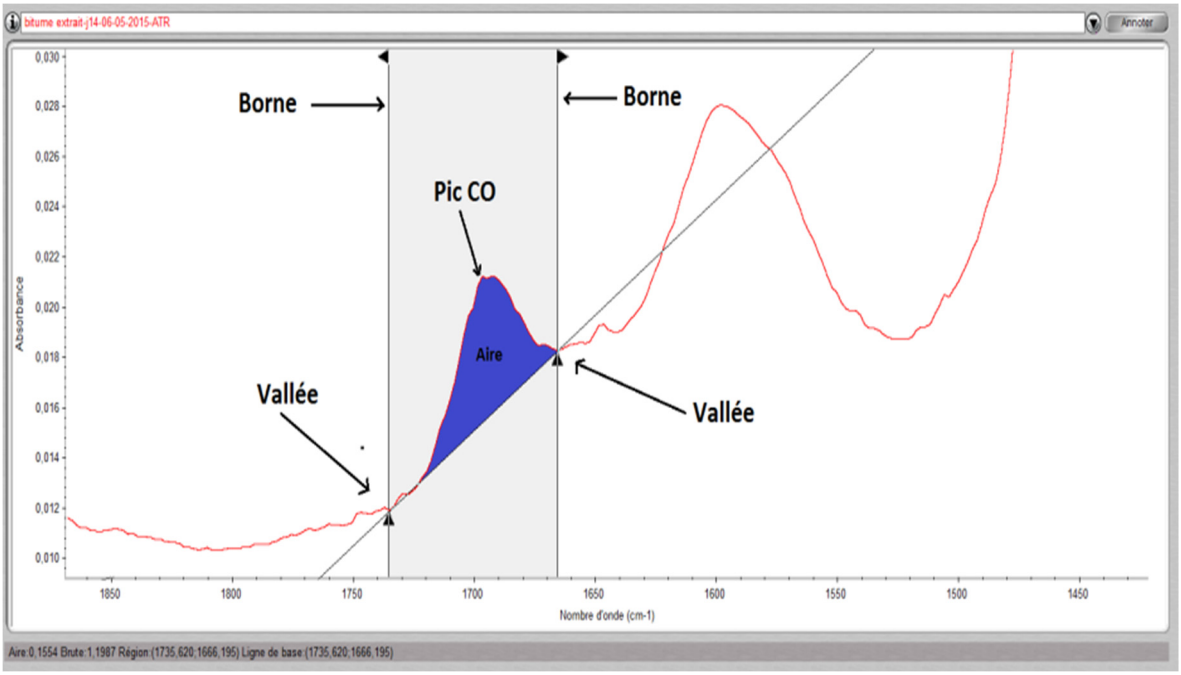


Figure-A II-7 Détermination de l'aire du pic d'oxydation CO

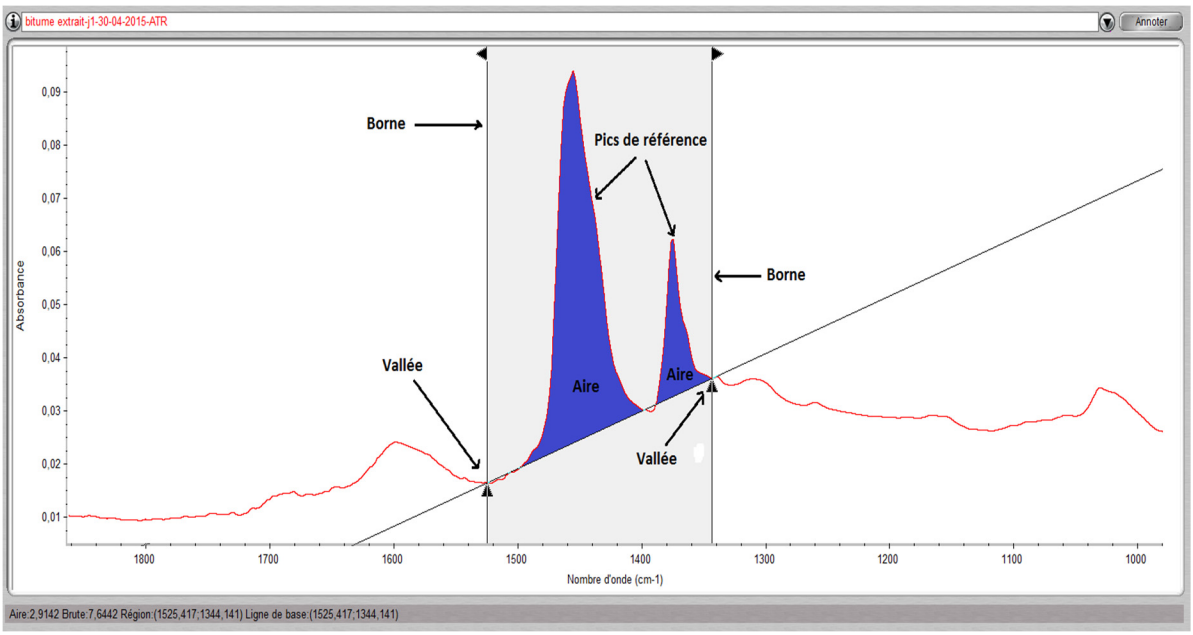


Figure-A II-8 Détermination de l'aire des pics de référence

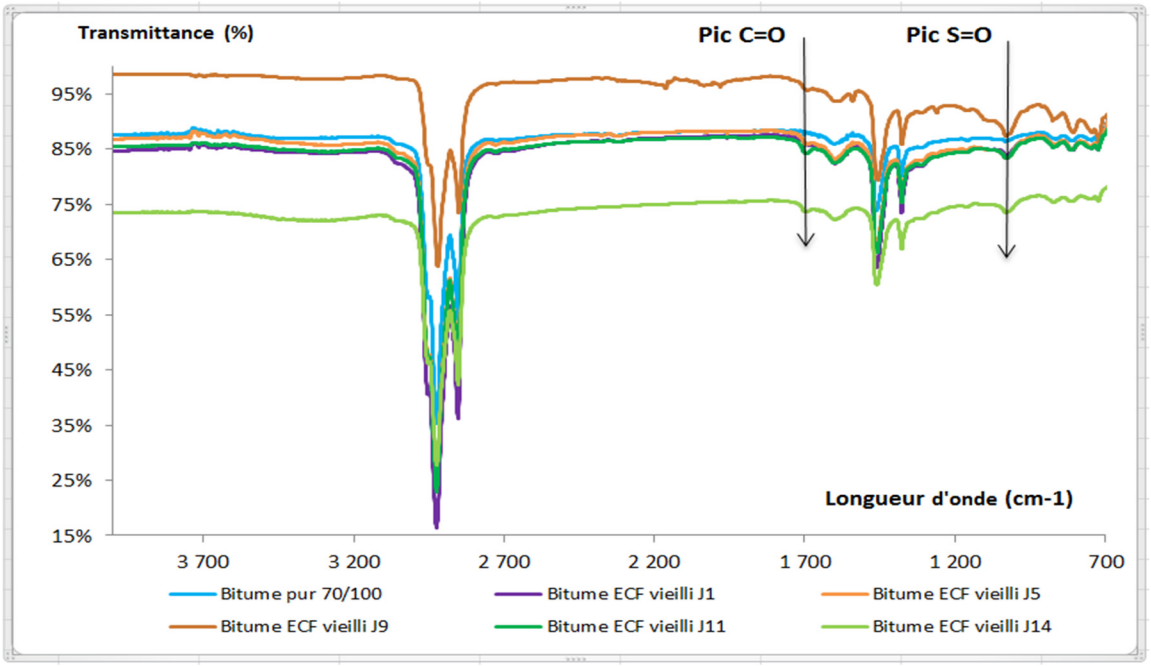


Figure-A II-9 Spectres bitume ECF de référence vieilli (J1 à J14)

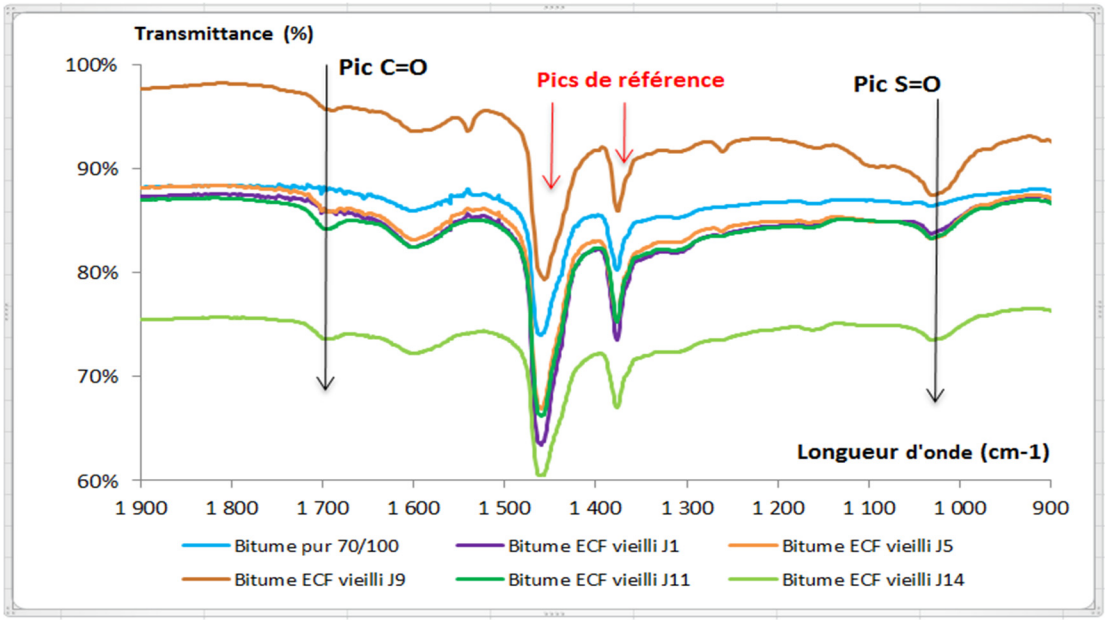


Figure-A II-10 Spectres bitume ECF de référence vieilli (J1 à J14) après zoom

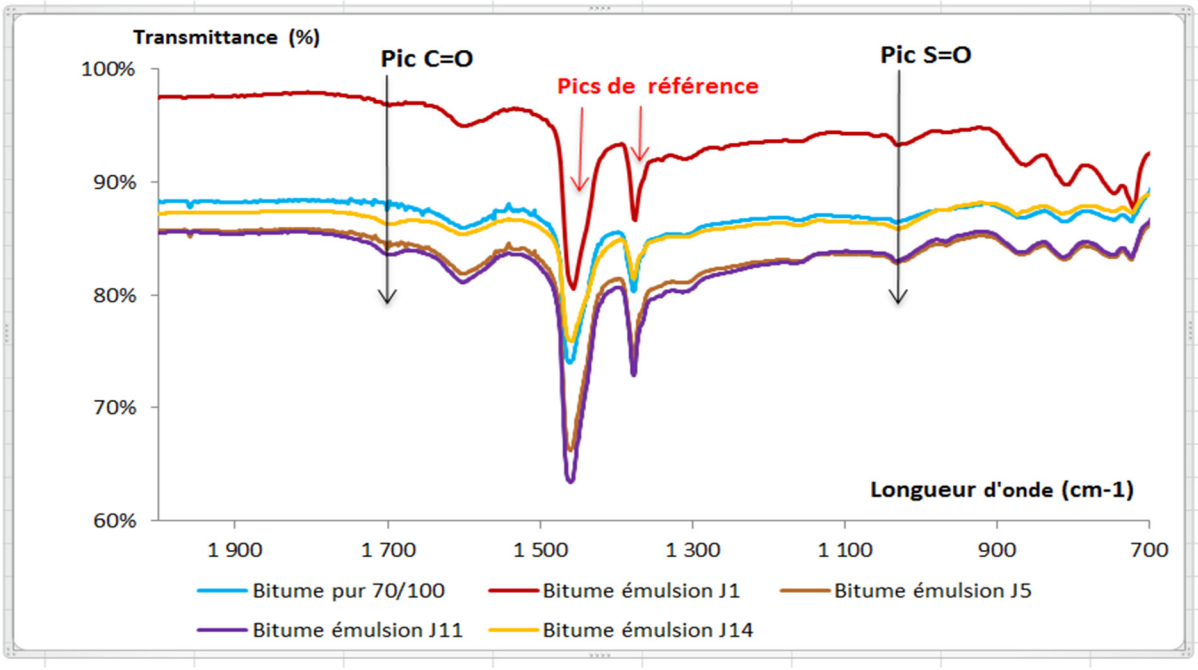


Figure-A II-11 Spectres émulsion vieillie (J1 à J14) après zoom

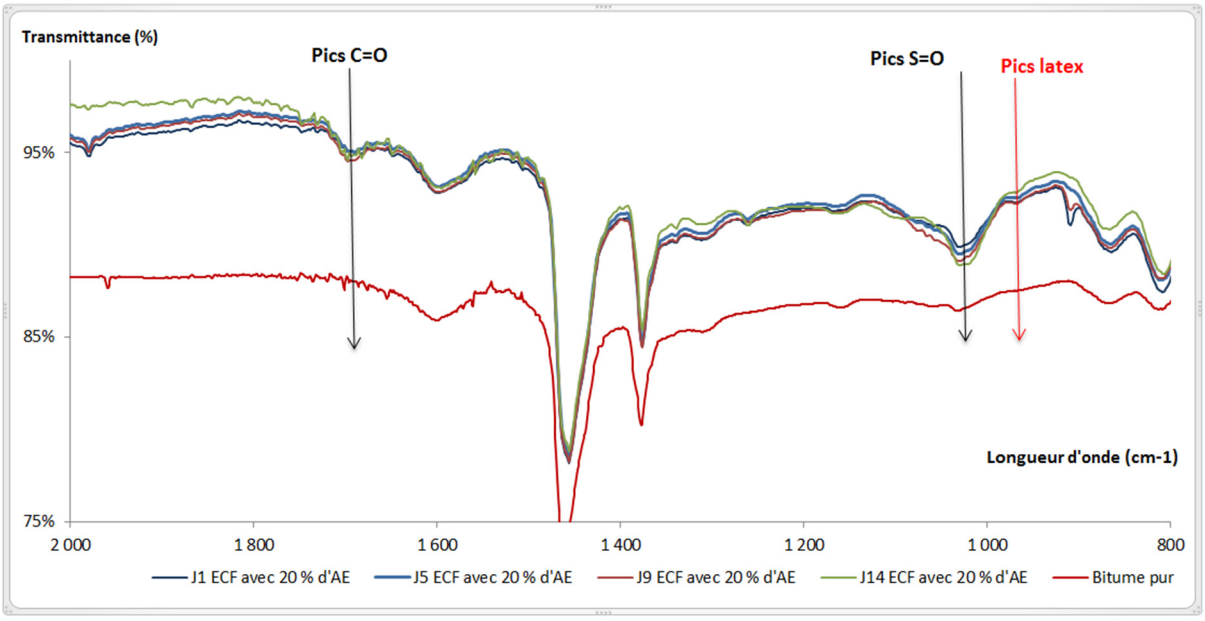


Figure-A II-12 Spectres bitume ECF 20% d'AE vieilli (J1 à J14) après zoom

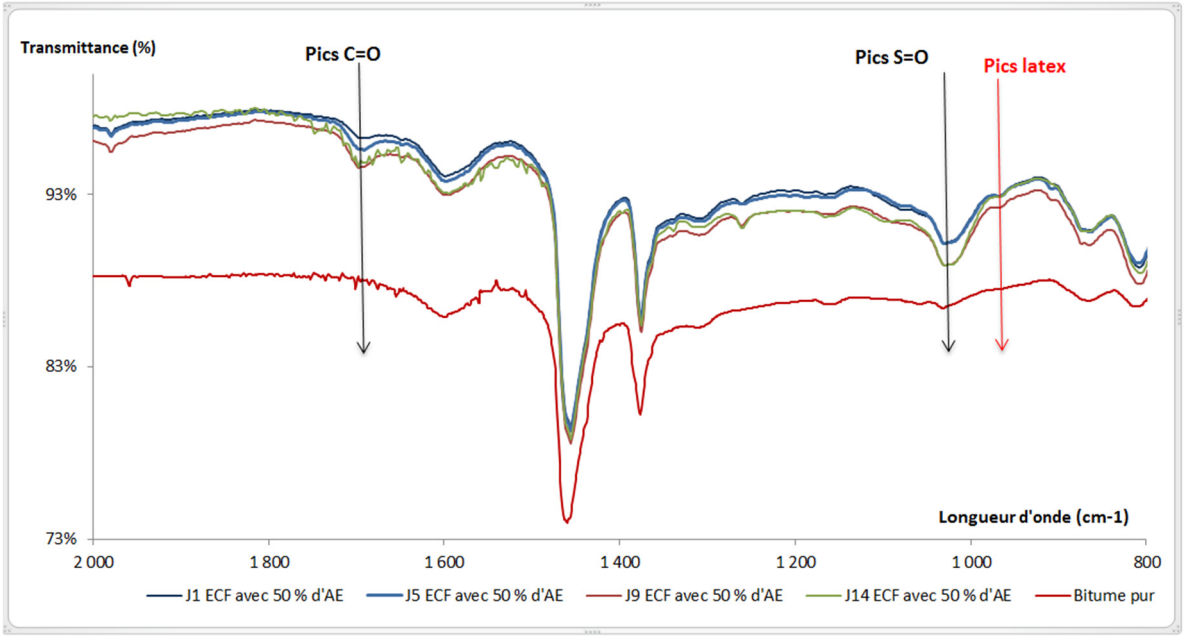


Figure-A II-13 Spectres bitume ECF 50% GBR vieilli (J1 à J14) après zoom

Extraction séquencée pour le vieillissement thermique

Les résultats des extractions séquencées réalisées sur les ECF avec recyclé à 20 et 50 % GBR sont présentés dans les tableaux suivants :

- ECF avec 20 % GBR

Tableau-A II-1 Caractéristiques de l'échantillon d'ECF avec 20 % GBR pour l'extraction séquencée

	ECF avec 20% recyclé (extraction séquencée)				
Echantillons	**Résultats**	**Point 1**	**Point 2**	**Point 3**	
J1	**Masse de solvant récupéré(g)**	1,1	0,6	0,5	
	Teneur en liant (%)	3,6	2,0	1,8	
	Masse totale de liant(g)	21,2	27,1	42,9	91,2
	% de désenrobage	23,21	29,77	47,02	
J5	**Masse de solvant récupéré(g)**	0,7	0,8	0,3	
	Teneur en liant (%)	2,5	2,6	1,0	
	Masse totale de liant(g)	26,0	43,4	20,5	89,8
	% de désenrobage	28,94	48,26	22,80	
J9	**Masse de solvant récupéré(g)**	0,04	1,0	0,6	
	Teneur en liant (%)	0,1	3,3	2,0	
	Masse totale de liant(g)	0,7	42,7	49,4	92,9
	% de désenrobage	0,77	46,01	53,22	
J14	**Masse de solvant récupéré(g)**	0,84	0,9	0,3	
	Teneur en liant (%)	2,8	3,1	0,9	
	Masse totale de liant(g)	24,2	48,5	19,2	92,0
	% de désenrobage	26,32	52,78	20,90	

Tableau-A II-2 TBA sur ECF avec 20% GBR après extraction séquencée

Extraction séquencée ECF avec 20% GBR					
TBA (C°)	**Jour**	J1	J5	J9	J14
	Point 1	51	56	-	62
	Point 2	54	58	59	63
	Point 3	50	52	56	61

- ECF avec 50 % GBR

Tableau-A II-3 Caractéristiques de l'échantillon d'ECF avec 50 % GBR pour l'extraction séquencée

	ECF avec 50% recyclé (extraction séquencée)				
Echantillons	**Résultats**	**Point 1**	**Point 2**	**Point 3**	
J1	**Masse de solvant récupéré(g)**	1,0	0,9	0,7	
	Teneur en liant (%)	3,4	3,0	2,4	
	Masse totale de liant(g)	26,0	21,3	56,7	103,9
	% de désenrobage	24,99	20,49	54,52	
J5	**Masse de solvant récupéré(g)**	1,0	0,9	0,4	
	Teneur en liant (%)	3,2	3,0	1,2	
	Masse totale de liant(g)	29,9	45,3	27,8	103,1
	% de désenrobage	29,00	43,99	27,01	
J9	**Masse de solvant récupéré(g)**	0,34	1,0	0,5	
	Teneur en liant (%)	1,1	3,4	1,7	
	Masse totale de liant(g)	14,8	46,9	40,3	102,0
	% de désenrobage	14,49	46,04	39,48	

Tableau-A II-4 TBA sur ECF avec 50% GBR après extraction séquencée

Extraction séquencée ECF avec 50% GBR					
TBA (C°)	**Jour**	J1	J5	J9	J14
	Point 1	59,4	58,4	59	-
	Point 2	61,2	62,3	63	-
	Point 3	61,6	52,1	57	-

Résultats du vieillissement photochimique

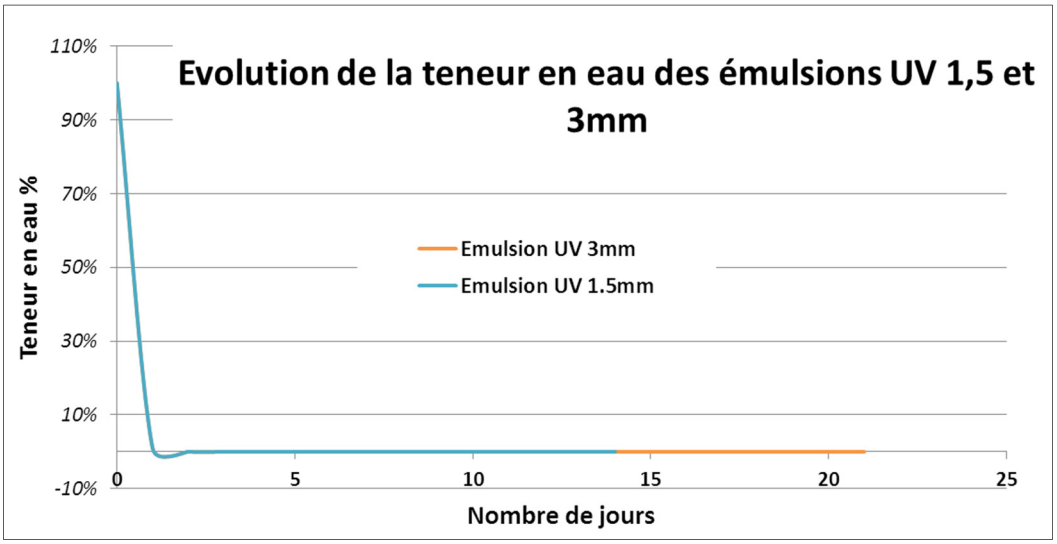


Figure-A II-14 Évolution de la teneur en eau de deux émulsions 3 et 1.5 mm vieillies dans l'enceinte UV

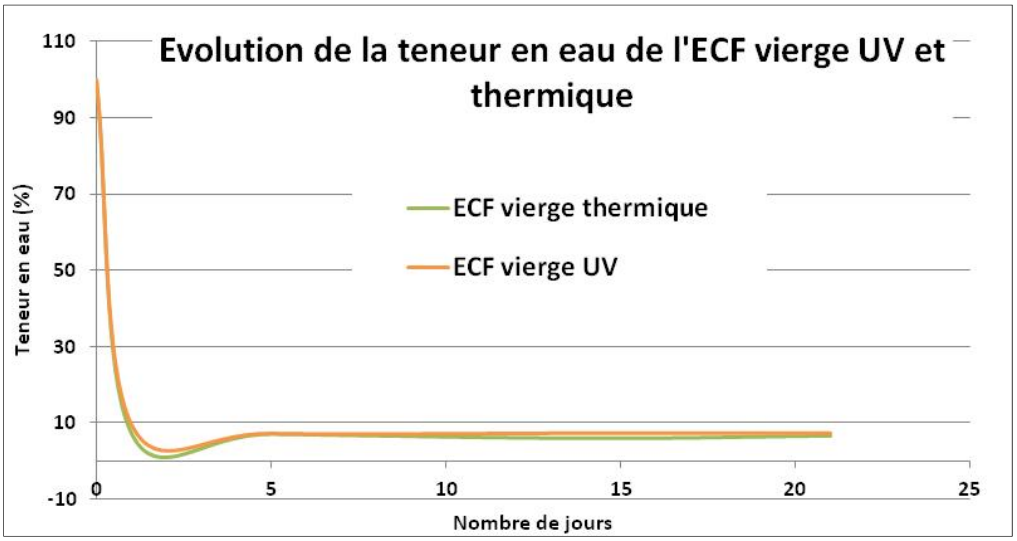


Figure-A II-15 Évolution de la teneur en eau des ECF vierges (UV et thermique)

Résultats rhéologiques du vieillissement photochimique

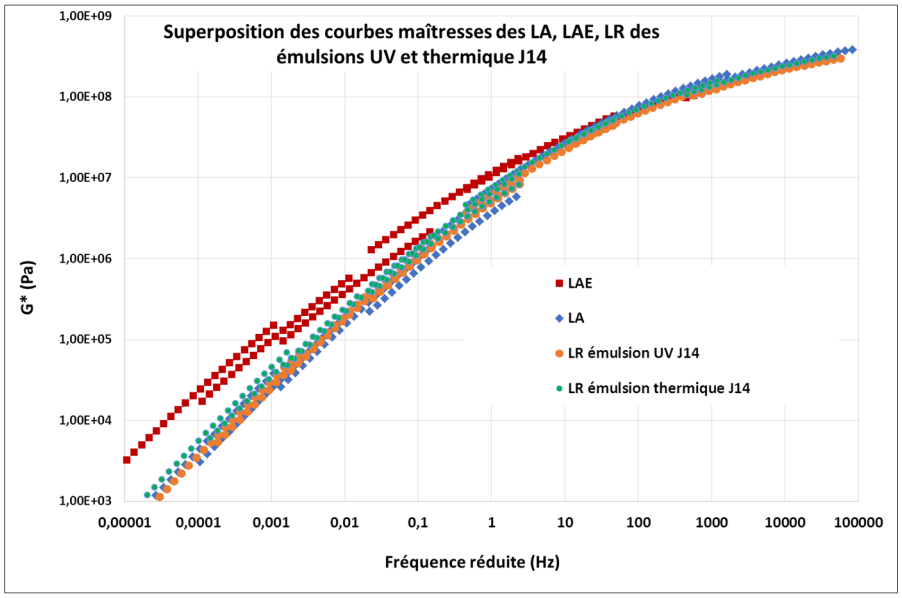


Figure-A II-16 Superposition des courbes maîtresses des liants résiduels des émulsions vieillies UV et thermique J14, de liant d'apport et de liant extrait des GBR

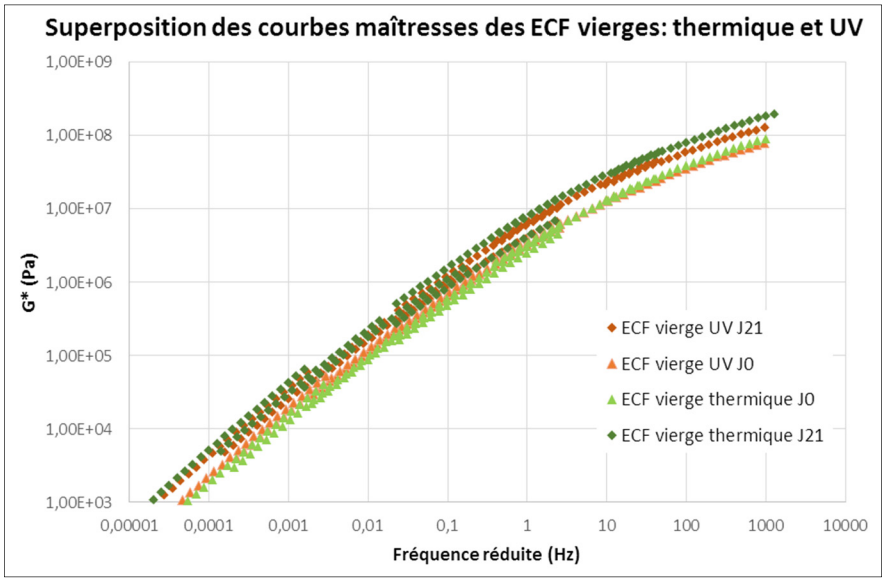


Figure-A II-17 Superposition des courbes maîtresses des ECF vierges: thermique et UV

Résultats des boites de pétri

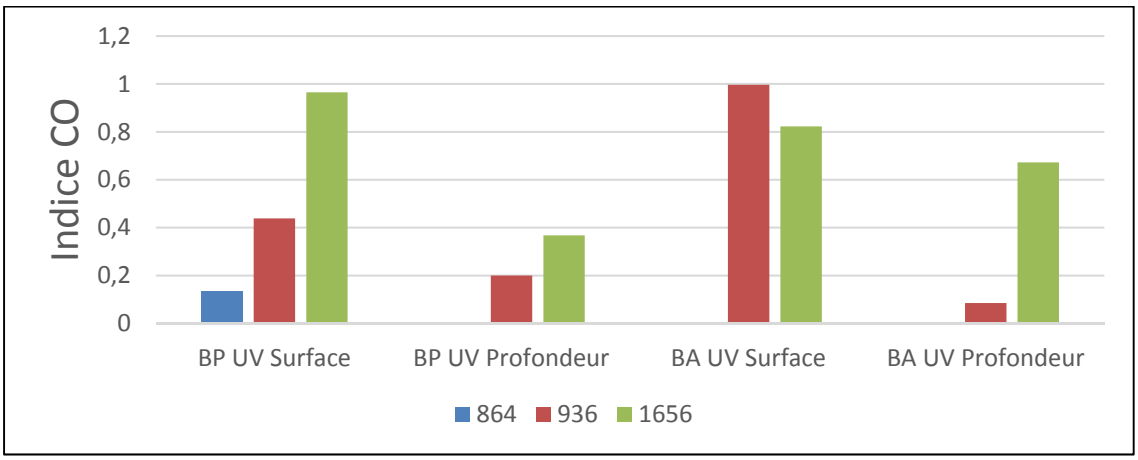


Figure-A II-18 Évolution Ico après vieillissement UV en boîte de pétri

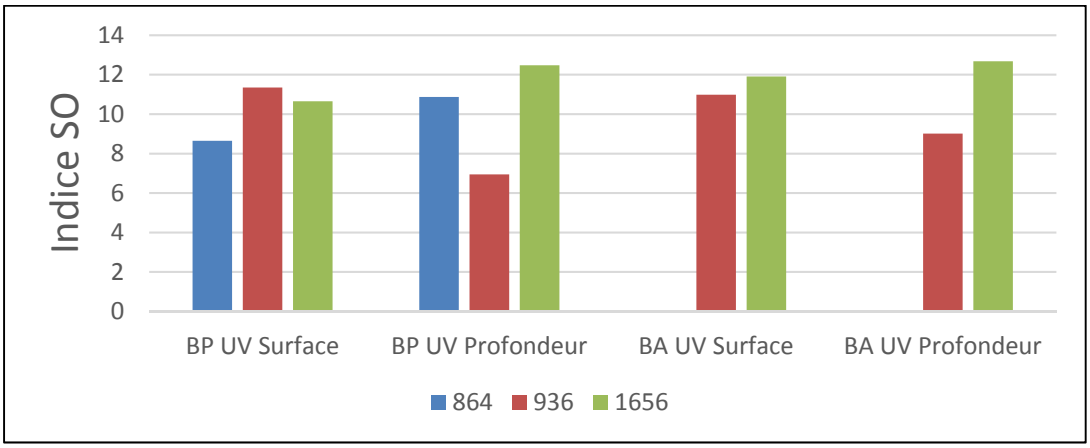


Figure-A II-19 Évolution Iso après vieillissement UV en boite de pétri

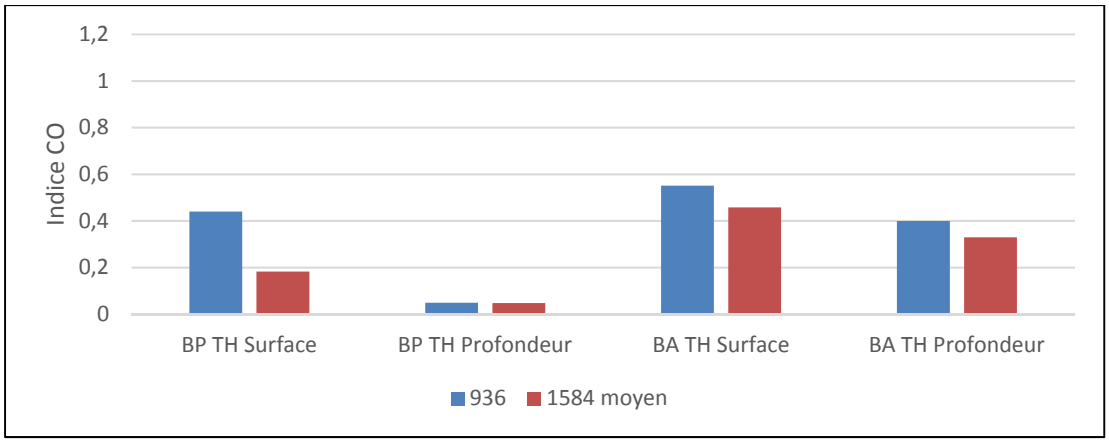


Figure-A II-20 Évolution Ico après vieillissement thermique en boite de pétri

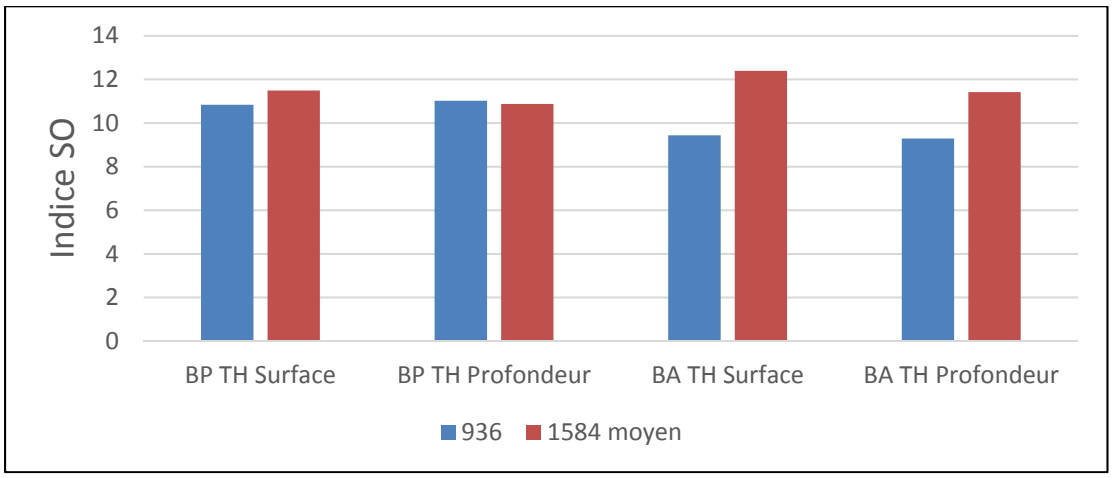
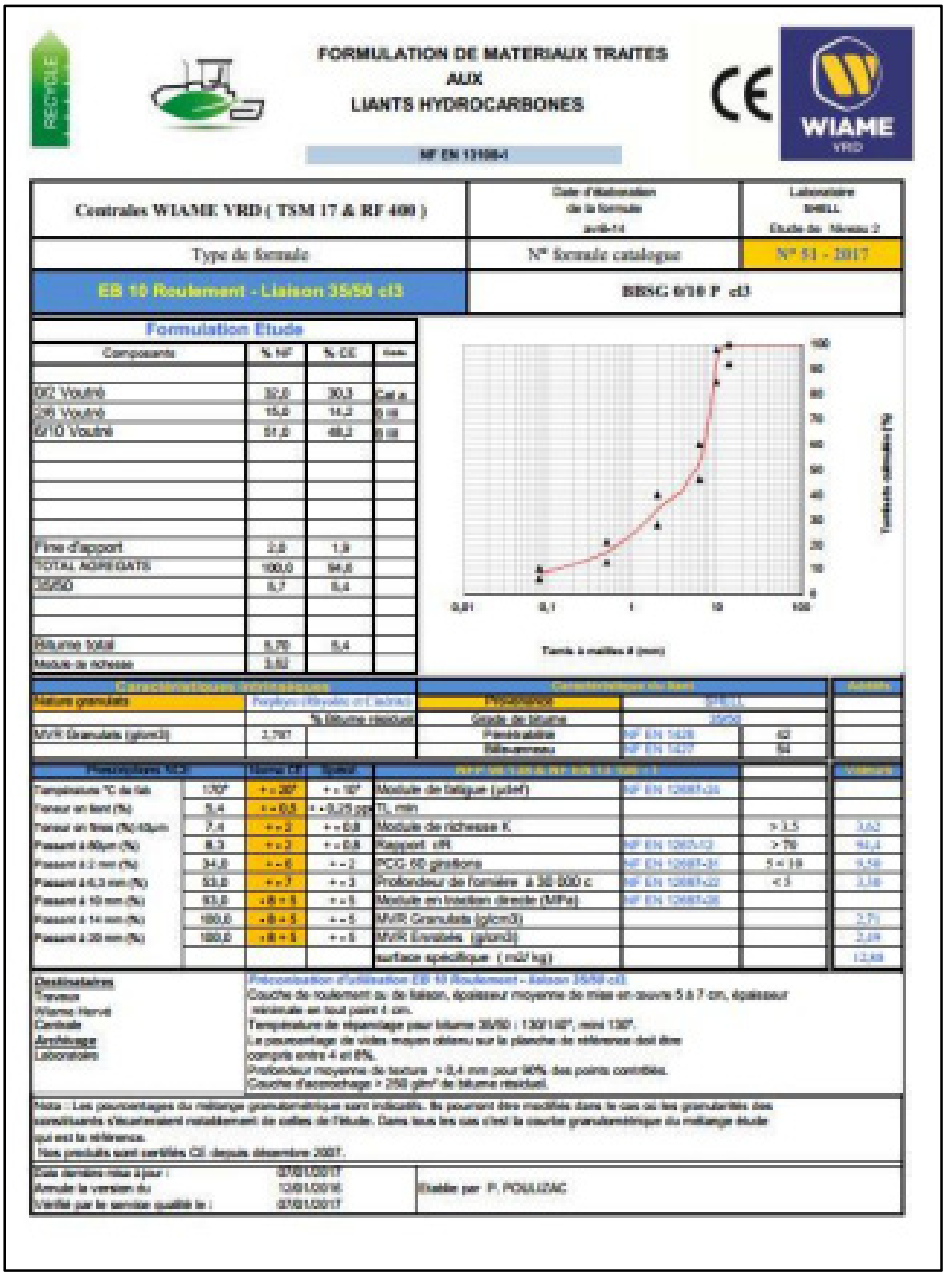


Figure-A II-21 Évolution Iso après vieillissement thermique en boite de pétri

ANNEXE III

FICHES TECHNIQUES DES ENROBÉS À CHAUD POUR GEL-DÉGEL



FORMULATION DE MATERIAUX TRAITES
AUX
LIANTS HYDROCARBONES

NF EN 13108-1

Centrales WIAME VRD (TSM 17 & RF 400)	Date d'élaboration de la formule avril-17	Laboratoire SHELL Etude de Niveau 2
Type de formule	N° formule catalogue	N° 51 - 2017
EB 10 Roulement - Liaison 35/50 cl3	BBSG 0/10 P cl3	

Formulation Etude

Composants	% NF	% CE	
0/2 Vouté	32,0	30,3	Cat a
0/6 Vouté	15,0	14,2	0 18
6/10 Vouté	51,0	48,2	0 18
Fine d'apport	2,0	1,9	
TOTAL AGREGATS	100,0	94,6	
35/50	5,7	5,4	
Bitume total	5,70	5,4	
Module de richesse	3,62		

Caractéristiques contractuelles			Caractéristiques du liant			Additifs
Nature granulats	Porphyre (Rhyolite et autres)		Provenance	SHELL		
	% Bitume recouvt		Grade de bitume	35/50		
MVR Granulats (g/cm3)	2,797		Pénétrabilité	NF EN 1426	42	
			Bilanneau	NF EN 1427	54	

Prescriptions NCS	Normes CE	Ecarts				Valeurs
Température °C de fab	170°	+/- 20°	+/- 10°	Module de fatigue (µdef)	NF EN 12697-24		
Teneur en liant (%)	5,4	+/- 0,5	+/- 0,25 pour TL	TL min			
Teneur en fines (%)<63µm	7,4	+/- 2	+/- 0,8	Module de richesse K		> 3,5	3,62
Passant à 80µm (%)	8,3	+/- 2	+/- 0,8	Rapport c/B	NF EN 12697-22	> 70	94,4
Passant à 2 mm (%)	34,0	+/- 6	+/- 2	PCG 60 giratoire	NF EN 12697-31	5 < 10	9,50
Passant à 6,3 mm (%)	53,0	+/- 7	+/- 3	Profondeur de fornière à 30 000 c.	NF EN 12697-22	< 5	3,10
Passant à 10 mm (%)	83,0	+/- 6 + 5	+/- 5	Module en traction directe (MPa)	NF EN 12697-26		
Passant à 14 mm (%)	100,0	+/- 6 + 5	+/- 5	MVR Granulats (g/cm3)			2,71
Passant à 20 mm (%)	100,0	+/- 6 + 5	+/- 5	MVR Enrobés (g/cm3)			2,19
				surface spécifique (m2/ kg)			12,68

Destinataires
Travaux
Wiame Hervé
Centrale
Archivage
Laboratoire

Préconisation d'utilisation EB 10 Roulement – liaison 35/50 cl3:
Couche de roulement ou de liaison, épaisseur moyenne de mise en œuvre 5 à 7 cm, épaisseur minimale en tout point 4 cm.
Température de répandage pour bitume 35/50 : 130°/160°, mini 130°.
Le pourcentage de vides moyen obtenu sur la planche de référence doit être compris entre 4 et 8%.
Profondeur moyenne de texture > 0,4 mm pour 90% des points contrôlés.
Couche d'accrochage > 250 g/m² de bitume résiduel.

Nota : Les pourcentages du mélange granulométrique sont indicatifs. Ils pourront être modifiés dans le cas où les granulats des sondages s'écarteraient notablement de celles de l'étude. Dans tous les cas c'est la courbe granulométrique du mélange étude qui est la référence.
Nos produits sont certifiés CE depuis décembre 2007.

Date dernière mise à jour :	07/01/2017	Etablie par P. POULIZAC
Annule la version du	12/01/2016	
Vérifié par le service qualité le :	07/01/2017	

Figure-A VI-1 Fiche technique des enrobés à chaud

ANNEXE IV

Étude complémentaire sur le vieillissement photochimique (chapitre 5)

Étude complémentaire sur l'impact des constituants des ECF sur le vieillissement photochimique

Cette étude complémentaire a pour objectif de mettre en évidence les effets des rayons ultraviolets arrivant directement sur le matériau de chaussée bitumineuse placée en couche de roulement, comme l'ECF par exemple, comparativement à un simple effet thermique de la chaleur dans la masse du matériau bitumineux. Ne pouvant dissocier l'effet thermique et UV, nous allons mener la comparaison sur des échantillons exposés à la fois à des effets des ultraviolets et de la température par rapport à d'autres n'ayant subi que les effets de la température. Cette étude a permis également d'évaluer l'influence de divers paramètres tels que la nature du bitume ou encore l'épaisseur du film des échantillons.

Procédure expérimentale établie pour l'étude complémentaire

Identification des différents paramètres de l'étude

Plusieurs paramètres ont été identifiés comme pouvant influer sur les échantillons : Des enceintes de conceptions différentes, en effets des enceintes différentes peuvent fausser les résultats. La température, l'humidité, la distance lampes UV – échantillons, l'occultation, l'épaisseur du bitume et les durées d'exposition et la nature du bitume utilisé. Il a été choisi de garder fixes certains paramètres et d'en faire varier d'autres tel que cité dans le tableau A VI-1.

Tableau-A VI-1 Paramètres de l'étude

Paramètres fixes	Paramètres variables
• une unique enceinte de vieillissement • température • humidité	• hauteur • occultation • épaisseur du liant utilisé • durées d'exposition • nature des échantillons (Bitume pur ou acidifié)

Une seule enceinte a été utilisée, car des expériences passées ont montrées qu'utiliser des enceintes de conceptions différentes pouvaient fausser les résultats. La température et l'humidité sont gardées constantes. On distingue également les paramètres liés à l'enceinte qui a été réglée à une température de 44°C et une humidité de 50%. Les distances lampes UV –échantillons sont d'environ 25cm pour les hauteurs standards et 12,4cm pour les hauteurs intermédiaires (notés H2 par la suite).

Préparation des échantillons

Deux bitumes ont été utilisés pour mener ces essais à savoir un bitume 70/100 sans additifs et un bitume 70/100 avec un additif acidifiant.
Les essais sont réalisés sur deux échelles :

- boites de pétri ;
- lames KBr.

La première partie de l'étude se fait avec 34 boîtes de pétri (Figure A VI-1) dans lesquelles ont été coulés l'équivalent de 1mm de bitume en hauteur. Les paramètres d'exposition sont les suivants :

Bitume avec additifs :

- thermique;
- UV et thermique;

Bitumes purs

- thermique;
- UV et thermique;
- UV et thermique hauteur H2.

Les prélèvements se font à 800h, 1600h, 2400h et 3200h, excepté pour le bitume en hauteur intermédiaire pour lequel les prélèvements commencent au bout de 1600h. Il y a deux boites de pétri par temps d'exposition, sauf pour la hauteur standard en thermique et bitume additivé où il y en a qu'une seule et pour la hauteur intermédiaire en UV et bitume pur où les essais commencent à 800h. La première boîte est destinée à la spectroscopie et la seconde à la TBA. La spectroscopie est effectuée à partir de 6 prélèvements : 3 en surface sans homogénéisation et 3 en profondeur après homogénéisation locale du liant.



Figure-A VI-1 Fabrication des échantillons

L'exposition aux UV va agir sur de très faibles épaisseurs et donc une exposition sur un film très mince était une variante intéressante. Pour mener cette deuxième partie sur très faible épaisseur, nous avons déposé un film mince sur des lames de KBr (servant par la suite à l'analyse IR) (Figure A VI-2). Les expériences sur lames KBr ont la particularité d'être non destructives. En effet nos lames peuvent être exposées dans l'enceinte UV puis après passage à la spectroscopie IR, elles peuvent être remises à l'étuve pour poursuivre le vieillissement. Deux lames ont été utilisées, chacune ayant une couche en moyenne de 80 µm de bitume pur. La première a été exposée aux rayons ultraviolets tandis que l'autre n'a subi que les effets de la température. Elles ont toutes les deux été placées à la hauteur standard. Les analyses infra rouges ont été faites 1 fois par semaine pendant 3 mois puis une 1 fois par mois pour une durée totale de 5 mois.



Figure-A VI-2 Lames de KBr utilisées pour le vieillissement UV et thermique

Plusieurs niveaux de caractérisation ont été choisis pour évaluer les effets du vieillissement dans les différentes conditions exposées précédemment.

Ces moyens de caractérisation sont :

- l'observation visuelle;
- un test conventionnel pour déterminer la température de ramollissement bille-anneau;
- un test physicochimique : la spectroscopie infrarouge pour déterminer l'indice carbonyle et l'indice sulfoxyde avec des techniques d'analyse associées (mode opératoire et la macro

MURE (définie dans un projet national français) et une analyse des données au travers d'un script en langage python (développé pour cette étude) (Dony et al., 2016).

Il est à noter que toutes ces analyses ont été menées sur les boites de pétri et que seule la spectroscopie infra rouge a été réalisée sur les lames de KBr.

Résultats des essais de l'étude complémentaire

Dans cette partie, seuls les résultats de des indices d'oxydations sont présentés.
Visuellement le bitume exposé aux UV (à gauche) présente un aspect irrégulier de sa surface tandis que le bitume non exposé (à droite) à un aspect lisse et
réfléchissant (Figure A VI-3).



Figure-A VI-3 Boites de pétri après 3200h exposée aux
UV (gauche) et non exposée (à droite)

Le calcul des indices est une opération répétitive et relativement longue à cause de la grande quantité de spectres à analyser. La macro MURE ne permettant le calcul d'indices que sur un

seul spectre à la fois, c'est pourquoi un programme en langage python a été développé (Figure 5.62). Il permet le calcul d'indices à la volé à partir de l'ensemble des spectres enregistrés en format CSV (*Comma Separated Values*). La majorité des logiciels de spectroscopie permettent d'éditer les spectres en CSV. Ce script permet un gain de temps notable par rapport au calcul avec la macro MURE pour des résultats identiques à ceux donnés par cette dernière (Figure A VI-4).

```
131             CO = ligne[2]
132             SO = ligne[3]
133             fichier_aires_indices.wr
134         fichier_aires.close()
135         os.remove('Aires.csv')
136         fichier_aires_indices.close(
137
138     def main():
139         bornes=init_bornes()
140         calcul_aires(bornes)
141         calcul_indices()
142
143     def calcul_total():
144         methyl_min= 1349
145         methyl_max= 1538
146         CO_min= 1666.7
147         CO_max= 1738
148         SO_min= 980
149         SO_max= 1066
150         bornes=[[methyl_min,methyl_m
151         calcul_aires(bornes)
152         calcul_indices()
153
154     calcul_total()
```

Figure-A VI-4 Le programme Python

Pour les boites de pétri, dans le cas des expositions UV, on note que les indices augmentent globalement avec le temps notamment pour les échantillons pris en surface. On note également une légère différence entre surface (indice CO plus élevé) et profondeur. Pour les expositions thermiques seules, il n'y a pas de différences notables. Cependant les différences entre surface, profondeur et thermique restent faibles avec des indices CO inférieurs à 1%. La Figure A VI-5 présente un exemple de résultats. Le reste des résultats sont présentés en Annexe 2.

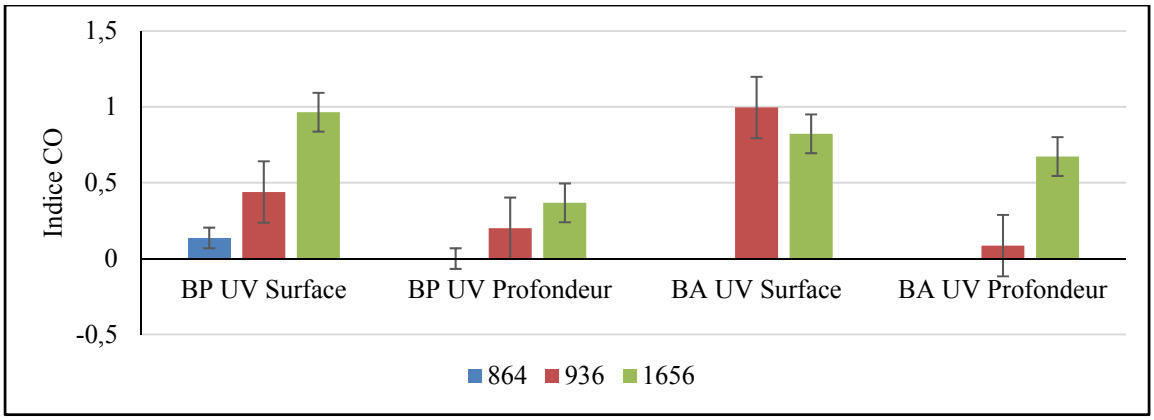


Figure-A VI-5 Évolution ICO après vieillissement UV en boîte de pétri

Sur les lames de KBr, les différences sont notables : les échantillons UV ont des indices plus élevés que les thermiques. L'indice CO atteint des valeurs très élevés de l'ordre de 250% pour les ultraviolets, en effet l'aire du pic des Carbonyles est plus grande que celui des pics de référence (Figure 5.35). Cette étude complémentaire a mis en évidence les effets des ultraviolets. Les échantillons exposés aux UV vieillissent plus rapidement que ceux ne subissant que les effets thermiques et ce vieillissement est d'autant plus rapide que l'exposition aux UV est élevée. Ces expériences ont été menées sur deux épaisseurs et limitées à 3200h. La prolongation de l'exposition sur une plus longue durée et sur des épaisseurs intermédiaires permettrait d'affiner ces résultats. Il faudra par la suite faire un rapprochement entre les conditions en laboratoire et les conditions réelles (Figure A VI-6).

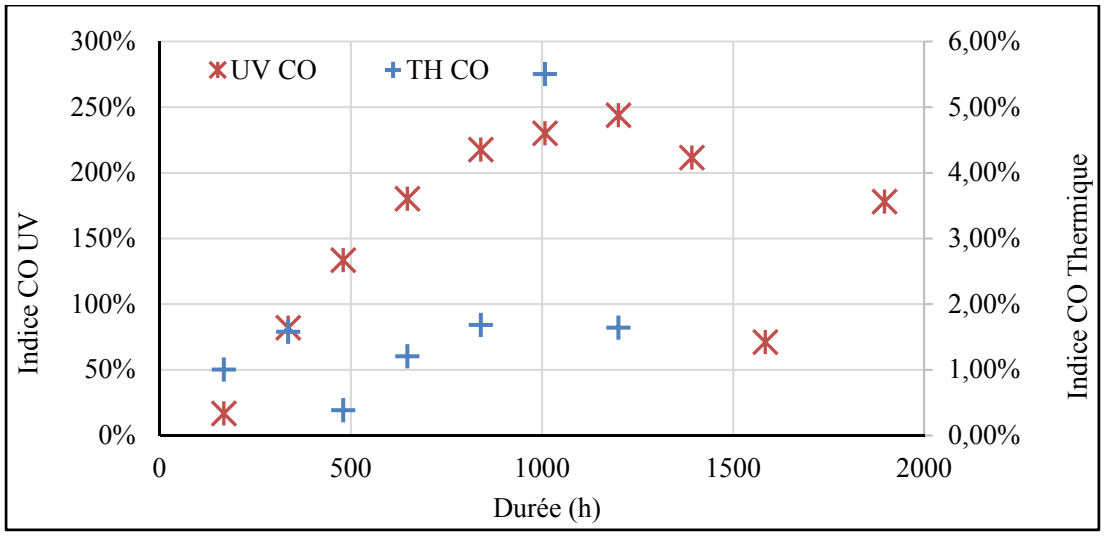


Figure-A VI-6 Évolution ICO après vieillissement en lame KBr

BIBLIOGRAPHIE

AASHTO. 1993. « Guide for design of pavement structures ». *The american assocaition of state highway and transporatation officials* p. 624.

AI, Asphalt Institute. 1995. « Performance Graded Asphalt, Binder Specification and Testing: Superpave Series, Kentucky, États-Unis. ». *Asphalt Institute,* vol. No.1 (SP-1).

Aidara, Mouhamed Lamine Cherif 2016. « Le module complexe et l'impact du granulat sur la prédiction du module dynamique des enrobés bitumineux ». Sénégal, Université de Thiés

AIPCR. 2003a. « Le module complexe et l'impact du granulat sur la prédiction du module dynamique des enrobés bitumineux ». *Association mondiale de la Route*, p. 126.

AIPCR. 2003b. « Recyclage des chaussées ». *Association mondiale de la Route,* vol. 78.02.F p. 160.

Aklonis, John J, et J. MacKnight William (320). 1983. *Introduction to polymer viscoelasticity*, 2nd ed. Ontario

Ali, B. 2006. « Modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées : Application à l'analyse de l'orniérage ». École polytechnique universitaire de Lille 130 p.

Alizé-Lcpc. 2016. *Manuel d'utilisation, Version 1.5*. Coll. « IFSTTAR : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux. ».

Arzan, M. 2007. *Fayat recycling.*, p. 140 p.

ASTM. 1999. *Standard Practice for Design, Testing and Construction of Micro-Surfacing.*, D6372-99a. Coll. « ASTM Book of Standards, American Society for Testing and Materials. ».

ASTM D977. 2005. « Standard Specification for Emulsified Asphalt. ». *West Conshohocken (Pa.): American Society for Testing and Materials.*

ASTM D6372. 1999. « Standard Practice for Design. Testing and Construction of Micro-Surfacing.». *ASTM Book of Standards, D6372-99a. West Conshohocken (Pa.): American Society for Testing and Materials.* .

Autoroutes, VINCI. 2016. « Tarifs de péage ». < <http://www.vinci-autoroutes.com/fr/system /files / pdf/2016/04/asf-tarifs_print_2016_ book0516.pdf> >. Consulté le Consulté le 12 Juin 2016.

Ba, M. 2012. « Comportement mécanique sous sollicitations cycliques de granulats quartzitiques de Bakel - Comparaison avec des matériaux de référence du Sénégal et d'Amérique (USA)». Université Cheikh Anta Diop, Dakar.

Beaulieu , Nathalie 2011. « Enquête sur la tolérance à l'insécurité routière des détenteurs de permis de conduire du québec ». *Fondation CAA- Québec Federal Highway Administration (FHWA)*.

Bertaud, D 2007. « Enrobés coulés à froid ». In *Le carrefour de la route durable*. (Toulouse, France 18 octobre 2007). Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Toulouse - CETE du Sud-Ouest, Le Syndicat Professionnel Régional de l'Industrie Routière - Midi-Pyrénées, Le Centre National de la Fonction Publique Territoriale - délégation régionale Midi-Pyrénées.

Beze, L. E. 2008. « Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumeux: identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport. ».

Bitume Québec. 2014. « L'entretien et la réhabilitation des chaussées bitumineuses: Les enrobés coulés à froid ». In *Bitume Québec-Formation technique*. (Montréal, 2 décembre 2014). Bitume Québec.

Bitume Québec. 2010b. « Rapports d'analyses des coûts du cycle de vie (ACCV) et analyses du cycle de vie environnementale (AECV) pour différentes structures des chaussées souples et rigides. ». *Centre technique nord américain d'Eurovia.*

Bony, B. 2000. « Entretien et exploitation de la route. La réparation des chaussées béton fissurées ». *Revue Génerale des Route (RGRA)*, n° 788.

Bordes, P, G Guinard et G Laurent. 1996. « L'entretien courant des chaussées ». *SETRA-guide pratique*.

Bourrel, M, et F Verzaro. 1996. « Mécanismes de rupture des émulsions de bitume routier: Les agents de surface ». *Le Journal de la société chimique de France : l'actualité chimique*, n° 2-3, p. 42-48.

Brodeur, Michel , Jean Cartier, Jean Marie Durand, Eric Fauteux et Stéphane Fortin. 2002. « Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples. ». *MTQ, AQTR, CERIU, AIMQ, Québec*

Brosseaud, Yves. 2007. « Le retraitement à froid des chauss froid des chaussées souples: les couches de roulement. ». *Formation technique, Bitume Québec* vol. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Brosseaud, Yves , Robert Abadie et Régis Legonin. 1997 «Couches de roulement très minces et ultra-minces en matériaux bitumineux à chaud-Bilan d'emploi et de comportement». *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - 207 - JA - Réf : 4107* vol. PP. 55-71.

Brosseaud, Yves, Frédéric Delfosse, Christine Deneuvillers, Yvon Gerbel, Jean-François Hamon, Lionel Odie, Jean-Marcel Riviere, Bruno Taillis, Jean-Pierre Triquigneaux, Jean-Etienne Urbain, Patrice Vallon, François Verhee et Jean-Luc Vitrac. 2013. « Matériaux bitumineux coulés à froid ». *Guide technique,* vol. 3.1.

Carle, Philippe 2011. « Techniques entretien palliatif- formation chaussées ». In *Cottia Centre Est*.

Carter, Alan. 2002. « Rhéologie en petite déformation des enrobés bitumineux et mesure de leur résistance à basse température à partir de l'essai TSRSTS ». École de technologie supérieure.

CCLEAR. 2015. « Impact des Conditions Climatiques sur les Infrastructures Routières ». In *Séminaire CCLEAR*. (France, 3 février 2015).

CEBTP. 1984. *Guide Pratique de Dimensionnement des chaussées pour les pays Tropicaux*. Paris, France 155 p.

Cerema. 2016. « La facture énergétique territoriale : une étude exploratoire ». < http://www.territoires-ville.cerema.fr >. Consulté le 27 Mai 2017.

CEV, Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception. 2009. *Réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace public urbain.* France.

Chabot, Armelle, Olivier Chupin, Lydie Deloffre et Denis Duhamel. 2010. *Viscoroute 2.0 a: tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement*. 2, 227-250 p.

Chappat, M, et J Plaut. 1982. « Le recyclage des enrobés en centrale. Bilan un an après. ». *Revue générale des routes et des aérodromes,* vol. 584, p. 5-15.

Chen, Chi-Wei, Vincent Gaudefroy, Myriam Duc, Yannick Descantes, Ferhat Hammoum et Jean-Pierre Magnan. 2016. « A Mineralogical Approach of the Interactions Between Bitumen, Clay and Water in Hot Mix Asphalt (HMA). ». In *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*. p. 61-72. Springer.

Chen, M.Y , S.P WU, Y Zhang et H Wang. 2010. « Effects of conductive filler on temperature distribution of asphalt pavement ». *Physica Scripta, T139*.

CIRAIG. 2009. *Analyse du cycle de vie comparative des chaussées en béton de ciment et en béton bitumineux à des fins d'intégration de paramètres énergétiques et*

environnementaux au choix des types de chaussées. Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services.

Colbert, Baron , et Zhanping You. 2012. « The properties of asphalt binder blended with variable quantities of ». *Construction and Building Materials,* vol. Vol. 26, n° 1, p. 552-557.

COP 21. 2015. « Paris Climate Conference ». In *Climate Conference* (France).

Corté, Jean-François , et Hervé Di Benedetto (234). 2004a. *Matériaux routiers bitumeux Tome 1: description et propriétés des constituants*. ISBN 2746209594 9782746209596. Paris: Hermès Science Publications.

Cuelho, Eli Vincent, Robert L Mokwa et Michelle Akin. 2006. *Preventive maintenance treatments of flexible pavements: A synthesis of highway practice*. Montana Department of Transportation, Research Programs.

Curtis, Christine W, Keith Ensley et Jon Epps. 1993. « Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption ». In *National Research Council Washington*. (Washington, DC, États unis). National Research Council

Cyna, M. 2006. « Les émulsions de bitume. ». *Revue générale des routes et des aérodromes (RGRA) : Union des syndicats de l'Industrie routière française (USIRF).* vol. Section SFERB. ISBN 2913414486 9782913414488). (s.d.).

De La Roche, Chantal, Martin Van De Ven, Jean-Pascal Planche, Wim Van den bergh, James Grenfell, Thomas Gabet, Virginie Mouillet, Laurent Porot, Fabienne Farcas et Carole Ruot. 2013. « Hot Recyling of bituminous Mixtures- Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials. ». *RlLEM State of the Art Reports*.

Delorme, J. L. 2007. « Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud: LPC mix design guide-Série Chaussées ». *Laboratoires des ponts et chaussées (LCPC)*, p. p.199.

Do, M-T, Véronique Cerezo, Yannick Beautru et Malal Kane. 2013. « Modeling of the connection road surface microtexture/water depth/friction ». *Wear,* vol. 302, n^{o} 1, p. 1426-1435.

Dony, Anne , Layella Ziyani, Ivan Drouadaine, Simon Pouget, Stéphane Faucon-Dumont, Delphine Simard, Virginie Mouillet, Jean Eric Poirier, Thomas Gabet, Laurence Boulange, Aurélia Nicolai et Carole Gueit. 2016. « Le projet national MURE au FTIR -spectroscopie study to assess ageing of asphalt mixtures ». *Congrès E&E 2016*.

Doré, Guy 1997. « Détérioration des chaussées en condition de gel : une nouvelle approche prévisionnelle ». Université Laval, Québec, 390 p.

Doré, Guy, et Hannele Zubeck. 2009 *Cold regions pavement engineering*.

Doucet, Felix , et Bruno Auger. 2010. *Détermination du module complexe des enrobés au ministère des transports du québec*. Ministère des transports du Québec: Service des matériaux d'infrastructures, 152 p. < http://www.mtq.gouv.qc.ca/, Consulté le 29 septembre 2012. >.

Durrieu F, Farcas F et Mouillet V. 2007. « The influence of UV aging of a styrene/butadiene/styrene modified bitumen: comparison between laboratory and on site aging. ». *Fuel*

EAPA. 2008. « Arguments to Stimulate the Government to Promote Asphalt Reuse and Recycling ». In *European Asphalt Pavement Association*. (Belgique, Mai 2008). < www.eapa.org. >.

Egis, Bceom 2009. *Catalogue de dégradation des routes revêtues -Assistance Technique EgisBceom International*. Mali, 47 p.

EL-Beze, Laetitia. 2008. « Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumeux: identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport ». Université Paul Cézanne.

Eurovia. 2013. « Carriere et recyclage ». < https://www.eurovia.fr/qui-sommes-nous/savoir-faire/production-industrielle/recyclage >. Consulté le 20 Mars.

Farcette, Nicole, Guy Doré et Hossein Nowamooz 2010. Développement et intégration d'une méthode de prédiction de soulèvement de structure de chaussées en contexte nordique dans le cadre d'une nouvelle approche rationnelle de conception des chaussées municipales. Laboratoire de Géotechnique routiere-Université Laval : INSA Strasbourg, 110 p.

Fayolle, B, et J. Verdu. 2005. « Vieillissement physique des matériaux polymères ». *Techniques Ingénieur*.

Garfa, A., Sanou, O., Dony, A., Ziyani, L., Carter, A., Zaouali, W., Charton, V. 2016. « Effect of Aging on Binder Characteristics of Virgin and Recycled Microsurfacing Materials». *International Society for Asphalt Pavement (ISAP)*.

Genovese, Christopher R, Kathryn Roeder et Larry Wasserman. 2006. « False discovery control with p-value weighting ». *Biometrika,* vol. 93, n° 3, p. 509-524.

Hastie, Trevor, Robert Tibshirani et Jerome Friedman. 2002. « The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction ». *Biometrics*.

Hixon, C. D, et D. A. Ooten. 1993. « Nine years of microsurfacing i ». *Transportation Research Record, in Oklahoma,* vol. no. 1392, p. pp. 13–19.

IDRRIM. 2013. *Système d'Evaluation de variantes Environnementales- Avis technique* n°160: Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité.

IDRRIM. 2017. *Matériaux bitumineux coulés à froid-Guide technique*. Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité.

Imtiaz, Ahmed, et C. W. Lovell. 1991. « Use of waste materials in highway construction ». *Transportation research record*, p. 9.

Info, Bitume. 2009. « Bitume et développement durable ». *Groupement Professionnel des Bitumes.* , vol. numéro spécial 2, n°

Infraguide. 2003. *Timely preventive maintenance for municipal Roads : A best practice by the national guide to sustainable municipal infrastructure*. Infraguide

ISSA. « (revised) e. 2005. Test Method for Wet Track Abrasion of Slurry Surfaces. 4nd revision. Design Technical Bulletins, 100. Annapolis (Md.): International Slurry Surfacing Association. ».

ISSA. 2005a. *Recommended Performance Guidelines for Micro-surfacing.* Design Technical Bulletins A-143. Annapolis (Md.). 7 p.

ISSA. 2005b. *Test Method for Measurement of Stability and Resistance to Compaction. Vertical and Lateral Displacement of Multilayered Fine Aggregate Cold Mixes.* Design Technical Bulletins, 147. Annapolis (Md.).

ISSA. 2005c. *Test Method for Wet Track Abrasion of Slurry Surfaces*. Design Technical Bulletins, 100. Annapolis (Md.).

ISSA. 2005d. *Test Method to Classify Emulsified Binder/Aggregate Mixture Systems by Modified Cohesion Tester Measurement of Set and Cure Characteristics*. esign Technical Bulletins, 139. Annapolis (Md.).

ISSA. 2005e. *Recommended Performance Guidelines for Micro-surfacing.* . Design Technical Bulletins A-143. Annapolis (Md.).

James, Alan. 2006. « Overview of asphalt emulsion ». *Transportation Research Circular*.

Jolicoeur, Caramel, et Nathalie Otis. 2006. *Étude du mécanisme d'adhésion entre un liant bitumineux et un granulat* Minstere du transport du Québec.

Kicak, K, et J-F Ménard. 2009. *Analyse du cycle de vie comparative des chaussées en béton de ciment et en béton bitumineux à des fins d'intégration de paramètres énergétiques et environnementaux au choix des types de chaussées*. Ministère des transports du Québec: CIRAIG 64 p.

Ktari, Rahma. 2016. « Mécanismes et modélisations de dégradation et décollement des interfaces de couches de chaussées ». Université de Limoges.

Kucharek, Anton S, J Keith Davidson, Trevor Moore et Trevor Linton. 2010. « Performance Review of Micro Surfacing and Slurry Seal Applications in Canada ». In *Annual Conference Proceedings-Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*. Vol. 55, p. 311.

Kucharek , Tony 2012. « Affinité bitume-granulat, additifs et techniques d'amélioration-Industrie McAsphalt ». In *Bitume Québec-formation technique* (Québec, 2 et 4 décembre 2012).

Lamothe, Sébastien. 2014. « Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques ». École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE], 467 p.

Lamothe, Sébastien , Daniel Perraton et Hervé Di Benedetto. 2016. « Deterioration of HMA partially saturated with water or brine subjected to freeze-thaw cycles ». In *8th RILEM InternationalSymposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*. (Netherlands), p. 705–717.

Larpent, C, et Th F Tadros. 1991. « Preparation of microlatex dispersions using oil-in-water microemulsions ». *Colloid & Polymer Science,* vol. 269, nº 11, p. 1171-1183.

LCPC. 1987. *Caractérisation des liants modifiés pour enduits superficiels-Rapports des laboratoires en Construction routière*.

LCPC. 1991. *Méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins en entretien d'un réseau routier : VIZIR* 34 p.

LCPC. 1994a. *Conception et dimensionnement des structures de chaussées neuves*.

LCPC. 1998. *Le catalogue des structures type de chaussée neuve du LCPC*.

LCPC. 1994b. *Caractérisation des liants modifiés pour enduits superficiels. Rapports des laboratoires*.

Lebec, Sabine. 2014. « Les enrobés coulés à froid ». In *Formation Bitume Québec*. (Québec, 2 décembre 2014 , Québec , Canada). Bitume Québec.

Lebec, Sabine 2012. « Utilisation des liants bitumineux en centrale et en chantier superficiel». In *Bitume Québec -Formation Technique* (ETS Canada, 4 et 5 décembre 2012).

Lédée, Vincent, Gérard Delalande et Pierre Dupont. 2005. *Adhérence et granulats*. Bulletin technique. Coll. « des laboratoires des ponts et chaussées », 91-116 p.

Lesueur, Didier. 2002. « La rhéologie des bitumes: Principes et modification ». *Rhéologie,* vol. 2, p. 1-30.

Lesueur, Didier, et Juan Josè Potti. 2004. « Cold mix design: a rational approach based on the current understanding of the breaking of bituminous emulsions ». *Road Materials and Pavement Design,* vol. 5, nº sup1, p. 65-87.

Lo, X , et M Ndiaye. 2009. *Élaboration d'un catalogue des dégradations des chaussées au Sénégal* École supérieure polytechnique de Thiès (Sénégal). p 125.

Meeddat. 2009. « Réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace urbain». *Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception*, p. 13.

Menard , Jean Claude , et S Charpentier. 2006. « Enduits superficiels d'usure (ESU) Enrobés coulés à froid (ECF) Actualisation des connaissances sur les revêtements superficiels». *Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA)*.

Merbouh, M'hammed 2010. « Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue ». Université de Bordeaux 264 p.

Meunier, Mathieu. 2012. « Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux ». École de technolgie supérieure.

Mills, B, et J Andrey. 2002. « Climate Change and Transportation: Potential Interactions an Impacts. In The Potential Impacts of Climate Change on Transportation ». In *Workshop Summary, U.S. Dept. of Transportation,* . (États unis, 1-2 October 2002).

Minitab.2017.«MinitabStatisticalSoftware». Consulté le 6 mars 2017.

Mouillet, Virgine , Fabienne Farcas, Emmanuel Chailleux et Laurent Sauger. 2014. « Evolution of bituminous mix behaviour submitted to UV rays in laboratory compared to field exposure ». *Materials and structures,* vol. 47, nº 8, p. 1287–1299.

Mouillet, Virgine, et P Dumas. 2008. « Durability of polymer modified bitumens: comparison of evolution due to conventional standardised ageing tests with the in situ ageing of binders in pavements ». In *Proc. 4TH Eurasphalt Euobitume Congres* (Copenhagen, Denmark, Held May 2008 Cph. Den.,). European Asphalt Pavement Association (EAPA).

Moustapha, T. 2009. *Influence of bitumen aging on asphalt quality, comparison between bitumen and asphalt aging*. Université Gent et Vrije et Université Brussel.

MTQ. 2001. *Réseau routier, étude réalisée dans le cadre de l'élaboration d'un plan de transport du Bas-Saint-Laurent* Ministère des Transports du Québec : Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Île-de-la-Madeleine, Service des inventaires et du Plan.

Navaro, Julien. 2011. « Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques ». Science des Métiers de l'Ingénieur l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 313 p.

NF EN 1367-1. 2007a. « Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance au gel-dégel ».

NF EN 1367-1. 2007b. « Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance au gel-dégel ».

NF EN 1426. 2007. « Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille».

NF EN 1427. 2007. « Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement -Méthode Bille et Anneau ».

NF EN 12273. 2008. « Matériaux bitumineux coulés à froid – Spécifications ». n° (01-10-).

NF EN 12274-3. 2003. « Matériaux bitumineux coulés à froid - Méthodes d'essai - Partie 3 : consistance ».

NF EN 12274-4. 2003. « Matériaux bitumineux coulés à froid - Méthodes d'essai - Partie 4 : détermination de la cohésion du mélange ».

NF EN 12274-5. 2003. «Matériaux bitumineux coulés à froid - Méthodes d'essai - Partie 5 : détermination de l'usure ».

NF EN 12274-7. 2005. « Matériaux bitumineux coulés à froid - Méthodes d'essai - Partie 7 : essai d'abrasion par agitation ».

NF EN 12274-8. 2006. « Matériaux bitumineux coulés a froid - Méthodes d'essai - Partie 8 : évaluation visuelle des défauts ».

NF EN 12607-1. 2014. « Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air - Partie 1 : méthode RTFOT». *Afnor*.

NF EN 12697-1. 2012. « Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 1 : teneur en liant soluble ».

NF EN 12697-3. 2013. « Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 3 : extraction des bitumes à l'évaporateur rotatif ».

NF EN 12697-22. 2002. « Essai d'orniérage (orniéreur grand modèle) ».

NF EN 12697-26. 2012. « Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26 : module de rigidité ».

NF EN 13108-1. 2007a. « Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux - Partie 1 : enrobés bitumineux ».

NF EN 13108-1. 2007b. « Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux - Partie 1 : enrobés bitumineux ».

NF EN 13108-2. 2006. «Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux - Partie 2 : béton bitumineux très minces». *Afnor*

NF EN 14769. 2013. « Bitumes et liants bitumineux - Vieillissement long-terme accéléré réalisé dans un récipient de vieillissement sous pression (PAV)». *Afnor*.

NF EN 14770. 2012. « Bitumes et liants bitumineux - Détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase - Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR). ».

NF EN 14895. 2006 «Bitumes et liants bitumineux - Stabilisation du liant d'une émulsion ou d'un bitume fluidifié ou fluxé ».

Nguyen, Dang-Truc. 2006. « Prédiction des déformation permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses ». Structures et Matériaux. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 194 p.

Nguyen, Tien Sy, Pascal Vrignat, Manuel Avila, Stéphane Begot et Florent Duculty. 2007. « Détection de défauts sur la surface de chaussées par système de vision ». In *Colloque GRETSI*.

Nisbet , R, J Elder et G Miner. 2009. « Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications ». *Academic Press, 864 p.-ISBN: 0123747651.*

Olard , François , Frédéric Noël et Frédéric Loup. 2006. « Modulus Testing in Indirect Tension Mode ». *Road Materials and Pavement Design.,* vol. Volume 7- No. 4, p. 543 à 554.

Paquin, Yvan. 2009. « Différentes techniques d'entretien et de réhabilitation des chaussées rurales à faible trafic ». In *Congrès Bitume Québec*. (26 mars 2009).

Pavement Interactive.2016.<http://www.pavementinteractive.org/article/transverse-cracking>.

Peltonen, P. V. 1991. « Characterization and Testing of Fibre-modified Bitumen Composites ». *Journal of Materials Science* vol. 5618-5622.

Perrot, Jean-Louis. « Congrès de l'IDRRIM ». *Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la mobilité (IDDRIM)*.

Pierard, Nathalie , et Virginie Mouillet. 2014. « Impact du recyclage multiple sur les propriétés du liant. In : PROJET RE-ROAD ». In *Laboratoire d'Aix-en Provence-CEREMA, IFSTTAR Centre de recherches routières (CRR) -Bruxelles*. (Nantes, France, 11 et 12 février 2014).

Pittenger, Dominique M, Douglas D Gransberg, Musharraf Zaman et Caleb Riemer. 2014. « Comparative Analysis of Microsurfacing and Portland Cement Slurry Seal for Rut Filling ». In *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. (Washington DC).

Poirier, J E, X Carbonneau et J P Henrat. 2002. « Les Enrobes A Froid : Des Materiaux Evolutifs - Etude Du Murissement Et De Son Impact Sur Les Caracteristiques Du Liant Residuel ». *Transportation Research Information Documentation (TRID)*, nº 805, p. 49-55.

Probinord. 2015. « Probinord: Techniques routieres ». < http://probinord.fr/ >. Consulté le Consulté le 20 mars 2015.

Proteau, Marc , et Catherine Lavoie. 2014. « ». *L e s e n r o b é s à m o d'u l eélevé (EME) adaptés au climat nordique. Via Bitume , Québec.,* vol. Vol. 9 N°1.

Ramond, G, et C Such. 1990. « Bitumes et enrobes bitumineux-bitumes et bitumes modifies-relations structures, propriétés, composition. Bull Liaison Lab Ponts Chaussées . ». *LCPC: Laboratoires centrales des ponts et chaussées*

Rebufa, C, J Kister, M Julliard et J Lamontagne. 2002. « Etude comparative du vieillissement des bitumes routiers : impacts photochimique et thermique ».

Reinke, GH , WR Ballou, S Engber et TM O'Connell. 1990. « Studies of Polymer-Modified Microsurfacing Materials in Highway Maintenance ». *ASTM International*

Robati, Masoud. 2014. « Evaluation and improvement of micro-surfacing mix design method and modelling of asphalt emulsion mastic in terms of filler-emulsion interaction ». École de technologie supérieure, 262 p.

SEVE. 2009. « Système d'Evaluation des Variantes Evaluation des Variantes Environnementales Environnementales ». *USIRF*.

SFERB. 2006. « Les émulsions de bitume. ». *RGRA :Revue générale des routes et des aérodromes- Union des syndicats de l'Industrie routière française (USIRF).Section SFERB. Paris*

St-Laurent, Denis. 2006. *Logiciel Chaussée II : prise en considération des soulèvements dus au gel-Bulletin d'information technique*. Transports de Québec 2 p.

St-Marseille, Marc , et Jean-Bruno Lapointe. 1997 *La gestion des équipements vers l'entretien préventif*. Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail secteur fabrication de produits en métal et de produits électriques, bibliothèque nationale du Québec.

STAC. 2007. « Etat de la surface des chaussées aéronautiques ». *Catalogue pour la réalisation des relevés visuels de dégradations sur chaussées aéronautiques*.

Tachon, Nathalie. 2008. « Nouveaux types de liants routiers a hautes performances, a teneur en bitume reduite par addition de produits organiques issus des agroressources ». Chimie Macromoléculaire et Supramoléculaire Institut national polytechnique de Toulouse 285 p.

Techno-bitume. 2014. « Les enrobés à module élevé adaptés aux climats froids ». *Via bitume Quebec*

Total.2017.«FichetechniqueRegenis».<http://www4.total.fr/Europe/France/pdf/bitumes/Fiche-technique-Regenis.pdf>. Consulté le Consulté le 15 juin.

Touhara, Radouen. 2012. « Étude de la résistance en fatigue des matériaux bitumineux ». École de technologie supérieure, 215 p.

Trupia, Laura, Tony Parry, Luis C Neves et Davide Lo Presti. 2017. « Rolling resistance contribution to a road pavement life cycle carbon footprint analysis ». *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 22, nº 6, p. 972-985.

Université -Paul Sabatier. 2012. « Cours de Master de Routes Tome II ». *Université -Paul Sabater Toulouse.*

USIRF. 2012. « Developpement durable: les enrobés tiedes ». *Union des syndicats de l'industrie routière française*.

USIRF. 2001. « Les enrobés bitumineux Tome I ». *RGRA- Union des syndicats de l'Industrie routière française.*

Uzarowski, L, et I Bashir. 2007. « Rational Approach for Selecting the Optimum Asphalt Pavement Preventive and Rehabilitation Treatments-Two Practical Examples from Ontario ». In *2007 Annual Conference and Exhibition of the Transportation*

Association of Canada: Transportation-An Economic Enabler (Les Transports: Un Levier Economique).

Vallon, Patrice 2010. « Les enduits superficiels : Pathologie , Reparabilite , Recyclabilite ». In *Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Meren charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat*. (Lyon, France Septembre). Laboratoire régional des ponts et chaussées de Clermond Ferrand , LCPC , département centre d'études techniques et d'équipement CETE.

Vanelstraete, A, et L Francken. 1995. *Ornierage: Synthese des principaux constats et resultats*. Coll. « Bulletin CRR, Bruxelles », 9-16 p.

Ziyani, Layella. 2013. « Etude des phénomènes physico-chimiques à l'interface émulsion de bitume/substrat minéral-Application à la formulation de Bétons Bitumineux à l'Emulsion (BBE) ». Université Nantes Angers Le Mans, 227 p.